

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DE UNA VARILLA  
DE ACERO GALVANIZADO EN CONCRETO REFORZADO CON DIFERENTES  
CONCENTRACIONES DE CLORUROS Y CARBONATOS**

**ANA YIBE BARRAGÁN CÁRDENAS  
JULLY ANDREA ARCINIEGAS ESTEPA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2012**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DE UNA VARILLA  
DE ACERO GALVANIZADO EN CONCRETO REFORZADO CON DIFERENTES  
CONCENTRACIONES DE CLORUROS Y CARBONATOS**

**ANA YIBE BARRAGÁN CÁRDENAS  
JULLY ANDREA ARCINIEGAS ESTEPA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Civil**

**Director**

**Ing. Civil, Ph.D RICARDO ALFREDO CRUZ**

**Codirector**

**Ing. Metalúrgico, Ph.D DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2012**

*A Dios por darme sabiduría y guiarme por el camino correcto.*

*A mis padres Rosa Elena Estepa Rojas Y Julio Cesar Arciniegas Fletcher, por ser las personas a las que les debo todo lo que soy y seré, por su apoyo incondicional, su paciencia, sus consejos, sus ánimos y todas sus enseñanzas a través de este largo camino.*

*A mi hermana Nathaly, por compartir momentos tanto buenos como malos durante las distintas etapas de mi vida.*

*A mi amiga y compañera Ana Yibe Barragán Cárdenas, por todo el esfuerzo y ánimo durante la realización de nuestro proyecto.*

*Y finalmente a todos mis amigos y compañeros que hicieron parte de esta meta que hoy logro alcanzar.*

**JULLY ANDREA ARCINIEGAS ESTEPA**

*A Dios por darme el don de la Vida, fortaleza, dedicación y sabiduría para alcanzar esta gran meta.*

*A mis padres Zenaida Cárdenas y Carlos Barragán quienes me han brindaron todo su apoyo, cariño, amor, confianza y compañía durante toda mi vida.  
Gracias por tanto esfuerzo y dedicación.*

*A mis hermanos, Edith y Jhokn Barragán por su constante apoyo y sabios consejos.*

*A Eddy Ruidiaz por su amor, alegría y motivación, durante el desarrollo de mi carrera.*

*A mi amiga y compañera de proyecto, Jully Andrea Arciniegas por su apoyo dedicación y esfuerzo en la realización de este trabajo.*

*A mis amigos y compañeros de estudio que estuvieron presente en mi desarrollo profesional y con los que compartí momentos de alegría en especial a Karen Ruiz, Catalina Castilla y Yurani Bohórquez.*

**ANA YIBE BARRAGÁN CÁRDENAS**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos:

A Dios, por iluminar nuestro camino y ser el responsable de este logro.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Civil por permitirnos obtener una formación integral.

Al profesor RICARDO ALFREDO CRUZ, Director de nuestro proyecto, por brindarnos sus conocimientos, confiar en nosotras y dedicarnos parte de su tiempo en desarrollar este proyecto.

Al profesor DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS, codirector del proyecto por su excelente orientación, su sincera amistad y por la paciencia que tuvo durante el desarrollo del mismo.

Al Grupo de Investigaciones en Corrosión GIC, de la Universidad Industrial de Santander y a todos sus miembros, especialmente a los estudiantes de maestría Elkin Salinas y Laura Quiroz por su apoyo incondicional.

Al Dr. HUGO ARMANDO ESTUPIÑÁN DURAN y al MSc. EDDY RUIDIAZ MUÑOZ, asesores del proyecto, por las recomendaciones y excelentes aportes dados.

Al técnico Jairo de la Escuela de Ingeniería civil por la colaboración prestada en el desarrollo de la presente investigación.

Y a todas aquellas personas que de manera desinteresada brindaron su colaboración en la realización de este proyecto.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 CONCRETO	21
1.1.1 Cemento portland	21
1.1.2 Aditivos en el concreto	21
1.2 REFUERZO	22
1.2.1 Acero de refuerzo	22
1.2.2 Acero galvanizado	22
1.3 CONCRETO REFORZADO	23
1.4 CORROSIÓN DEL ACERO EN CONCRETO REFORZADO	24
1.4.1 Corrosión por penetración de cloruros	26
1.4.3 Corrosión por carbonatación	28
1.5 CARBONATACIÓN ACELERADA	30
1.6 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS APLICADAS A LOS CONCRETOS	31
1.6.1 Método de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)	32
1.6.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)	33
1.6.3 Pulso Galvanostático	34
1.6.4 Medidas del Potencial de Circuito abierto (OCP)	36
2. METODOLOGÍA	37
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	38
2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	38
2.2.1 Identificación de las muestras	40
2.3 EQUIPOS EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN	41
2.4 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	41
2.4.1 Cemento Portland tipo I	42
2.4.2 Agregados	42
2.4.3 Agua	42

2.4.4 Acero de refuerzo	42
2.5 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	43
2.5.1 Diseño de la mezcla	43
2.5.2 Elaboración de las probetas	44
2.5.3 Fraguado y curado de probetas	46
2.5.4 Carbonatación de las probetas	46
2.5.4.1 Determinación de la velocidad de carbonatación K	47
2.5.4.2 Exposición de los cilindros de concreto reforzados a ciclos de humectación/secado en ambiente de cloruros	49
2.6 ENSAYOS REALIZADOS	50
2.6.1 Pruebas de resistencia a la compresión	50
2.6.2 Pruebas de fenolftaleína	51
2.6.3 Pruebas electroquímicas	51
2.6.3.1 Celda electroquímica	52
2.6.3.2 Medidas de Potencial en Circuito Abierto (OCP)	53
2.6.3.3 Medidas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)	53
2.6.3.4 Medidas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)	54
2.6.3.5. Medidas de Pulso Galvanostático (PG)	54
2.7 INSPECCIÓN VISUAL	54
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
3.1 PRUEBA DE RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN SIMPLE	55
3.2 PRUEBAS DE FENOLFTALEÍNA	58
3.3 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS	60
3.3.1 Medidas de Potencial en Circuito Abierto (OCP)	61
3.3.2 Medidas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)	63
3.3.3 Medidas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)	66
3.3.3.1 Circuitos Eléctricos Equivalentes	68
3.3.4 Medidas de Pulso Galvanostático (GPM)	72
3.3.5 Comparación de los resultados obtenidos mediante las técnicas electroquímicas EIE, RPL y PG	77

3.4 INSPECCIÓN VISUAL	77
3.4.1 Características visuales	78
3.4.2 Tipos de daño por corrosión	81
4. CONCLUSIONES	86
5. RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	96

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tipos de Cemento Portland.	21
Tabla 2. Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa.	30
Tabla 3. Norma ASTM C876-91 (Vs. electrodo Cu/CuSO <sub>4</sub> ): Criterio de velocidad de corrosión	36
Tabla 4. Modelo de experimentos en pruebas electroquímicas.	39
Tabla 5. Relación de la cantidad de probetas fabricadas para las pruebas mecánicas y electroquímicas realizadas	40
Tabla 6. Equipos empleados en la experimentación.	41
Tabla 7. Materiales utilizados para la construcción de las probetas de concreto simple y reforzado	41
Tabla 8. Dosificación de las mezclas de concreto para 1 m <sup>3</sup> .	44
Tabla 9. Flujos obtenidos para aire y dióxido de carbono.	48
Tabla 10. Resultados ensayo de compresión.	56
Tabla 11. Profundidades y constante de carbonatación obtenidos para dos concentraciones de CO <sub>2</sub> a un mismo tiempo de exposición.	59
Tabla 12. Mediciones de Rp para los diferentes especímenes.	64
Tabla 13. Densidades de corriente de corrosión y velocidad de corriente obtenidas mediante mediciones de RPL para los diferentes especímenes.	65
Tabla 14. Registro de las características en inspección visual.	80
Tabla 15: Tipos de corrosión.	83

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de corrosión del acero embebido en concreto	25
Figura 2. Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo.	29
Figura 3. Grafica típica de la resistencia a la polarización.	32
Figura 4. Esquema de cálculo para la determinación de la constante de tiempo desde el decaimiento del potencial	36
Figura 5. Diagrama de Flujo de la metodología experimental.	37
Figura 6. Elaboración de las probetas.	45
Figura 7. Espécimen de prueba.	46
Figura 8. Proceso de curado.	46
Figura 9. Proceso de carbonatación.	49
Figura 10. Probetas en etapa de humectación y secado en solución salina de NaCl al 3.5% y 4.5%.	50
Figura 11. Ensayos de compresión.	51
Figura 12. Celda electroquímica	53
Figura 13. Profundidades de carbonatación obtenidos para dos concentraciones de CO <sub>2</sub> a un mismo tiempo de exposición.	59
Figura 14. Mediciones de Potencial a circuito abierto (OCP) Acero galvanizado y sin galvanizar.	62
Figura 15. Mediciones de Potencial a circuito abierto (OCP) de las probetas con refuerzo galvanizado.	63
Figura 16. Diagramas de Nyquist a 3% NaCl y de 35% de CO <sub>2</sub> , especímenes sin galvanizar parte A, especímenes galvanizados parte B.	67
Figura 17. Diagramas de Nyquist a 4% de NaCl y 65% de CO <sub>2</sub> , especímenes sin galvanizar parte A, especímenes galvanizados parte B.	67
Figura 18. Circuito eléctrico empleado para modelar el comportamiento electroquímico de una varilla de acero embebido en concreto.	68

Figura 19. Circuito eléctrico empleado para modelar el comportamiento electroquímico de una varilla de acero galvanizado embebido en concreto.	69
Figura 20. Valores de $R_p$ para los diferentes tipos de mezcla obtenidos mediante la simulación en el software Zview.	70
Figura 21. Densidades de corriente de corrosión obtenidas por EIE para los diferentes especímenes utilizando $B = 0,026$ V.	71
Figura 22. Pulso galvanostático para el primer tiempo de exposición (120 días).	73
Figura 23. Pulso galvanostático para el segundo tiempo de exposición (150 días).	73
Figura 24. Pulso galvanostático para el tercer tiempo de exposición (180 días).	74
Figura 25. $R_p$ obtenidos por la técnica de pulso galvanostático. Especímenes sin galvanizar	75
Figura 26. $R_p$ obtenidos por la técnica de pulso galvanostático. Especímenes con acero galvanizado.	76
Figura 27. Inspección visual del espécimen de pruebas en el $t_2 = 180$ días.	81

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Teoría Diagramas de Nyquist y Bode	96
Anexo B. Descripción de los equipos empleados durante la elaboración del proyecto.	99
Anexo C. Selección y caracterización de los materiales	103
Anexo D. Tablas Figuras y Resultados	107
Anexo E. Registro fotográfico de la inspección visual	120

## RESUMEN

**TÍTULO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DE UNA VARILLA DE ACERO GALVANIZADO EN CONCRETO REFORZADO CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE CLORUROS Y CARBONATOS**

**AUTORES:** ARCINIEGAS ESTEPA, Jully Andrea  
BARRAGÁN CÁRDENAS, Ana Yibe\*\*

**PALABRAS CLAVE:** concreto reforzado, acero galvanizado, corrosión, carbonatación, cloruros, técnicas electroquímicas.

**DESCRIPCIÓN:** La corrosión del refuerzo en el concreto conduce a la formación de grietas y reduce la vida útil de la estructura. La carbonatación después del ataque por cloruros es la segunda causa de corrosión del refuerzo en estructuras civiles. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la carbonatación y el ion cloruro en probetas con acero reforzado, galvanizadas y sin galvanizar para el respectivo análisis, a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos mediante técnicas electroquímicas tales como: LPR, EIS, Pulso Galvanostático, OCP.

Con una relación agua/cemento de 0.5, probetas con 28 días de curado en agua sal a una concentración de 3.5% y 4.5% de NaCl, y con un proceso de humectación y secado cada 24 horas, fueron sometidas a un proceso de carbonatación acelerada, esta prueba se llevó a cabo en un ambiente del 70 % de CO<sub>2</sub> y una Humedad Relativa entre 50 y 65 % a una temperatura de 25°C. Se evaluaron los cambios en el concreto reforzado debidos a la reacción de carbonatación y la penetración del ion cloruro, además de las técnicas electroquímicas mencionadas anteriormente, con el fin de obtener mayores resultados se realizaron pruebas de inspección visual, resistencia a la compresión, y ataque químico con fenolftaleína.

De acuerdo con los ensayos realizados se observa la influencia de la carbonatación, en la capacidad de penetración del ion cloruro a través de la matriz cementicia. Mediante el análisis de resultados electroquímicos, se observó la influencia directa de la concentración de cloruros y la concentración de carbonatos en las velocidades de corrosión, las cuales fueron controladas en el tiempo a través de mediciones de resistencia a la polarización mostrando una clara diferencia en el comportamiento de corrosión con refuerzo galvanizado y sin galvanizar.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil UIS. Director: Ricardo Cruz; Codirector: Dario Yesid Peña Ballesteros.

## SUMMARY

**TITLE:** \* EVALUATION ABOUT THE CORROSION BEHAVIOUR OF A GALVANIZED STEEL ROD IN REINFORCED CONCRETE WITH DIFFERENT CONCENTRATIONS OF CHLORIDE AND CARBONATE.

**AUTHORS:** ARCINIEGAS ESTEPA, Jully Andrea BARRAGÁN CÁRDENAS, Ana Yibe\*\*

**KEYWORDS:** reinforced concrete; galvanized steel; corrosion; carbonation; chloride; electrochemical techniques.

**DESCRIPTION:** Reinforcement corrosion in concrete, leads to the formation of cracks and reduces the useful life of the structure. After carbonation, chloride attack is the second cause of corrosion of reinforcement in civil structures. The objective of this research was to evaluate the effect of carbonation and chloride ion in test tubes with reinforced steel, galvanized and not galvanized for the respective analysis to different concentrations of chlorides and carbonates using electrochemical techniques such as LPR, EIS, Galvanostatic Pulse, and OCP.

With a water / cement ratio of 0.5, test tubes that had spent 28 days of curing in salt water at a concentration of 3.5% and 4.5% NaCl, and a process of humidification and drying each 24 hours, respectively, were subjected to a process of accelerated carbonation, this test was taken in an atmosphere of 70% CO<sub>2</sub> and a relative humidity between 50 and 65% at a temperature of 25 ° C. Changes in reinforced concrete were assessed due to carbonation reaction and chloride ion penetration. In addition to the electrochemical techniques mentioned before, in order to obtain better results, visual inspection, compressive strength, and attack with chemical phenolphthalein tests were taken.

According to the tests performed, it is appreciated the influence of carbonation in the chloride ion penetration ability through the cement matrix. By analysis of the electrochemical results, it was observed the direct influence of the chloride concentration and the concentration of carbonate in the corrosion rates, which were controlled in time through measurements of polarization resistance, showing a clear difference in the corrosion behavior between galvanized reinforcement and ungalvanized.

---

\*Grade Project.

\*\*Physicomechanical Engineering Faculty.Civil Engineering School UIS. Director: Ricardo Cruz; Codirector: Dario Yesid Peña Ballesteros.

## INTRODUCCIÓN

El concreto con acero de refuerzo es uno de los materiales de construcción más empleado en nuestros días debido a las bondades que presenta. Se creía que su vida útil era muy larga; sin embargo, existe un gran número de estructuras prematuramente deterioradas por corrosión del acero de refuerzo. La preocupación generada por este fenómeno, así como los grandes costos por mantenimiento o reemplazo que éste genera, ha motivado a diversos organismos a nivel mundial, a realizar estudios que los llevaron a determinar las causas, consecuencias, y alternativas de solución para combatir la corrosión en la infraestructura de concreto.

Es importante resaltar que la calidad y la duración de las estructuras de concreto reforzado dependen de la correcta evaluación y de un diagnóstico del problema basados en procedimientos adecuados de inspección. Varias empresas y consorcios a nivel mundial han venido trabajando consistentemente para documentar el tema. Sin embargo, al no existir un consenso sobre evaluaciones, las inspecciones se realizan de forma diferente causando en algunas ocasiones, reparaciones inadecuadas, generando excesivos costos en la rehabilitación de las estructuras sometidas a ambientes extremos de corrosión.

El deterioro de la infraestructura existente como; puentes, tuberías, tanques, edificios, canales, puertos, plantas de almacenamiento, aeropuertos, ferrocarriles, etc., es un problema serio en la actualidad que afecta no sólo a las dependencias responsables de ellas, sino que repercute indirectamente a la sociedad debido a que estas estructuras quedan inservibles tiempo antes de alcanzar el final de su vida útil de proyecto, y muchas de las veces se debe a que no se tiene un correcto diagnóstico de las condiciones que afectarán a la estructura a lo largo de su vida, como es el medio ambiente.

Una cantidad considerable de estructuras presentan problemas de corrosión, por penetración de cloruros, por carbonatación o ambos; estos problemas no se presentan en igual proporción en todas las estructuras, debido a que los problemas de corrosión en las estructuras dependen en gran medida al medio ambiente en las que se encuentran expuestas. Para ello en este proyecto se presentan diferentes tipos de técnicas electroquímicas, utilizadas para determinar la velocidad de penetración de la corrosión mediante el análisis del potencial y la densidad de corriente, con el fin de determinar el daño producido por la corrosión como tal, tanto en el refuerzo galvanizado y sin galvanizar como en la interface.

Este trabajo se fundamenta en el análisis del daño producido por cloruros y carbonatos en una estructura de concreto y su refuerzo, siendo nuestro objetivo principal precisamente evaluar la resistencia a la corrosión de una varilla de acero galvanizada embebida en concreto a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos.

Para llevar a cabo este trabajo es importante tener en cuenta el estudio de las variables tales como, concentración de cloruros, carbonatos y espesor del galvanizado, el cual es una pieza fundamental en la comparación frente a una varilla sin recubrimiento, además es importante identificar cuáles son las consecuencias a nivel de resistencia a la corrosión con la instalación de refuerzos con recubrimientos. Es por estos motivos que se plantean los siguientes objetivos que se irán desarrollando a lo largo de este proyecto:

- Determinar la corriente de corrosión de la varilla galvanizada embebida en concreto a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos.
- Determinar el tipo de daño en la varilla galvanizada y en la interface con el concreto a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos.
- Evaluar el daño por corrosión de una varilla galvanizada con respecto a una sin galvanizar a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 CONCRETO

El concreto es el producto resultante de la mezcla de un aglomerante (generalmente cemento, arena, grava o piedra triturada y agua), que al fraguar y endurecer adquiere una resistencia similar a la de las mejores piedras naturales. Las características del concreto dependen de la naturaleza del cemento y de la cantidad de agua utilizada.<sup>1</sup>

**1.1.1 Cemento portland.** Es un material aglomerante con propiedades de adherencia y cohesión, que le permiten unir fragmentos minerales para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuada.<sup>1</sup>

Tabla 1. Tipos de Cemento Portland.

CEMENTO	USO
TIPO I	Cemento de uso general.
TIPO II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente a los sulfatos.
TIPO III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado.
TIPO IV	Presenta calor de hidratación más bajo que el tipo III. Apto para uso masivo.
TIPO V	Alta resistencia a la acción de los sulfatos. (Aguas freáticas y domésticas).

Fuente: ASTM C150

**1.1.2 Aditivos en el concreto.** Un aditivo es definido por la Norma ASTM C- 125, como un material que no siendo agua, agregado, cemento hidráulico, o fibra de

---

<sup>1</sup> AGUILAR M. Rebeca. Determinación de la influencia de las Nano moléculas de Sílice en el Concreto frente a un factor que afecta su Durabilidad. Tesis para optar el Título en Ingeniería Civil en obras civiles, Universidad Austral de Chile. 2007.

refuerzo, es empleado como un ingrediente del concreto y es añadido a la tanda inmediatamente, antes o durante su mezclado.<sup>2</sup>

## 1.2 REFUERZO

Por lo general lo constituye el acero. Usualmente son barras de sección recta circular, con su superficie exterior rugosa, corrugada o lisa, para darle una mejor adherencia cuando se une al concreto, fabricadas de acuerdo con normas ICONTEC [NTC 2289- (ASTM 706M), NTC 4013 (ASTM A767M), NTC 161 (ASTM A615M)], el refuerzo se coloca en las formaletas antes de vaciar el concreto.<sup>3</sup>

**1.2.1 Acero de refuerzo.** El acero de refuerzo, es una aleación hierro-carbono, que generalmente tiene un acabado superficial en relieve llamado corrugado y se genera con fines técnicos de sismo resistencia.<sup>3</sup>

**1.2.2 Acero galvanizado.** El acero galvanizado es aquel que se obtiene luego de un proceso de recubrimiento de varias capas de la aleación de hierro y cinc. El recubrimiento galvanizado le otorga al acero una excelente protección, incrementando sus propiedades, entre las que se encuentra la gran resistencia a la abrasión, así como también a la corrosión. Esta última característica produce tres efectos.

El primero, denominado “protección por efecto de barrera” consta en la aislación frente a un medio ambiente que podría ser bastante agresivo. En segundo lugar, la “protección catódica o de sacrificio” es aquella en la que el cinc se comporta como

---

<sup>2</sup> TORRES C. Ana. Curso Básico de Tecnología del Concreto, Laboratorio de Ensayos de Materiales. Universidad Nacional de Ingeniería. 2004.

<sup>3</sup> RODRÍGUEZ S. William. Evaluación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto afectada por la acción de la corrosión en el refuerzo. Tesis de grado en la modalidad de investigación para optar al título de Ingeniero Civil, universidad industrial de Santander, 2009.

la parte anódica de la corrosión, de este modo, mientras haya recubrimiento de cinc el acero estará protegido.

Por último, la “restauración de zonas desnudas” se refiere a que la corrosión del cinc logra tapar aquellas discontinuidades que pueden existir en el recubrimiento a causa de la corrosión u otro tipo de daños, como por ejemplo, un golpe fuerte.

Por otra parte, el galvanizado aporta protección contra la corrosión atmosférica, que responde a las condiciones climáticas del lugar en la que la pieza de acero se encuentre ubicada, así como también contra los agentes contaminantes como el óxido de azufre y los cloruros típicos de las zonas cercanas a la costa. Otra de las protecciones que brinda el galvanizado guarda relación con el agua, tanto dulce, como de mar.

### **1.3 CONCRETO REFORZADO**

Se define al concreto reforzado como la unión entre concreto y acero; el concreto está compuesto básicamente por el agregado (arena y grava), cemento, agua y en algunos casos, aditivos; el acero que se utiliza depende en gran medida de las especificaciones de la estructura a construir; puede ser acero galvanizado, acero inoxidable o lo que se utiliza comúnmente: acero al carbón o de refuerzo.

La relación existente entre el concreto y el acero de refuerzo, se basa en que el concreto provee una protección tanto química como física en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero impidiendo que el acero continúe corroyéndose.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> LEE ORANTES, Francisco. Refuerzo-Protección en Estructuras de Concreto Dañadas por Corrosión, utilizando Fibras de Grafito como Protección Catódica. Tesis. Celaya, Gto., México.- 2005.

El concreto también funciona como una capa física protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) puedan despasivar al acero e iniciar su corrosión. Sin embargo, en un ambiente agresivo, agentes químicos como los cloruros o sulfatos del agua de mar, o el dióxido de carbono de un ambiente urbano, se pueden acumular en la superficie del concreto y lentamente se transporta a través del recubrimiento de concreto hasta llegar al acero.<sup>5</sup>

#### **1.4 CORROSIÓN DEL ACERO EN CONCRETO REFORZADO**

La corrosión es un proceso de deterioro que puede presentarse en cualquier material, identificándose más ampliamente en los metales y se define como: “La reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal, y su medio ambiente que produce un deterioro en sus propiedades” (ASTM G15-04). La corrosión es considerada un tributo que se paga a la naturaleza como consecuencia de obtener un material elemental para un uso específico (Genescá, 1996). Tal es el caso de la extracción de mineral de hierro y por proceso de “reducción” se obtiene hierro puro, que al combinarse con una pequeña cantidad de carbono forma el acero.

La corrosión se presenta como un proceso de oxidación (proceso opuesto al de reducción) en el cual el acero sólido se disuelve y forma compuestos porosos y de mayor volumen, que provocan daños en el concreto. En el medio ambiente existen diversos factores que pueden causar corrosión en el acero o promover las condiciones para que ésta se inicie.

Las causas más comunes de la corrosión del acero de refuerzo son la presencia de cloruros (Mays, 1992), y/o carbonatos. Es así en donde el Ion Cloruro, el cual

---

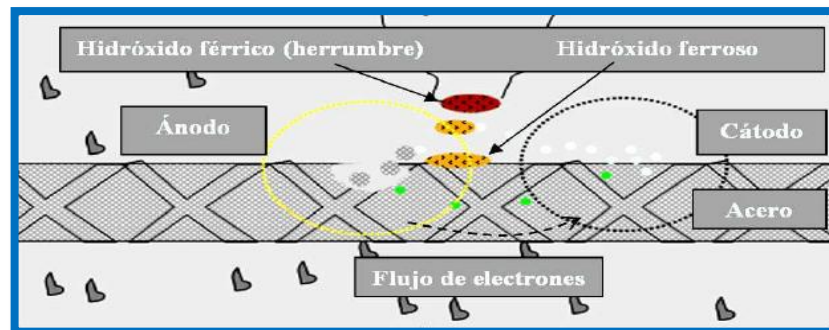
<sup>5</sup> TORRES ACOSTA, A. A.- Período de iniciación de la Corrosión (T1) en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino.- Revista Internacional Construlink (RCI).- V.2, No. 5, Construlink.- ISSN 1645-576.- 2004.

puede estar presente desde el proceso de amasado del concreto o incluirse por difusión desde el exterior en el concreto si la estructura se encuentra en un ambiente contaminado; estos iones llegan al refuerzo de acero, lo despasivan localmente y minimizan la protección que el concreto ofrece naturalmente al metal.

En cuanto a la carbonatación, que es considerada la reacción del dióxido de carbono atmosférico, con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto; reacciona produciendo una pérdida de la alcalinidad, es decir, una disminución considerable del pH, y por tanto, la aparición del frente carbonatado (zona neutralizada), que al entrar en contacto con el acero, ocasiona una despasivación generalizada.

La corrosión que se presenta en el acero de refuerzo en concreto es electroquímica y consta de los mismos elementos con las siguientes consideraciones. Zona anódica y catódica; son parte del acero de refuerzo, conductor eléctrico; es el acero de refuerzo y conductor iónico; es la solución existente en los poros del concreto. Esquemáticamente la corrosión del acero de refuerzo se presenta en la figura 1. Debido a que la corrosión en el acero de refuerzo es electroquímica se puede monitorear de forma no destructiva con las diferentes técnicas electroquímicas existentes.

Figura 1. Proceso de corrosión del acero embebido en concreto



Fuente: Guzmán G. OMAR, Influencia del agrietamiento del concreto en la corrosión del acero de refuerzo, 2008.

**1.4.1 Corrosión por penetración de cloruros.** La penetración de cloruros se produce cuando se dan diferencias de concentración entre dos puntos, lo que resulta ser el mecanismo de difusión en estructuras completamente sumergidas o en contacto permanente con agua de mar. En cambio, en zonas aéreas o sometidas a la acción de las mareas o salpicaduras se producen ciclos de humedad y secado, que dan lugar a mecanismos más rápidos de penetración de cloruros, ya que además de la difusión aparecen fenómenos de absorción capilar que conducen a difusividades más elevadas.<sup>6</sup>

La porosidad del concreto es sin duda un factor crucial en todos estos fenómenos, ya que la penetración será más rápida cuando la porosidad del recubrimiento resulte ser mayor. Así, a bajas relaciones a/c y relativamente altos contenidos en cemento, dan una cierta garantía de lentas velocidades de penetración de los cloruros. El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros es otro de los parámetros relevantes del proceso.<sup>7</sup>

La segunda ley de Fick es la más utilizada actualmente para determinar los coeficientes de difusión de cloruros **D** en estructuras reales y en laboratorio, con el fin de hacer predicciones.<sup>8</sup> Sin embargo, cada vez aparecen más datos que señalan las limitaciones que presenta esta ecuación y que se manifiesta especialmente en la escasa relación entre los resultados de laboratorio y los de estructuras reales. La posible causa de estas limitaciones puede tener varias justificaciones:<sup>9</sup>

---

<sup>6</sup> MENA FERRER, Manuel.- Durabilidad de Estructuras de Concreto en México.-IMCYC.- Primera Edición.- México.- 2005. p. 31-32

<sup>7</sup> VÁZQUEZ, Marcela y FERNÁNDEZ, Raúl. Revistas Ciencia Hoy en Línea.- Volumen 14- Nº.82.- Mar de Plata, Argentina.- Agosto-Septiembre 2004.

<sup>8</sup> TROCÓNIS DE RINCÓN, Oladis y miembros de la Red DURAR. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.- CYTED. Tercera Edición.- Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000. p. 13-14

<sup>9</sup> TROCÓNIS DE RINCÓN, Oladis. Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto, Proyecto XV.3, DURACON Documento 1.-CYTED.- Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000.

- ✓ Que los ensayos de laboratorio no reflejen la realidad debido a que el coeficiente de difusión no sea constante, sino que disminuya con el tiempo.
- ✓ Que el límite de cloruros para despasivar la estructura sea mucho más elevado que el que consideran las normas (0.4% respecto al peso de cemento).<sup>10</sup>
- ✓ La hipótesis de las condiciones de contorno que llevan a la solución a través de la función error (**erf[x]**) no sean las apropiadas y sea necesario utilizar otro tipo de condiciones. Como, por ejemplo:
  - a) Que contemplen el hecho de que la superficie del concreto tiene una composición distinta al concreto interior (efecto piel), haciendo significativamente diferente la difusividad (**D**) en ambas zonas
  - b) La variación del contenido de cloruros en la superficie (**Cs**) con el tiempo, principalmente por el lavado de lluvias
  - c) Cómo varía el coeficiente **D** con la concentración de cloruros
  - d) Cómo afecta el envejecimiento del concreto (hidratación)
  - e) Cómo varía con el tipo de cemento
  - f) Las condiciones climáticas de entorno de la estructura

En cuanto al límite de cloruros que puede generar la despasivación de la armadura, se acepta como valor límite en el agua de amasado del concreto el 0.4% en peso de cemento,<sup>11</sup> o una relación  $Cl-/OH = 0.6$ , si se trata de cloruros que penetran desde el exterior.<sup>6</sup> De los escasos estudios realizados se origina una gran dispersión, incluso ante condiciones aparentemente idénticas. Se han identificado varios factores que pueden afectar a la no existencia de un valor único de umbral de cloruros para producir la despasivación de la armadura.<sup>12,13</sup>

---

<sup>10</sup> HELENE, Paulo y PEREIRA, Fernanda. Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección.-CYTED.-Brasil.-Septiembre 2003. p.46.

<sup>11</sup> COMITÉ EUROPÉEN DU BETON. Design Guide to Durable Concrete Structures.Thomas Therford Publishers. - G.9. - 1992.

<sup>6</sup> MENA FERRER, Manuel, Op. Cit., p.

<sup>12</sup> HANSSON C.M. Concrete: The Advances Industrial Material of the 21st Century. Metallurgical and Materials Transactions A. Vol. 26 A. - EUA. - 1995.

1. Tipo y contenido en cemento
2. Estado superficial del acero
3. Porosidad del concreto
4. Temperatura
5. Potencial electroquímico que presenta la estructura
6. Velocidad de penetración de **Cl<sup>-</sup>** (adicionados, penetración)
7. Características y espesor de la capa pasivante
8. Condiciones meteorológicas predominante en el área de Entorno.

Algunos de estos factores son difícilmente controlables en forma aislada, lo que finalmente conduce a que el estudio deba llevarse a través de tratamientos estadísticos que permitan definir los rangos de variación, según alguno de los factores descritos.

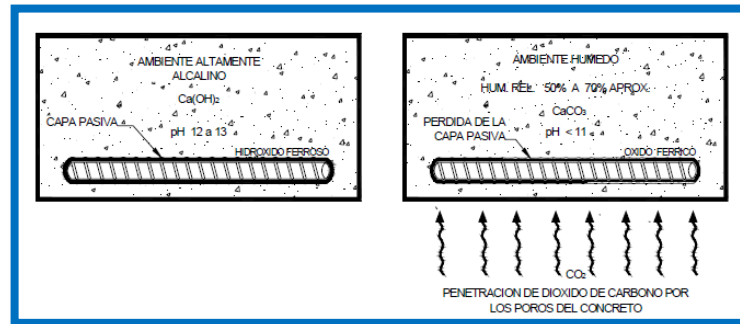
**1.4.3 Corrosión por carbonatación.** Por otra parte, la pérdida de alcalinidad del concreto denominada como carbonatación también es un problema que actualmente afecta a muchas estructuras, este fenómeno ocurre cuando el dióxido de carbono **CO<sub>2</sub>** reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte al hidróxido de calcio **Ca (OH)<sub>2con</sub>** un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio **CaCO<sub>3</sub>** que tiene un pH menos alcalino<sup>6</sup> (ver figura 2). El hidróxido de calcio, iones de sodio (**Na**) y potasio (**K**) por su alta alcalinidad, forma en el acero de refuerzo embebido en el concreto una capa pasiva de hidróxido de hierro **Fe (OH)<sub>2</sub>**, que lo cubre y protege de la corrosión. La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, la que al descender ante

---

<sup>13</sup> CASTRO BORGES, Pedro. El umbral de los cloruros para despasivar el acero de refuerzo, Criterios y resultados en el mundo. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Revista Construcción y Tecnología. México. Enero 2001.

la presencia de dióxido de carbono en el concreto, el acero pierde su capa pasiva, se considera un pH menor a 11 para que se inicie este efecto.<sup>14</sup>

Figura 2. Proceso de carbonatación del concreto con acero de refuerzo.



Fuente: Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos, publicación técnica 292, 2006.

Los factores que afectan la carbonatación son: el contenido de humedad; el contenido de  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$  en el ambiente atmosférico y la permeabilidad del concreto. El contenido de humedad relativa ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70% aproximadamente;<sup>15</sup> a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono (ver tabla 2).

<sup>14</sup> FRANCOIS R. y ARLIGUIE G. Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environment. ACI SP-145. American Concrete Institute. EUA. 1994

<sup>15</sup> TUUTTI, K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Suecia. 1982.

Tabla 2. Proceso de carbonatación en relación con la humedad relativa.

Humedad Relativa % (HR)	Proceso de Carbonatación
HR > 70%	Evita el ingreso de CO <sub>2</sub>
50% < HR < 70%	Avanza rápidamente
HR < 50 %	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO <sub>2</sub>

Fuente: Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos, publicación técnica 292, 2006.

El contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar ya que existen grandes diferencias en una zona urbana a una zona rural, siendo mayores en la primera; aunque para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto, se requiere una pequeña cantidad de concentración de CO<sub>2</sub>, que normalmente se encuentra en la atmósfera, que está en el rango de 0.03%.<sup>16</sup>

La permeabilidad del concreto es otro factor que se debe controlar, ya que un concreto muy permeable se carbonatará rápidamente, por tener poca resistencia a la penetración de los fluidos. Para obtener un concreto poco permeable son necesarios agregados de buena calidad, una pasta de cemento con relación agua/cemento baja, e inclusión de puzolanas.<sup>17</sup>

## 1.5 CARBONATACIÓN ACELERADA

El proceso de carbonatación es un proceso ya bastante lento cuya velocidad se acentúa con el tiempo, pues requiere de años de exposición al CO<sub>2</sub> y al medio

<sup>16</sup> MONTANI, Rick. La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Revista Construcción y Tecnología. México. Diciembre 2000.

<sup>17</sup> ACI Comité 222. Informe 222R. Protection of Metals in Concrete against Corrosion. American Concrete Institute. EUA. 2002

ambiente para que exista un daño suficiente que inicie el proceso de corrosión por carbonatación, de ahí que para poder realizar experimentación y determinar las características de concretos carbonatados en el laboratorio, se ha venido implementando un proceso de carbonatación acelerada.<sup>18</sup>

La carbonatación acelerada empleando mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> es una práctica común en la mayoría de laboratorios, por lo que existen muchas dudas sobre la validez de las pruebas de carbonatación acelerada que permitan extrapolar resultados a condiciones naturales. Lo anterior, principalmente debido a que la micro-estructura existente de las pastas carbonatadas que emplean CO<sub>2</sub> puro, es diferente de aquellas pastas aero- carbonatadas (Suzuki et al., 1989; Groves et al., 1991; Bier et al., 1989; Sergi, 1986; Verbeck, 1958; Sanjuan et al., 2003; Catellote (a) et al., 2008), incluso las cantidades resultantes de material carbonatado aumenta cuando se incrementa la concentración de CO<sub>2</sub> (Castellote (a) et al. 2008).

## **1.6 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS APLICADAS A LOS CONCRETOS**

La estimación del estado de corrosión de la armadura metálica<sup>19</sup> se puede estudiar colocando muestras en diferentes condiciones de temperatura, concentración salina e intemperie, y analizar el estado superficial de las varillas. Estos ensayos requieren períodos de tiempo prolongados y es indispensable remover la cubierta de concreto de la varilla, siendo una prueba destructiva. Por esto, el uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio del acero de refuerzo embebido en concreto mediante señales eléctricas y el análisis de la respuesta del sistema, las cuales tienen como ventaja la rapidez de medición y sensibilidad. Además de ser pruebas no destructivas, cada una de ellas aporta

---

<sup>18</sup> DEL VALLE, Angélica et al. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001.

<sup>19</sup> HLADKI, K.; CALLOW, L. & LAWSON, J. L. Corrosion rates from impedance measurements: an introduction. British Corrosion Journal Vol. 15, 1980; p. 20-25

información acerca de las condiciones de la interfaz acero-concreto y con ello del grado de corrosión que se presente en la armadura. Entre las más utilizadas se encuentran:

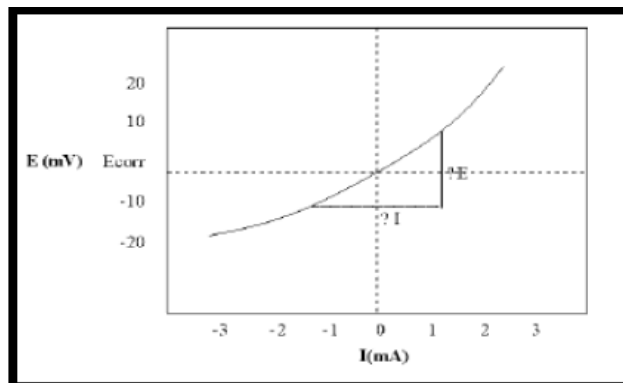
**1.6.1 Método de Resistencia a la Polarización Lineal (PRL).** Es una técnica que proporciona un método más exacto con respecto a técnicas como por ejemplo el pulso galvanostático (sin decir que esta no sea una buena técnica), para determinar la velocidad de corrosión. El método PRL se basa en la aplicación de una corriente, seguido de un monitoreo de potencial o una aplicación de un potencial específico seguido de un monitoreo de corriente, ver figura 3. En cada experimento se obtienen datos variando el potencial alrededor del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) en un rango de  $\pm 25$  mV, para no salirse de la región lineal de Tafel y una velocidad típica de barrido de 0,1mV/s. Para calcular la velocidad de corrosión usando el método de PRL, se calcula primero  $i_{corr}$  con la ecuación (1), la cual está basada en la relación de Stern-Geary (ecuación 2).

$$I_{Corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 R_p (\beta_a \pm \beta_c)} \quad (1)$$

$$I_{Corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

Aquí  $R_p$  es la resistencia a la polarización, en  $2 \Omega.cm$ , y  $A \beta$  y  $C \beta$  son constantes de Tafel.

Figura 3. Grafica típica de la resistencia a la polarización.



Fuente: [http:// metalurgia y corrosión electroquímica.htm](http://metalurgia-y-corrosion-electroquimica.htm)

**1.6.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE).** Este método proporciona amplia información ya que permite deducir el comportamiento de la interfaz metal-solución. Es una técnica de corriente alterna, con la ventaja de cubrir varios órdenes de magnitud en frecuencia (desde altas, MHz hasta muy bajas,  $\mu\text{Hz}$ ). Al variar la frecuencia de una señal senoidal de potencial, la corriente circula por la interfaz. Haciendo la analogía del circuito eléctrico, el flujo de corriente pasa a través de los diferentes elementos del circuito, que tienen una respuesta en impedancia ( $Z$ ) y ángulo de fase ( $\theta$ ) característicos. Esta técnica alcanzó gran aceptación por su característica de señales en función de la frecuencia, lo que permite analizar un sistema de alta impedancia y sus componentes.<sup>20</sup>

La técnica de impedancia es una herramienta eficaz que ha mostrado ser de gran utilidad. La corriente alterna tiene como ventaja ser función del tiempo y frecuencia. La analogía con la corriente directa se da como un límite en el que la frecuencia es cero.

Siguiendo la ley de Ohm:

$$R = V / I \quad (3)$$

En corriente alterna, se tiene la ecuación:

$$Z = V (W) / I (W) \quad (4)$$

$Z$  es la impedancia del circuito,  $V (w)$  es el potencial como función de la frecuencia e  $I (w)$  es la corriente como función de la frecuencia. Cuando se aplica una señal de voltaje en corriente alterna, se obtiene una respuesta en corriente de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$V = V_{\max} * \sin (wt) \quad (5)$$

---

<sup>20</sup> BARD, A, J. Electrochemical Methods. Fundamentals and applications, John Wiley & Sons 2002. Ibíd.

$$I = I_{\max} \sin (wt + \theta) \quad (6)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de fase y es muy útil para aproximar las características de los elementos eléctricos a diferentes frecuencias.

En el anexo A se muestran los Diagramas de Nyquist (A.1) y Bode (A.2). Para el diagrama de Nyquist, la magnitud del componente real de impedancia se incrementa cuando se aleja del origen y los puntos de alta frecuencia se localizan cerca del origen de la gráfica, mientras que los puntos de baja frecuencia corresponden a un incremento en magnitud de los componentes de impedancia.<sup>20</sup>

**1.6.3 Pulso Galvanostático.** El potencial de respuesta de un sistema electroquímico,<sup>21</sup> aproximado por un circuito simple tipo Randles (circuito usado para interpretar la respuesta del pulso en los concretos en forma simplificada), para un paso de corriente  $\Delta I$  está dado por la ecuación (7):

$$\eta T = \Delta I R_{\Omega} \pm \Delta I R_p \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{CR_p}\right)\right) \quad (7)$$

Donde  $\eta_T$  es el cambio total en el potencial del electrodo de trabajo,  $\Delta I R_{\Omega}$  es la caída óhmica en el concreto entre el electrodo de referencia (RE) y el electrodo de trabajo (WE),  $\Delta I R_p$  es la polarización efectiva para un gran tiempo de carga,  $R_p$  es la resistencia a la polarización de las barras de acero (p.e.j. la razón  $\Delta E / \Delta I$  entre la respuesta y la señal eléctrica),  $C$  es la capacitancia de la doble capa del metal y  $CR_p$  es la constante de tiempo  $\tau$  para el proceso de corrosión.

Una vez la corriente es interrumpida, la carga adquirida por la doble capa es usada gradualmente en la reacción de corrosión. Si no es aplicada una corriente

---

<sup>21</sup> GONZÁLEZ, J.A. On-site determination of corrosion rate in reinforced concrete structures by use of Galvanostatic pulses. Corrosion Science Vol. 43, 2001; p. 611-625.

más adelante, entonces el potencial decae exponencialmente con el tiempo, esto es (ec. 8):

$$\frac{\eta_t}{\eta_{\max}} = \exp\left(-\frac{t}{CR_p}\right) \quad (8)$$

Donde  $\eta_{\max}$  es la polarización máxima para el tiempo cuando la corriente es interrumpida, y  $\eta_t$  es la polarización para un tiempo  $t$  desde la interrupción de la corriente. Un análisis de la ecuación (8) proporciona un procedimiento para calcular  $R_p$  este se basa en las medidas directas de la constante de tiempo para el proceso de corrosión. De la ec. (8), se infiere las ecuaciones 9, 10 y 11.

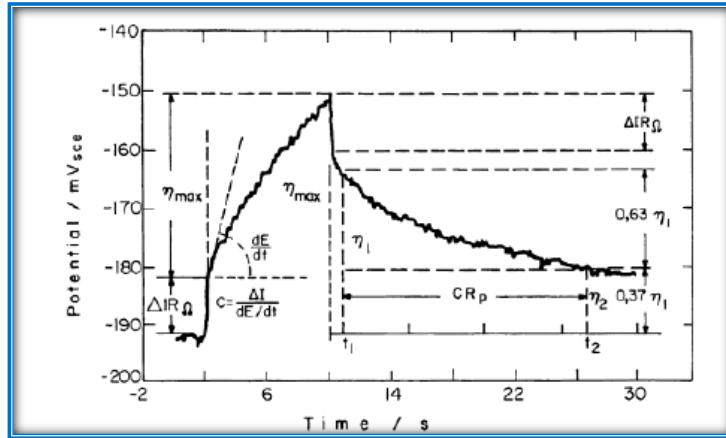
$$\frac{\eta_t}{\eta_2} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{CR_p}\right) \quad (9)$$

$$Y, \text{ para } \Delta t = CR_p \quad (10) \quad \frac{\eta_t}{\eta_2} = \exp(-1) \approx 0.37 \quad (11)$$

Por lo tanto, la constante de tiempo para el proceso de corrosión  $\tau = CR_p$ , puede ser determinada directamente midiendo el intervalo de tiempo necesario que requiere  $\eta_t$  para caer al 37% del valor inicial  $\eta_{t1}$  para el 63% de haber ocurrido la caída (Figura 4).

La ventaja de estos parámetros escogidos, en cuanto al cumplimiento del objetivo de la investigación, están relacionados con la siguiente explicación: Un conocimiento de  $\tau$  permite calcular  $R_p$ , contando de antemano con el valor de la capacitancia ( $C_{dl}$ ) obtenida por ajuste de circuitos en datos de pulso por unidad de área. Insertando el valor de  $R_p$  en la ecuación de Stern-Geary (ecuación 2) permite encontrar la densidad de corriente de corrosión por unidad de área:  $i_{\text{corr}}$ .

Figura 4. Esquema de cálculo para la determinación de la constante de tiempo desde el decaimiento del potencial



Fuente: GONZÁLEZ, J.A. et al. Op. Cint. p. 613.

**1.6.4 Medidas del Potencial de Circuito abierto (OCP).** Es la técnica electroquímica más simple<sup>22</sup> (sin querer decir con esto que sea la menos fiable) y de mayor facilidad de manejo. Aunque la medida de un potencial electroquímico no aporta información cuantitativa sobre la velocidad de corrosión, ofrece indicaciones cualitativas que pueden complementarse con otros ensayos. El procedimiento para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto está contenido en la Norma ASTM C876-91, la cual establece criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Norma ASTM C876-91 (Vs. electrodo Cu/CuSO<sub>4</sub>): Criterio de velocidad de corrosión

Probabilidad de corrosión para $E_{corr}$ según ASTM C876-91 (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	
Más positivo que -200 mV	10%
Entre -200 y -350 mV	No hay criterio (50%).
Más negativo que -350 mV	90%

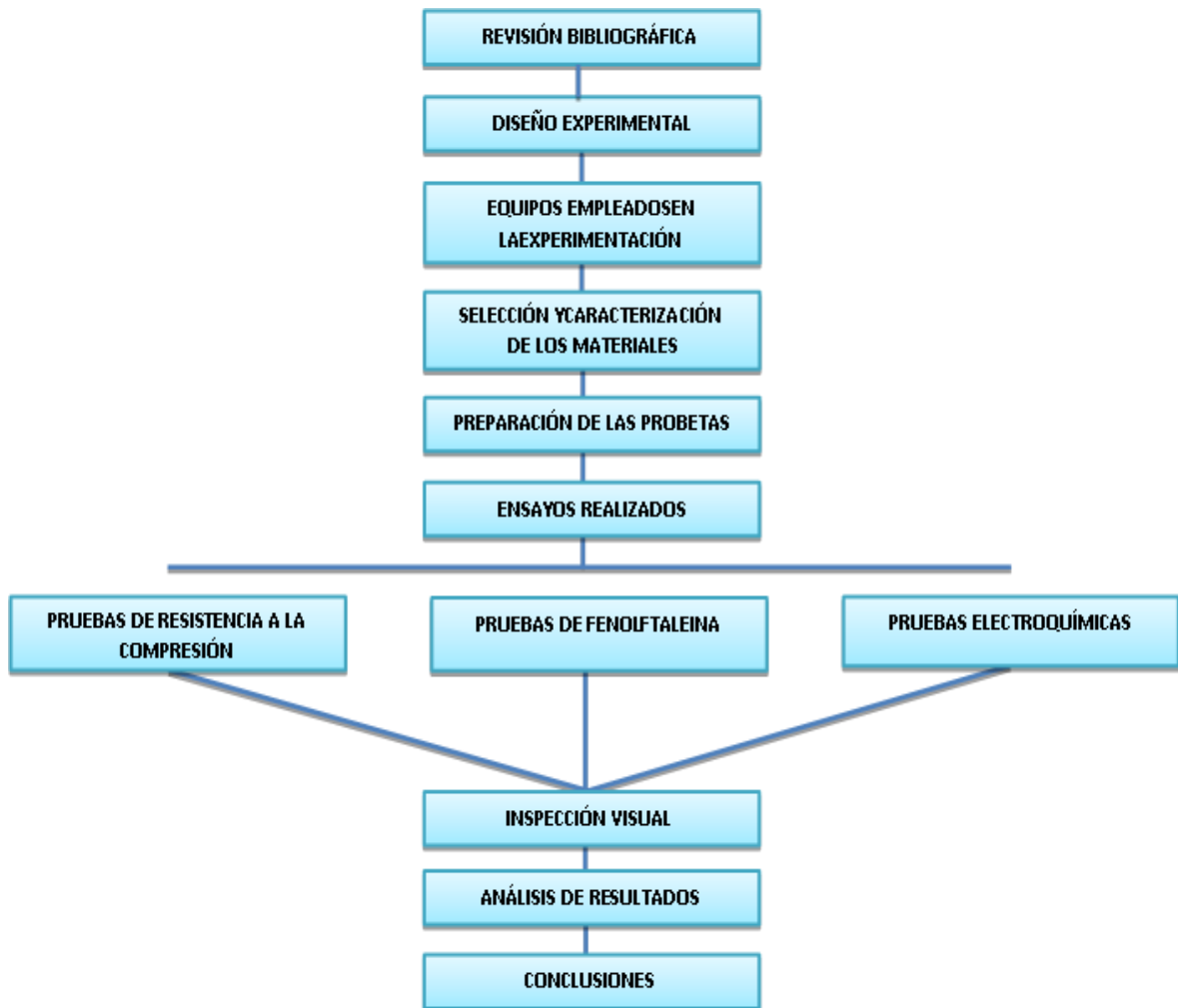
Fuente: ASTM C876-91

<sup>22</sup> ASTM C876-91. Standar test method for half-cell potentials of reinforcing steel in concrete. Philadelphia, EE.UU, 1992. 12 p.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo en la presente investigación se ha planteado con el fin de realizar la evaluación del comportamiento a la corrosión de una varilla de acero galvanizado y sin galvanizar en concreto reforzado con una relación agua/cemento de 0.5 a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos, por medio de técnicas electroquímicas.

Figura 5. Diagrama de Flujo de la metodología experimental.



Fuente: Autores del proyecto.

El desarrollo experimental adoptado se encuentra dividido en fases como se indica en el diagrama de flujo de la figura 5. Una descripción detallada de cada una de las fases y sus respectivas etapas se encuentra a continuación:

## **2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En esta etapa del trabajo se recopiló la información y revisión bibliográfica necesaria para el desarrollo de este proyecto, Para este fin se recurrió a los diferentes medios, libros, revistas, artículos, normas técnicas, trabajos de grado, bases de datos, investigaciones y la interacción de información con el grupo de investigación en corrosión de la UIS (GIC).

## **2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL**

Se fabricaron probetas de concreto reforzado con una a/c de 0.5 considerando tres variables: dos tipos de refuerzo (acero galvanizado y sin galvanizar), dos concentraciones de CO<sub>2</sub> (35% y 65%) y dos concentraciones de NaCl (3% y 4%).

Para evaluar la influencia de cada variable independiente y la interacción entre ellas con su variable dependiente (Velocidad de corrosión) se elaboró un diseño experimental de 2<sup>3</sup> (ver tabla 4) para los ensayos de corrosión (pruebas electroquímicas), a tres tiempos dando como un total de 24 probetas de concreto reforzado, lo cual permitió con un número mínimo de ensayos obtener la máxima información posible sobre el proceso estudiado, y así poder realizar la experimentación requerida.

Tabla 4. Modelo de experimentos en pruebas electroquímicas.

RANGO	NOMENCLATURA	VARIABLES		
		ESPESOR (galvanizado)	CARBONATOS	CLORUROS
MÍNIMO	0	0 micras	35%	3%
MÁXIMO	1	100 micras	65%	4%

ENSAYOS	ESPESOR (galvanizado)	CARBONATOS	CLORUROS
1	0	0	0
2	0	1	1
3	0	1	0
4	0	0	1
5	1	1	1
6	1	0	0
7	1	0	1
8	1	1	0

Fuente: autores del proyecto.

Además se fabricaron 33 probetas de concreto sin refuerzo, sometidas a diferentes concentraciones de carbonatos  $\text{CO}_2$  y cloruros  $\text{NaCl}$ , de las cuales 27 fueron sometidas a pruebas de compresión y las seis restantes para ensayos de fenolftaleína. Para un total de 57 probetas fabricadas en el desarrollo de este trabajo. (Ver tabla 5).

Tabla 5. Relación de la cantidad de probetas fabricadas para las pruebas mecánicas y electroquímicas realizadas

ENSAYO	CANTIDAD DE PROBETAS (N°)									CANTIDAD TOTAL DE PROBETAS
	Refuerzo			Concentración de carbonatos			Concentración de cloruros			
	Sin refuerzo	Sin galvanizar	Galvanizado	0%	35%	65%	0%	3%	4%	
Compresión	27	-	-	3(3)	3(3)	3(3)	3(3)	3(3)	3(3)	27
Fenolftaleína	6	-	-	1(2)	1(2)	1(2)	1(2)	1(2)	1(2)	6
Electroquímicas	-	4(3)	4(3)	-	4(3)	4(3)	-	4(3)	4(3)	24

Fuente: autores del proyecto.

**2.2.1 Identificación de las muestras.** Para la identificación de los diferentes tipos de muestras de concreto se utilizó la nomenclatura presentada a continuación:

- **1, 2 y 3** dependiendo del número de réplica.
- **A** espécimen con refuerzo, acompañado del **0** si el refuerzo esta sin galvanizar y con un **1** si este está galvanizado.
- **B** espécimen sometido al proceso de carbonatación durante 10 días, acompañado de un **0** si el porcentaje de CO<sub>2</sub> es de 35% y de un **1** si es de 65%.
- **C** espécimen contaminado por cloruros en el momento de su fabricación, acompañado de un **0** si el porcentaje de NaCl es de 3% y de un **1** si es de 4%.
- **D** espécimen para pruebas de compresión.
- **E** espécimen sin contaminación de CO<sub>2</sub>.
- **F** espécimen para pruebas de fenolftaleína.
- **G** espécimen sin contaminación de NaCl.

### 2.3 EQUIPOS EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

Los equipos empleados para la realización de los ensayos en la presente investigación están referenciados en la tabla 6 y una descripción detallada se encuentra en el ANEXO B.

Tabla 6. Equipos empleados en la experimentación.

EQUIPO	ENSAYOS
Máquina de resistencia a la compresión (AMSLER)	Ensayos de compresión
Cámara de carbonatación	Carbonatación de las probetas
Balanza electrónica (Mettler PB 3002)	Peso de materiales
Potenciostato GAMRY	Ensayos electroquímicos
Eléctrodo cobre – sulfato de cobre (Cu/CuSO <sub>4</sub> ).	Ensayos electroquímicos

Fuente: Los autores de proyecto

### 2.4 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Los materiales empleados para la fabricación de las probetas de concreto a las cuales se le realizaron los ensayos de compresión, fenolftaleína y electroquímicos, se pueden ver en las tabla 7.

Tabla 7. Materiales utilizados para la construcción de las probetas de concreto simple y reforzado

MATERIALES	ESPECÍMENES DE CONCRETO SIMPLE	ESPECÍMENES DE CONCRETO REFORZADO
Cemento	X	X
Agua	X	X
Grava	X	X
Arena	X	X
Aditivo (contaminante) NaCl	X	X
Acero de 3/8"		X
Acero de 3/8" galvanizado		X

Fuente: Los autores de proyecto

**2.4.1 Cemento Portland tipo I.** Este material fue adquirido en Cemex Colombia S.A, Planta Bucaramanga, bajo el nombre comercial de Cemento Diamante. Los análisis químicos y físicos fueron realizados y a su vez, suministrados por el fabricante y están relacionados en la figura 36 en el anexo C.1, donde se observa que dicho material cumple con los requisitos obligatorios por las normas NTC 121 y NTC 321.

**2.4.2 Agregados.** Como agregado fino, para la preparación de las probetas de concreto con y sin refuerzo, se empleó arena de río, y como agregado grueso, se empleó grava. La caracterización de los agregados se realizó en el Centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander. Los análisis realizados a los materiales con base en las normas ICONTEC 77, ICONTEC 176 e ICONTEC 237<sup>23</sup> se muestran en él la tablas 16, 17 y 18 del anexo C, los cuales demostraron que cumplen con todos los requisitos para la fabricación de concreto, estipulados en la norma ASTM C192 (Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory).

**2.4.3 Agua.** El agua utilizada para la fabricación del concreto fue agua potable suministrada por el acueducto de Bucaramanga, bajo los requisitos de la norma ASTM C 94. En la tabla 19 en el anexo C.3, se relaciona su análisis químico, el cual es realizado por la misma empresa.

**2.4.4 Acero de refuerzo.** Como electrodo de trabajos o acero de refuerzo del concreto, se utilizó varilla de hierro No 3, (db3/8”), con un  $f_y = 420$  MPA. Este acero de refuerzo fue utilizado en 12 de las 24 probetas de concreto reforzado fabricadas, colocándose 3 muestras (utilizando una como electrodo de trabajo y los otros dos como contra-electrodos) de 20 cm de longitud (de los cuales 16 cm

---

<sup>23</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Bogotá: ICONTEC.2p.II. y 2p.II. 1995.

esta embebido en concreto), colocadas de forma simétrica a 1.5 cm de recubrimiento.

Para las 12 especímenes restantes elaboradas en la presente investigación se utilizó el mismo tipo de acero, pero sometido a un proceso de galvanización por inmersión en caliente con un recubrimiento de 100  $\mu$  (realizado en la empresa OISA S.A ubicada en la ciudad de Bogotá), considerándose este como el mejor procedimiento de protección del acero frente a la corrosión.

Vale destacar que el galvanizado es el resultado de un proceso físico-químico que consigue una verdadera unión entre el hierro (metal base) y el cinc, logrando de este modo que el material férreo adquiera unas propiedades superficiales equivalentes a las del cinc, lo que conlleva a una mejor resistencia frente a determinados medios corrosivos con las características mecánicas del material base.

## **2.5 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS**

Para la realización de esta fase, se tuvo en cuenta las recomendaciones dadas por Sánchez de Guzmán.<sup>24</sup>

**2.5.1 Diseño de la mezcla.** El diseño de la mezcla de concreto se realizó siguiendo las recomendaciones de las notas técnicas de Tecnoconcreto S.A, empleando la relación presentada en la tabla 8, para obtener las proporciones de los materiales, partiendo de las relaciones agua/cemento (a/c) escogida con anterioridad (0.5) con una resistencia de 28 Mpa, de acuerdo con su uso a nivel industrial. Se tiene que para fabricar un 1 m<sup>3</sup> de concreto, de relación a/c = 0.5, las cantidades a emplear se relacionan en la Tabla 8:

---

<sup>24</sup> SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. "Tecnología del concreto y del mortero". Bhandar Editores LTDA. 3ra Ed. Bogotá DC, Colombia. 1996.

Tabla 8. Dosificación de las mezclas de concreto para 1 m<sup>3</sup>.

MATERIALES	PROPORCIONES (Kg/m <sup>3</sup> )
Cemento	525
Arena	787
Grueso	787
Agua	262,5

Fuente: autores del proyecto.

Con base en la anterior relación se desarrollaron los cálculos de las proporciones necesarias para la fabricación de las 57 probetas utilizadas en la presente investigación, teniendo en cuenta las dimensiones requeridas: Diámetro: 7,5 cm; longitud: 15 cm.

**2.5.2 Elaboración de las probetas.** Las probetas fueron fabricadas en el Centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander. Para la elaboración de los especímenes se utilizaron moldes de PVC cilíndricos de 15 cm de longitud por 7.5 cm de diámetro.

Después de definir el número total de probetas se estableció que se realizarían paulatinamente, es decir se prepararía mezcla solo para 12 probetas y no para todas al mismo tiempo, ya que era necesario contaminar la mezcla de concreto con dos concentraciones de NaCl diferentes 3% y 4%, tanto para probetas con refuerzo como para las usadas en los ensayos de compresión y fenolftaleína. A parte se realizó la mezcla para los especímenes sin contaminación.

El procedimiento inició con el peso en una balanza analítica de cada uno los ingredientes de la mezcla, una vez pesados los componentes se realizó la limpieza de los moldes plásticos y un humedecimiento interno con ACPM para facilitar el desencofrado.

La fabricación del concreto empezó mezclando uniformemente el agregado fino con el cemento, una vez lista la mezcla de estos dos ingredientes se abre un espacio centrado y de forma circular dentro de ella con el fin de ubicar el agregado grueso y el agua (previamente contaminada con cloruros a 3% y 4% dependiendo el tipo de mezcla deseada), finalmente con la ayuda de herramientas se combinan todos los ingredientes hasta obtener un concreto consistente y homogéneo, para luego proceder a agregar la mezcla al molde en tres capas, con el fin de compactarla (25 golpes en cada capa, según la norma ICONTEC 92) ver figura 6.

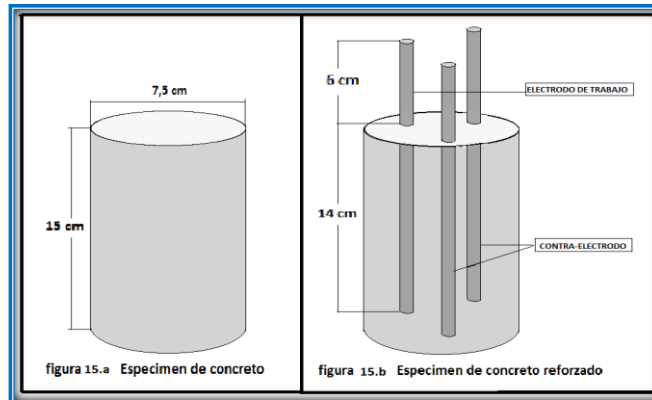
Figura 6. Elaboración de las probetas.



Fuente: autores del proyecto

Para finalizar se embebieron los contra-electrodo y el electrodo de trabajo (acero galvanizado o sin galvanizar, dependiendo del tipo de espécimen) en la mezcla de concreto, tanto el electrodo de trabajo como los contra-electrodo se ubicó de manera simétrica en la probeta de concreto, asegurándose que todos tuvieran un recubrimiento de 1.5 cm y la misma medida de separación entre ellos. (Figura 7).

Figura 7. Espécimen de prueba.



Fuente: autores del proyecto.

**2.5.3 Fraguado y curado de probetas.** Las probetas se dejaron fraguar durante 24 horas en moldes plásticos, una vez transcurrido este tiempo se desmoldaron, después de retirados los moldes se procedió a sumergirlas en agua con concentraciones de cloruros al 0%, 3.5% y al 4.5% dependiente del porcentaje de contaminación de la probeta durante 28 días como tiempo de curado (ver figura 8).

Figura 8. Proceso de curado.



Fuente: autores del proyecto.

**2.5.4 Carbonatación de las probetas.** Para el proceso de carbonatación, es importante conocer el  $K_{CO_2}$  (constante de carbonatación) y así calcular cuánto

tiempo se dejaría las probetas en presencia de CO<sub>2</sub>. Esta constante se obtuvo según la literatura.<sup>25</sup>

**2.5.4.1 Determinación de la velocidad de carbonatación K:** Para predecir la velocidad de carbonatación del concreto reforzado se tiene la ecuación que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición es:

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}} \quad (12)$$

$X_{CO_2}$  = Profundidad de carbonatación, mm

$K_{CO_2}$  = Constante de carbonatación, mm /año<sup>0.5</sup>

$t$  = Tiempo en años

Se realizaron los cálculos pertinentes para la obtención del tiempo y la concentración de CO<sub>2</sub> necesaria para garantizar que el proceso de carbonatación alcanzará la superficie de la varilla, estos datos fueron calculados tomando como base la constante de carbonatación para concretos con una relación a/c=0.5  $K_{CO_2}=6,6669\text{mm}/\text{dia}^{1/2}$  determinada por Balaguera Reina y Porras Arévalo,<sup>25</sup> conociendo lo anterior se tomó la decisión de exponer 10 días la mitad de las probetas de concreto reforzado (12 probetas) a una concentración del 35% de CO<sub>2</sub> y la otra mitad el mismo tiempo pero con una concentración del 65% de CO<sub>2</sub>.

La cámara de carbonatación se calibró con las siguientes condiciones de operación: Humedad relativa entre 50-70%, concentración de CO<sub>2</sub> de 35% y 65% (dependiendo que probetas estuvieran en exposición) y una temperatura de 25°C. Para verificar en el ambiente de la cámara el 35% o 65% de CO<sub>2</sub>, se utilizó el

---

<sup>25</sup> BALAGUERA REINA, Diego Armando y PORRAS ARÉVALO, Blanca Elizabeth. Evaluación del efecto de la carbonatación sobre el coeficiente de difusión del ion cloruro en concreto. Trabajo de Grado realizado para optar al título de Ingeniero(a) Metalúrgico(a), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2009  
Ibíd.

equipo de monitoreo ENRAC 700 (ENRAC INC) de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

Una vez establecidas las anteriores condiciones, se registraron los flujos obtenidos que muestra la tabla 9 y se mantuvieron para realizar la totalidad de las pruebas, garantizando así, el mismo ambiente para cada exposición. Con respecto al aire húmedo, no se necesitó abrir la válvula debido a que la humedad relativa se mantuvo durante la realización de las pruebas.

Para la realización de esta fase se trabajó con la cámara de carbonatación en las instalaciones del edificio de Caracterización de Materiales.

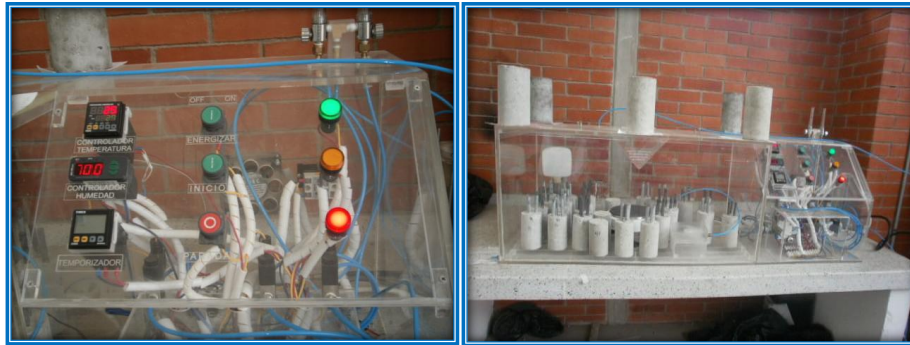
Tabla 9. Flujos obtenidos para aire y dióxido de carbono.

	<b>35% de CO<sub>2</sub>.</b>	<b>65% de CO<sub>2</sub>.</b>
FLUJO	LPM	LPM
AIRE SECO	<b>100</b>	<b>100</b>
AIRE HÚMEDO	-	-
CO <sub>2</sub>	<b>4,5</b>	<b>6,5</b>

Fuente: Los autores.

Con las condiciones de operación y los flujos establecidos, se procedió a realizar la carbonatación de los especímenes (ver figura 9)

Figura 9. Proceso de carbonatación.



Fuente: autores del proyecto.

**2.5.4.2 Exposición de los cilindros de concreto reforzados a ciclos de humectación/secado en ambiente de cloruros.** Para continuar acelerando el proceso corrosivo, (pasados 4 meses desde el proceso de carbonatación acelerada), las probetas con refuerzo se expusieron a ciclos de humedad-secado en solución salina (durante 60 días en los cuales se realizaron pruebas electroquímicas), ya que este método de transporte acelera la velocidad de penetración de los iones cloruro dentro del material (K. Hong & R.D.n Hooton, 1999)<sup>26</sup>. Se eligieron ciclos de humedad de 24 horas y ciclos de secado de 24 horas.

Esta solución se preparó utilizando sal de mar a concentraciones de 3.5% y 4.5% de cloruros, colocando cada solución final en 2 recipientes diferentes (piletas). Las probetas de concreto fueron sumergidas en los ambientes salinos a temperatura ambiente, para controlar la concentración de la solución se cambiaba de forma periódica.

---

<sup>26</sup> BLOQUE REGIONAL PARLAMENTO. Puerto de Bahía Málaga vuelve al debate regional [en línea]. En: Revista Acción. [Consultado el 10 de febrero del 2012, 9:35 a.m.]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.ccc.org.co/accion/103/k.html>>

Las probetas colocadas en la pileta con la concentración de 3.5% fueron las que en el momento de su fabricación se contaminaron con NaCl al 3% y en la pileta con concentración de 4.5% las que fueron contaminadas al 4%. (Figura 10)

Figura 10. Probetas en etapa de humectación y secado en solución salina de NaCl al 3.5% y 4.5%.



Fuente: autores del proyecto.

## 2.6 ENSAYOS REALIZADOS

Las pruebas que se realizaron para el desarrollo del proyecto fueron: resistencia a la compresión de las mezclas de concreto, pruebas químicas con fenolftaleína para determinar la profundidad de carbonatación, ensayos electroquímicos para el acero embebido (OCP, EIS, LPR y PG) y pruebas de inspección visual.

**2.6.1 Pruebas de resistencia a la compresión.** Se realizó la prueba de resistencia a la compresión de las mezclas de concreto sin acero de refuerzo teniendo en cuenta la norma ICONTEC 673 "Ensayo de Resistencia y Compresión de Cilindros normales de hormigón" y ASTM C-39, con diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos. Para que los resultados tengan validez se hicieron 3 cilindros de concreto por cada tipo de mezcla, como lo recomienda la norma.

Para estos ensayos, la preparación de las probetas de concreto consistía únicamente en depositar una sustancia a base de azufre, que permitiera obtener unas superficies planas y paralelas, y por lo tanto, lograr un contacto uniforme con las matrices de la máquina. El proceso y la apariencia de las probetas después del ensayo se muestran en la Figura 11.

Figura 11. Ensayos de compresión.



Fuente: autores del proyecto.

**2.6.2 Pruebas de fenolftaleína.** Esta prueba se realizó a los especímenes que no tienen acero de refuerzo que fueron sometidos a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos, con el fin de determinar el espesor de la capa carbonatada, se roció una solución 1% de fenolftaleína en alcohol etílico, sobre las probetas de concreto.

**2.6.3 Pruebas electroquímicas.** Las pruebas electroquímicas se realizaron teniendo presente la norma ASTM G 59-91 y ASTM C 876-91 en un Potenciostato/Galvanostato marca GAMRY (Software Gamry Framework versión 3.2). El tiempo total de exposición fue de 60 días, dentro de los cuales se realizaban Los ensayos de forma periódica.

Pasos para realizar las pruebas electroquímicas:

Se preparó las probetas de concreto reforzado. (Con un secado previo de 24 horas y sumergidas 30 minutos antes de realizar los ensayos en concentraciones de cloruros de 3.5% o 4.5% dependiente del tipo de probeta).

- Se realizó el montaje de la celda electroquímica.
- Se hicieron los ensayos de OCP, RPL, EIE y Pulso Galvanostático.
- Elaboración y análisis de curvas.

**2.6.3.1 Celda electroquímica.** La celda electroquímica consta de un arreglo de tres electrodos, que incluyó un electrodo de trabajo (acero de refuerzo, en blanco o galvanizado dependiendo de la muestra), el electrodo usado como referencia fue de cobre – sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ), dada la disponibilidad de datos en la literatura en el campo de los concretos basados en este tipo de electrodo.<sup>27,28,29</sup> Y como contra-electrodo se usó dos varillas de acero de refuerzo con las mismas características y dimensiones del electrodo de trabajo (permitiendo así superar considerablemente el área de este último), embebidas en el concreto de manera simétrica, con el fin de hacer eficiente la distribución de corriente eléctrica. En todas las pruebas el electrolito conductor empleado fue una esponja humedecida en solución con NaCl analítico de 99% de pureza empleado al 1% de concentración en peso de agua.

La distribución de los electrodos en la probeta y la configuración de la celda para pruebas electroquímicas se puede observar en las Figura 12.

---

<sup>27</sup> M. ANDRADE, M. C. ALONZO and J. A. GONZÁLEZ, Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, N. S. Berke, V. Chaker, and W. D. Whiting Eds., American Society of Testing and Materials, Philadelphia, 29, 1990.

<sup>28</sup> KONDRATOVA, I.L. Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements. Science Direct, Received 18 September 2001; accepted 29 September 2003.

<sup>29</sup> BERMÚDEZ ODRIÓZOLA, Miguel Ángel. Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, octubre de 2007.

Figura 12. Celda electroquímica



Fuente: autores del proyecto.

**2.6.3.2 Medidas de Potencial en Circuito Abierto (OCP).** Las medidas de potencial en circuito abierto se realizaron con un Potenciostato/Galvanostato marca Gamry, siguiendo la norma ASTM C 876-91 “*Standard Test Method For Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*”. Para la toma de potenciales, se le permitió al sistema alcanzar un estado estable. En todas las medidas el electrodo usado como referencia fue el recomendado por la ASTM C 876-91 para concretos (electrodo de sulfato de cobre,  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ).

**2.6.3.3 Medidas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).** Las medidas de resistencia a la polarización lineal se obtuvieron siguiendo la norma ASTM G 59 “*Standard Practice for Potencio dynamics Polarization Resistence Measurements*”. Se utilizó una velocidad de barrido de  $0.2 \text{ mV/s}$ , en un rango de potencial desde  $-20 \text{ mV}$  hasta  $+20 \text{ mV}$  a partir del potencial de corrosión, con el fin de determinar el valor de la pendiente de la curva (potencial vs. densidad de corriente) y determinar la densidad de corriente de corrosión por medio de la ecuación de Stern-Geary. En las medidas se utilizó la constante B como  $26 \text{ mV}$  para acero activo y  $52 \text{ mV}$  para acero pasivo, situación que es ampliamente aceptada en la literatura internacional.

**2.6.3.4 Medidas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE).** Los diagramas de impedancia tipo Nyquist y Bode se obtuvieron por medio de un analizador de espectros de impedancia Gamry. Los ensayos de todas las probetas se realizaron en el rango de frecuencia desde 100 kHz hasta 10 mHz, imponiendo una señal sinusoidal AC de 40 mV y 7 puntos.

**2.6.3.5. Medidas de Pulso Galvanostático (PG).** Se utilizó una amplitud del pulso de  $10\text{ A/cm}^2$  de intensidad y 10 s de duración. Esta es la amplitud recomendada en la literatura internacional sobre la aplicación de pulsos en concretos, con el fin de garantizar la no perturbación del electrodo de trabajo de manera sustancial y no permitir al sistema electroquímico iniciar el proceso farádico de transporte de carga. La determinación de la densidad de corriente de corrosión se desarrolló por medio de la ecuación de Stern-Geary con datos de resistencia a la polarización lineal y capacitancia interfacial provenientes del análisis morfológico de las curvas.

## **2.7 INSPECCIÓN VISUAL**

El procedimiento de inspección visual se realizó en las instalaciones del GIC (ubicado en Guatiguará, sede de la UIS) y consistió en la eliminación del hormigón que envolvía el acero corroído para examinar el tipo y focos de corrosión. Una vez extraídas las barras se eliminaron los productos de corrosión y se determinó la pérdida de sección transversal y se estableció el grado de deterioro que contempla aspectos tales como: fisuración, color, deslaminación del recubrimiento y pérdida de sección del acero.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados más importantes obtenidos en el desarrollo de la investigación, de acuerdo con las actividades propuestas en la metodología. Los resultados de la caracterización del material fueron expuestos en el anexo D cuyos resultados son aceptables para la realización de los ensayos.

#### 3.1 PRUEBA DE RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN SIMPLE

Esta prueba permite determinar la resistencia a compresión de muestras de concreto cilíndricos.<sup>30,31,32</sup> Consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros de concreto, esta carga se aplica en pequeñas cantidades hasta el momento que ocurra la falla; la resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba entre el área de la sección transversal del cilindro. El factor clave que influye de manera significativa en la resistencia a la compresión, es la relación  $a/c$ ; además de otros como el tipo y calidad del cemento, características de los agregados, condiciones de humedad durante el curado y edad del concreto.<sup>33</sup>

Para garantizar que los experimentos fueran realizados sobre concretos de 28 MPa de resistencia a la compresión, se diseñaron 27 pruebas sobre especímenes cilíndricos de concreto de 7.5 cm. de diámetro y 15 cm. de altura, curados durante 28 días en agua con porcentajes de NaCl al 3.5% y 4.5% respectivamente con una

---

<sup>30</sup> ASTM C 39 / C 39M.- Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. - American Society for Testing and Materials. - EUA. - 2001.

<sup>31</sup> ASTM C 192 / C 192M.- Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.- American Society for Testing and Materials.-EUA. - 2000.

<sup>32</sup> NMX C 83.- Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto. Método de Prueba.- ONNCCE.- México.- 2002

<sup>33</sup> ARIZA, Diana y ATUESTA, Javier. Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010

relación a/c 0.5. Los resultados de estos análisis se pueden apreciar en la tabla 10. Comose observa, la resistencia del concreto disminuye a medida que aumenta el porcentaje de cloruros con un porcentaje de 0% de carbonatación, pero se mantiene la resistencia adecuada del concreto para una relación a/c 0.5 de más o menos 28 Mpa.

En el análisis de las segundas y terceras pruebas (35% y 65% de CO<sub>2</sub>) los valores obtenidos de resistencia a la compresión muestran que se presenta una disminución ligera a medida que aumenta el porcentaje de exposición de carbonatación. Se observa una relación logarítmica inversa entre estos dos parámetros (resistencia y porcentaje de carbonatación), ya que la resistencia a la compresión disminuye ligeramente a medida que aumenta el porcentaje de exposición y la profundidad de carbonatación.

Tabla 10. Resultados ensayo de compresión.

	<b>0% CO2</b>	<b>35% CO2</b>	<b>65% CO2</b>
Cloruros %	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	38,026	36,528	35,773
0	37,905	37,006	35,146
0	37,574	36,277	35,037
3	30,825	28,785	28,554
3	30,557	28,737	26,995
3	31,341	29,359	28,263
4	28,788	27,991	27,189
4	28,520	27,826	27,236
4	28,809	28,320	26,777

Fuente: autores del proyecto.

La teoría muestra que en el concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Esto se evidencia en los valores obtenidos de resistencia a la compresión, porque independientemente del frente logrado se obtuvo un comportamiento estable como se muestra en la tabla 10, ya que este proceso no es excesivo en cuanto a presencia de grietas, expansiones o contracciones, a diferencia del daño ocasionado por ejemplo por sulfatos o fuego.<sup>34, 35</sup> Un comportamiento más agresivo sucedería en un concreto que presentara refuerzo, porque allí disminuiría drásticamente la resistencia debido a la expansión del refuerzo y al posterior agrietamiento del concreto.

En cuanto a la exposición a los cloruros y el tiempo de curado con el mismo elemento, se tienen los resultados muy similares a los de la literatura pues las altas concentraciones de sales llegan a reducir considerablemente la resistencia del concreto.<sup>36</sup>

Las impurezas excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, si no también pueden ser causa de manchado, corrosión del esfuerzo (si lo hay), inestabilidad volumétrica y menor durabilidad. Aun cuando un concreto hecho con agua de mar (en nuestro caso sal marina a diferentes concentraciones según las muestras) puede tener una resistencia temprana y mayor que un concreto normal, sus resistencias a edades mayores (después de 28 días) pueden ser inferiores. Esta reducción de resistencia puede

---

<sup>34</sup> QUIROS, Gilberto y SANTAMARIA, Ruth. Evaluación del efecto del ataque de sulfatos sobre concreto, mediante la técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.

<sup>35</sup> CUESTA, Harry y LUQUE, Héctor. Evaluación del efecto sobre la de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo sometido a fuego. Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.

<sup>36</sup> GONZÁLEZ, Francisco; ROCHA CHIU, Luis y FLÓRES, J. Antonio. Elaboración de concretos con agua tratadas. Ponencia presentada en el X Encuentro Nacional de la Industria del Concreto Premezclado por sus autores, quienes pertenecen a la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana.

ser compensada reduciendo la relación agua/ cemento. El agua de mar no es adecuada para producir concreto reforzado con acero y no deberá usarse en concretos reforzados debido al riesgo de corrosión del esfuerzo, particularmente en ambientes cálidos y húmedos. El agua de mar que se utiliza para producir concreto, también tiende a causar eflorescencia y humedad en superficies de concreto expuestas al aire y al agua.<sup>37</sup>

### 3.2 PRUEBAS DE FENOLFTALEÍNA

Este ensayo permite diferenciar zonas con diferente pH, lo cual hace posible medir la profundidad de carbonatación; para ello se roció una solución 1% de fenolftaleína en alcohol etílico, sobre las probetas de concreto.

Las zonas con un pH inferior a 9 no cambiaron de color, y son atribuidas a las áreas carbonatadas o frente de carbonatación de las muestras, mientras que, las zonas con un pH superior a 9, tomaron un tono rosa intenso. Inmediatamente se midió el espesor del frente de carbonatación, con ayuda de un calibrador Pie de Rey con una precisión de 0,05 mm, antes de su reacción con el CO<sub>2</sub> de los alrededores. Este método se basó en la norma RILEM CPC-18.<sup>38</sup>

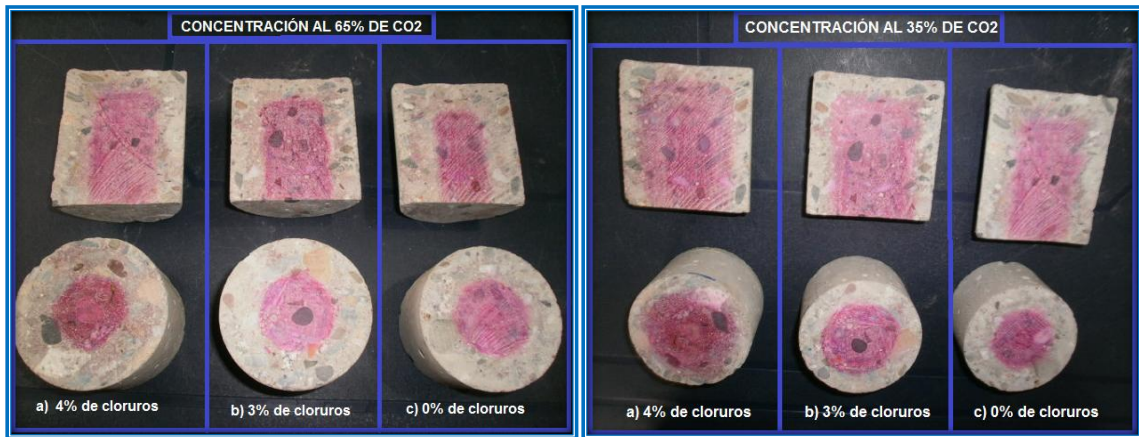
Los resultados presentados en la figura 13 y en la tabla 11 indican que a medida que aumenta la concentración de cloruros (0% ,3% y 4%) disminuye el coeficiente de carbonatación (Kc) y por tanto el frente de carbonatación (Xc), es decir, aumenta la resistencia del concreto a la difusión del CO<sub>2</sub> a través de la matriz cementicia. Así mismo, se comprobó que a medida que aumenta la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta el Xc.

---

<sup>37</sup> ALATORRE GONZÁLEZ, Jesús y URIBE, Rafael. Agregados para concreto [en línea]. [Consultado el 5 de febrero del 2012, 8:00 a.m.]. Disponible en Internet: <URL: <http://es.scribd.com/doc/22864133/Agregados-Para-Concreto>>

<sup>38</sup> CARRASCO, María Fernanda. Evaluación de estructuras de hormigón. Universidad Tecnológica Nacional. 2007.

Figura 13. Profundidades de carbonatación obtenidos para dos concentraciones de CO<sub>2</sub> a un mismo tiempo de exposición.



Fuente: autores del proyecto.

Tabla 11. Profundidades y constante de carbonatación obtenidos para dos concentraciones de CO<sub>2</sub> a un mismo tiempo de exposición.

ENSAYOS DE FENOLFTALEINA			
PROBETA	Xc [mm]	Kc [mm/día ^1/2]	t [días]
FB0G	20,5	6,4827	10 día al 35% CO <sub>2</sub>
FB0C0	15,7	4,9648	
FB0C1	11,5	3,6366	
FB1G	25	7,9057	10 días al 65% CO <sub>2</sub>
FB1C0	22,14	7,0013	
FB1C1	18,38	5,8123	

Fuente: autores del proyecto.

La influencia que ejerce la concentración de cloruros sobre la velocidad de penetración del CO<sub>2</sub> se atribuye al hecho de que el concreto se encuentra envenenado (utilizando agua de amasado contaminada con cloruros), dejando así el ion cloruro presente en el concreto en desequilibrio, con mayor cantidad disuelto

en el agua que se conserva en los poros, que los iones enlazados y adsorbido. Al haber un aumento del ion cloruro disuelto en los poros se presenta una saturación en los espacios libres donde puede penetrar con facilidad el CO<sub>2</sub>, retrasando así el proceso de carbonatación. En la figura 37 del anexo D.1 se ilustran los tres casos del ion cloruro presente en el concreto, e indica los equilibrios que se establecen para los cloruros en el concreto.

### 3.3 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

Los principales parámetros electroquímicos que caracterizan el proceso de corrosión del acero de refuerzo, son; potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ), los cuales para esta investigación fueron monitoreados periódicamente, la densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) fue determinada a partir de la ecuación de Stern-Geary de acuerdo a la siguiente expresión:<sup>39</sup>

$$I_{Corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 R_p (\beta_a \pm \beta_c)} \quad (1)$$

En la ecuación anterior,  $\beta_a$  y  $\beta_c$  son las pendientes anódicas y catódicas de Tafel. Dichos parámetros dependen de la cinética de las reacciones de corrosión. Para simplificar los cálculos, algunos investigadores utilizan la ecuación:

$$I_{Corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

Los valores obtenidos de ( $I_{corr}$ ) en  $\mu A/cm^2$  se pueden transformar en pérdida de espesor por unidad de tiempo (velocidad de corriente  $V_{corr}$ ) mm/año en de acuerdo a la ley de Faraday

$$V_{corr} = \frac{mm}{año} = 0,0116 * I_{corr} \quad (13)$$

---

<sup>39</sup> HLADKI, K.; CALLOW, L. & LAWSON, J. L., Op. cit., p. 25

Andrade y colaboradores,<sup>40</sup> publicaron valores típicos de B para acero embebido en concreto. De acuerdo a estas investigaciones, el acero en estado pasivo de corrosión ( $E_{corr} > -75$  mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>) presenta valores de B aproximadamente iguales a 0,052V, mientras que el valor de B para las barras de acero en estado activo de corrosión ( $E_{corr} < -225$  mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>) es 0,026 V.

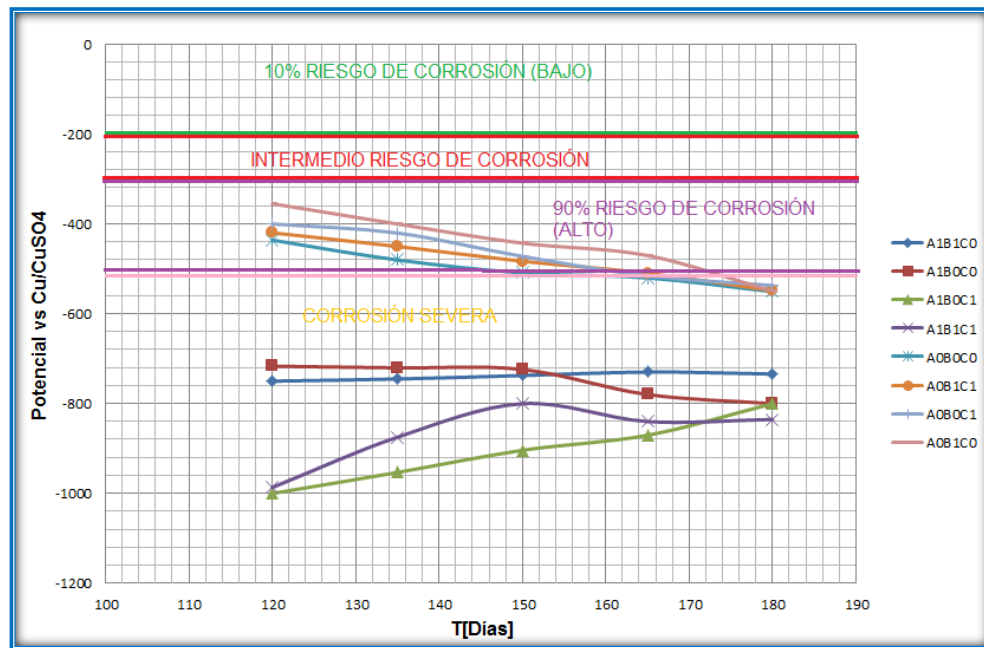
**3.3.1 Medidas de Potencial en Circuito Abierto (OCP).** Las medidas de potencial en circuito abierto se interpretaron siguiendo la norma ASTM C 876-91 "Standard 35 Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". Para la toma de potenciales, se dejó que el sistema se estabilizara en un tiempo de 30 minutos. Las lecturas de los potenciales de corrosión, dadas en mili voltios (mV), son útiles para determinar la probabilidad de corrosión de acuerdo anexo D.2. Durante los ensayos fue utilizado un electrodo de referencia Cu/CuSO<sub>4</sub>. Los datos se registraron y las gráficas se presentan en las figuras subsecuentes, en ellas se indica la probabilidad de corrosión en función del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) de acuerdo a la tablas que aparecen en el anexo D.2; esto es, la zona de incertidumbre cuando el  $E_{corr}$  se ubica entre -250mV y -350mV; una probabilidad de corrosión mayor al 90% para un  $E_{corr}$  entre -350mV y -500mV, y finalmente un riesgo de corrosión severa para un  $E_{corr}$  menor a -500mV.

La figura 14 muestra los cambios del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) para el acero de refuerzo durante 10 días de exposición a carbonatos con un 35% y 65% de concentración con la adición de diferentes concentraciones del ion cloruro. Se observa que después de 600 segundos el  $E_{corr}$  disminuyó y alcanzó un valor estable aproximado a -0,500 V, que corresponde a la región activa de corrosión, correspondientemente, el  $E_{corr}$  disminuyó durante la exposición, logrando valores más negativos que -0,500V.

---

<sup>40</sup> ANDRADE, M. C. ALONZO AND J. A. GONZÁLEZ, Op. cit. p. 29.

Figura 14. Mediciones de Potencial a circuito abierto (OCP) Acero galvanizado y sin galvanizar.

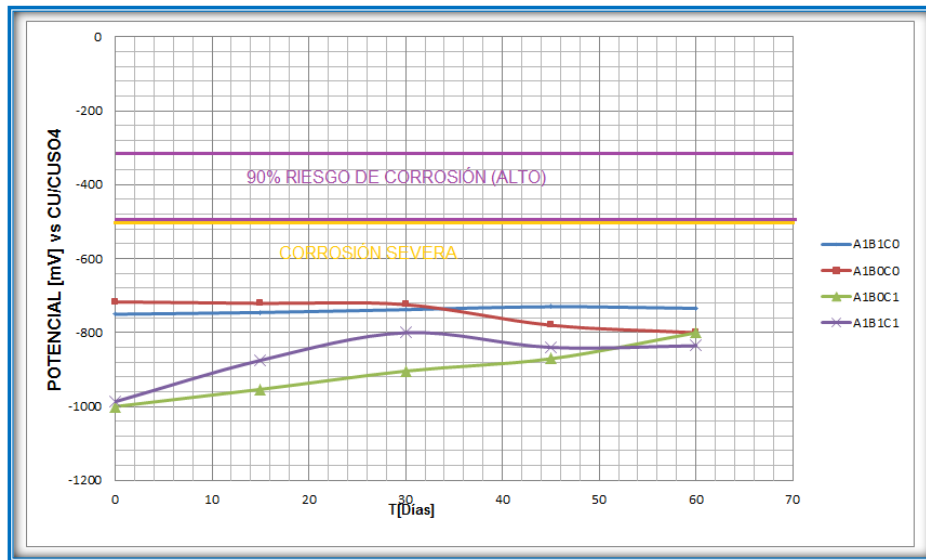


Fuente: autores del proyecto

Se puede observar en la figura 15 que las varillas galvanizadas y con una concentración de 65% de  $\text{CO}_2$  presentan un riesgo de corrosión severa mientras que las varillas sin galvanizar y con una concentración de 65% de  $\text{CO}_2$  presentan un nivel alto de corrosión. Es preciso corroborar los resultados del análisis del refuerzo galvanizado con otras pruebas electroquímicas tales como EIS, LPR o Pulso Galvanostático, pues según la norma ASTM C 876-91 esta técnica es un poco improbable en el análisis de estos resultados. Cabe anotar que en ninguna de las pruebas se presentó un nivel de menos del 90% de corrosión, puesto que además de que el curado se hizo en solución NaCl fueron envenenadas con concentraciones del 3% y 4% respectivamente, y al momento de realizar las pruebas electroquímicas, se sometieron a un proceso de humectación –secado cada 24 horas, en un medio acuoso de NaCl nuevamente. Es decir, mediante este análisis se presenta una tendencia a la corrosión y un comportamiento activo a la

corrosión dentro del sistema, estas características y probabilidades de corrosión son corroboradas mediante otras técnicas electroquímicas como la LPR y EIS.

Figura 15. Mediciones de Potencial a circuito abierto (OCP) de las probetas con refuerzo galvanizado.



Fuente: autores del proyecto.

**3.3.2 Medidas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).** El método de resistencia a la polarización lineal (RPL) es una técnica que proporciona un método simple para determinar la densidad ( $I_{corr}$ ), y velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ ) en las estructuras, utilizando la ecuación de Stern-Geary (Ec. 13). En la Tabla 12 y 13 se muestran los resultados obtenidos por medio de esta técnica para cada tipo de muestra de concreto reforzado a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos.

A partir de los resultados de las Tabla 12 y 13, se puede deducir que todas las probetas presentaron un grado de corrosión muy elevado esperada en aproximadamente dos años, puesto que sus densidades  $I_{corr}$  son superiores a  $1\mu A/cm^2$  y presentan velocidades de corrosión altas (tabla 23 del anexo D.3). En los especímenes A0 (acero sin galvanizar) quedó en evidencia la despasivación

del acero de refuerzo, mostrando una tendencia marcada de deterioro con el transcurso del tiempo, presentando mayor daño de corrosión las probetas con concentraciones de carbonatos y cloruros superiores (65% y 4% respectivamente), es importante resaltar que el agente agresivo dominante fueron los cloruros.

Tabla 12. Mediciones de Rp para los diferentes especímenes.

<b>Rp (ohms)</b>			
<b>ESPECIMEN</b>	<b>T0</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>			
<b>A0B0C0</b>	18510,00	7292,20	1972,70
<b>A0B1C0</b>	13583,00	4266,00	1605,50
<b>A0B1C1</b>	3836,60	2203,60	1200,30
<b>A0B0C1</b>	8825,70	4013,10	1380,60
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO GALVANIZADO</b>			
<b>A1B1C0</b>	9204,90	3845,40	2396,70
<b>A1B0C0</b>	12165,00	4012,70	2124,80
<b>A1B0C1</b>	1839,80	1589,90	1316,90
<b>A1B1C1</b>	1284,90	1046,50	704,76

Fuente: autores del proyecto.

En el caso de los especímenes A1 (acero de refuerzo galvanizado) se presentó la misma tendencia de corrosión que los de sin galvanizar (A0) pero con mayor intensidad lo que indica que la capa de cinc se corroe con gran velocidad en ambientes muy agresivos como los que se simularon en este trabajo.

Tabla 13. Densidades de corriente de corrosión y velocidad de corriente obtenidas mediante mediciones de RPL para los diferentes especímenes.

<b>Densidades <math>I_{corr}</math> (<math>\mu A/cm^2</math>) y Velocidades de corrosión <math>V_{corr}</math>(mm/año)</b>						
<b>ESPECIMEN</b>	<b>T0</b>		<b>T1</b>		<b>T2</b>	
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>						
	<b><math>I_{corr}</math></b>	<b><math>V_{corr}</math></b>	<b><math>I_{corr}</math></b>	<b><math>V_{corr}</math></b>	<b><math>I_{corr}</math></b>	<b><math>V_{corr}</math></b>
<b>A0B0C0</b>	14,046	0,163	35,655	0,414	131,799	1,529
<b>A0B1C0</b>	19,142	0,222	60,947	0,707	161,943	1,879
<b>A0B1C1</b>	67,768	0,786	117,989	1,369	216,613	2,513
<b>A0B0C1</b>	29,459	0,342	64,788	0,752	188,324	2,185
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO GALVANIZADO</b>						
<b>A1B1C0</b>	28,246	0,328	67,613	0,784	108,482	1,258
<b>A1B0C0</b>	21,373	0,248	64,794	0,752	122,364	1,419
<b>A1B0C1</b>	141,320	1,639	163,532	1,897	197,433	2,290
<b>A1B1C1</b>	202,350	2,347	248,447	2,882	368,920	4,279

Fuente: autores del proyecto.

Se debe tener en cuenta que el galvanizado proporciona protección por efecto barrera aislando al acero del medio agresivo, y también protección catódica al actuar como ánodo de sacrificio de las pilas de corrosión que puedan formarse. Los productos de corrosión generados son menos voluminosos que los que se producen en el acero utilizado comúnmente en la industria de la construcción, por lo que se disminuye el deterioro de la estructura. Por lo tanto con la presente técnica electroquímica (Resistencia a la Polarización Lineal) no es muy confiable afirmar que la varilla de acero que se encuentra galvanizada, está corroída o el efecto corrosivo solo se ha presentado en la capa.

Para evaluar con mayor profundidad las diferentes interfaces del acero galvanizado por lo tanto, se utilizaron dos técnicas electroquímicas; Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y pulso galvanostático como también un riguroso análisis visual, presentado más adelante.

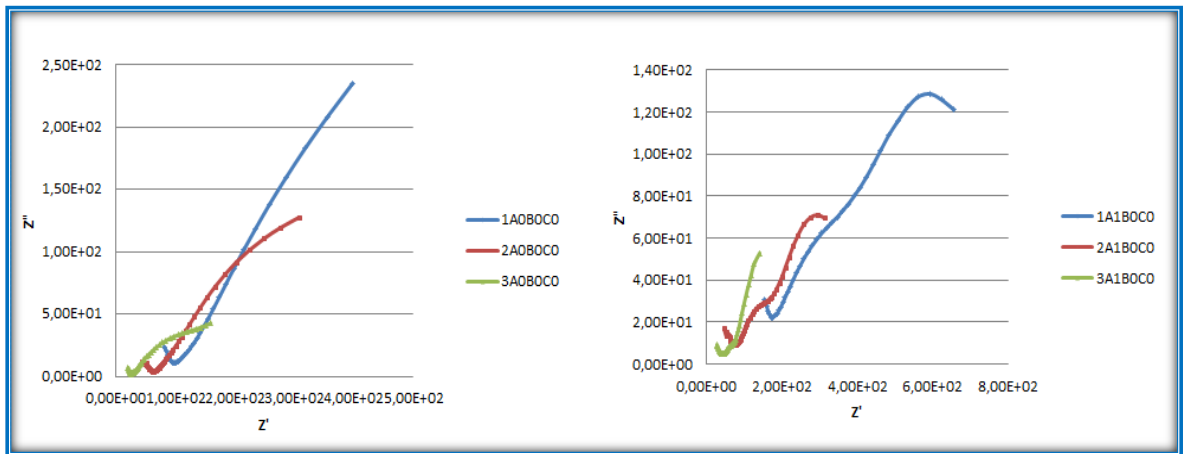
**3.3.3 Medidas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE).** En los diagramas de Nyquist que se muestran en las figuras 16 y 17 se puede observar el avance del proceso corrosivo al incrementar el tiempo de exposición de los especímenes de concreto. Los diagramas experimentales obtenidos muestran la presencia de un doble domo, los cuales no se comportan como semicírculos ideales, lo que indica que la capa óxido- metálico formado no es completamente homogénea, además, a medida que se incrementa el tiempo de exposición de las probetas, el domo disminuye su tamaño, incrementando así la velocidad de corrosión. Se puede decir que el primer domo a frecuencias intermedias pasa de ser resistivo a capacitivo, por lo tanto la primera capa óxido metálico-electrolito pasa de ser una barrera física que impide el paso de electrones protegiendo el material, a una capa más porosa permitiendo la transferencia de carga con el metal.

En cuanto al segundo semicírculo, representa la interface metal-óxido metálico. Estos dos arcos cambian a medida que aumenta el tiempo de exposición de las probetas en el medio salino. Es así como a los primeros días (120 y 150) para las probetas tipo A0 el primer arco disminuye de tamaño y el segundo arco aparece abierto, proceso que se observa en las figuras 16 y 17 (y su complemento en las gráficas del anexo D.5). De acuerdo con las características descritas puede decirse que el primer arco es característico del proceso de transferencia de carga en el metal en paralelo con la carga de la doble capa eléctrica. El segundo arco capacitivo estaría asociado al producto de corrosión que está en proceso de formación, la cual se consolida con el aumento del tiempo de exposición con el cual se estabiliza y se constituye en una barrera al paso de especies hacia la interface metálica.

De acuerdo a los diagramas de EIS y datos de OPC, se inició la despasivación del concreto reforzado para cada uno de los diferentes tipos de mezclas a partir de los primeros tiempos de exposición (120, 150 días), confirmando que el proceso para

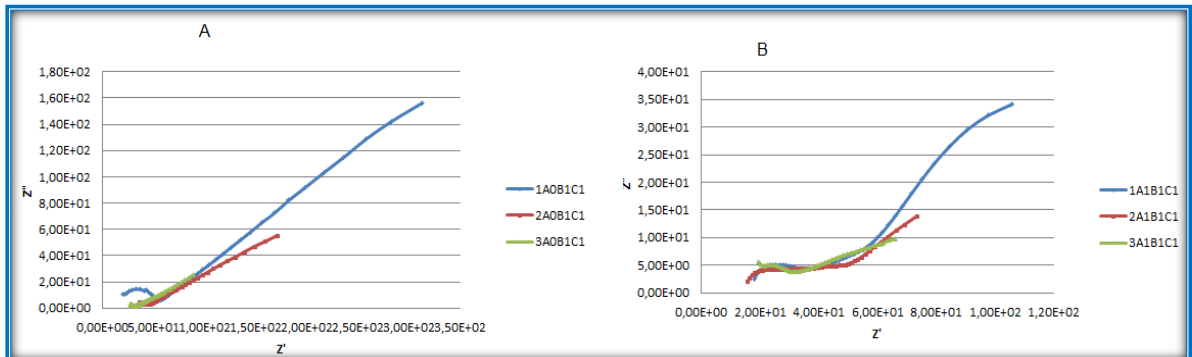
la despasivación no se presenta de manera súbita una vez que se alcanzan condiciones propicias, sino que resulta en forma paulatina hasta completarse.

Figura 16. Diagramas de Nyquist a 3% NaCl y de 35% de CO<sub>2</sub>, especímenes sin galvanizar parte A, especímenes galvanizados parte B.



Fuente: autores del proyecto.

Figura 17. Diagramas de Nyquist a 4% de NaCl y 65% de CO<sub>2</sub>, especímenes sin galvanizar parte A, especímenes galvanizados parte B.



Fuente: autores del proyecto.

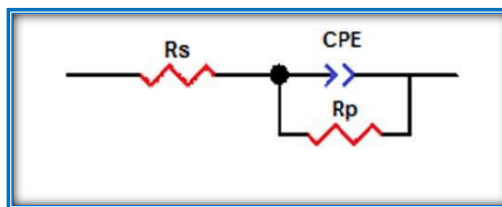
Para los especímenes mostrados en las figura 17(parte A y B), la impedancia aumentó con el transcurso del tiempo, mostrando como resultado un arco a bajas frecuencias, el cual se debe a procesos que ocurren en la doble capa (acero-concreto) lo que indica un aumento notable en la corrosión del acero de refuerzo.

**3.3.3.1 Circuitos Eléctricos Equivalentes.** Un circuito equivalente es una combinación de elementos pasivos (resistencias, capacitancias, inductores y otras formas de impedancias distribuidas) que dan la misma respuesta, a toda frecuencia, de una celda de corrosión. Cuando el análisis de los datos de EIE se realiza mediante un ajuste de los datos experimentales a un circuito eléctrico equivalente, se obtiene los diferentes valores de parámetros eléctricos. Estos valores son utilizados para obtener información, Tanto de velocidades de corrosión como de mecanismos de corrosión.

Tomando como base el análisis anterior se propuso un modelo de circuito equivalente para tratar de interpretar el significado de la celda electroquímica el cual fue validó para todos los diagramas de impedancia. Las figuras 18 y 19, muestran los circuitos equivalentes usados en la presente investigación.

Los modelos se realizaron con un software especializado llamado Zview 2.9 el cual permite determinar el valor de  $R_p$  a bajas frecuencias y realizar la comparación entre los datos simulados y los experimentales.

Figura 18. Circuito eléctrico empleado para modelar el comportamiento electroquímico de una varilla de acero embebido en concreto.



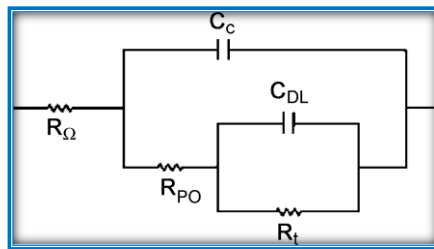
Fuente: autores del proyecto.

La figura 18, muestra el circuito equivalente que consta de  $R_s$  que es la resistencia de la solución, un elemento de fase constante ( $CPE$ ) que se asocia al

comportamiento de la capacitancia de la doble capa electroquímica y que está en paralelo con  $RP$ , que es la resistencia a la polarización del material.

El CPE consta de 2 componentes CPE-T (transferencia de carga) y CPE-P (fase de la capacitancia).

Figura 19. Circuito eléctrico empleado para modelar el comportamiento electroquímico de una varilla de acero galvanizado embebido en concreto.



Fuente: autores del proyecto.

El elemento CPE es utilizado en el modelo en lugar del capacitor para compensar la no homogeneidad en el sistema, también explica efectos de distribución y porosidad de la capa de óxido metálico.

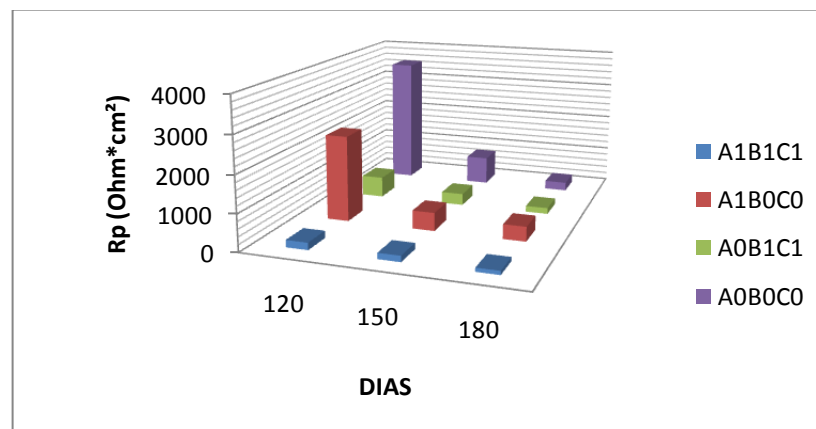
- $R_{\Omega}$ : Resistencia del electrolito.
- $C_c$ : Capacitancia asociada a la capa de los productos de corrosión del galvanizado.
- $R_{PO}$ : Resistencia asociada a la capa de los productos de corrosión del galvanizado.
- $C_{DL}$ : Capacitancia de la doble capa.
- $R_t$ : Resistencia de transferencia de carga correspondiente a la corrosión de cinc.

Para el análisis por circuitos equivalentes se tomaron los resultados de las EIE realizadas a los especímenes sometidos a las mayores concentraciones de

carbonatos y cloruros ya que con ellos se obtuvieron las mayores velocidades de corrosión, y por lo tanto, mayor deterioro de la superficie del material.

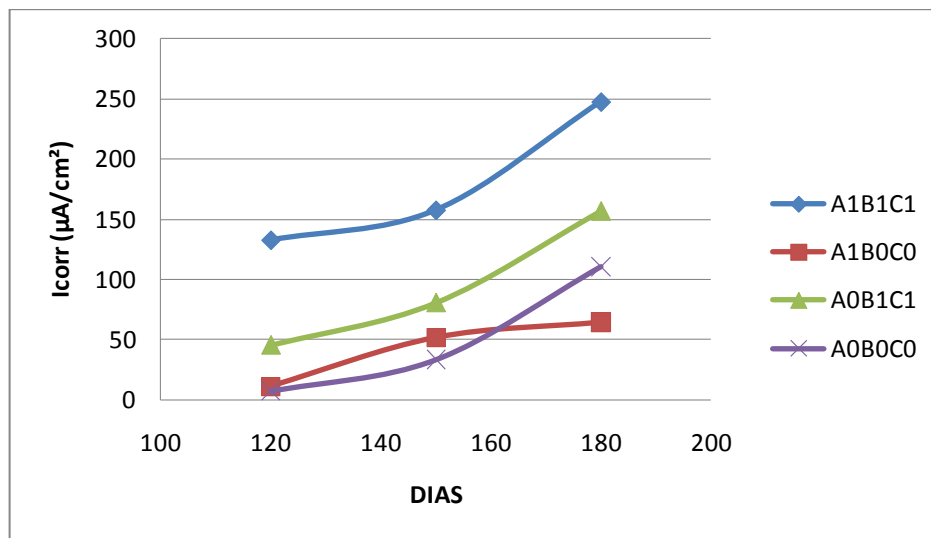
En las figuras 20 y 21 presentadas en el presente capítulo y en las tablas 27 y 28 del anexo D.5, se muestra valores de resistencias, densidades y capacitancias para los especímenes a diferentes tiempos, obtenidos mediante la simulación en el software Zview, donde se aprecia que el acero sin galvanizar se encuentran en un alto estado de corrosión, aumentado con el tiempo pero cada vez con menor velocidad, lo que indica una leve disminución en el crecimiento de la  $I_{corr}$  presentando un comportamiento resistivo en la interface metal-óxido metálico, lo cual está de acuerdo con lo establecido con la literatura, donde se afirma que a medida que transcurre el tiempo aumenta la resistencia a la corrosión, también se aprecia que al transcurrir de los ciclos no hubo gestos de presentarse una pasivación del acero considerable. Algo similar ocurre con las varillas galvanizadas pero con la diferencia de que los productos corrosivos están derivados de la capa galvanizada y el acero presenta un estado muy bajo y en algunos casos nulos de corrosión.

Figura 20. Valores de  $R_p$  para los diferentes tipos de mezcla obtenidos mediante la simulación en el software Zview.



Fuente: autores del proyecto.

Figura 21. Densidades de corriente de corrosión obtenidas por EIE para los diferentes especímenes utilizando  $B=0,026\text{ V}$ .



Fuente: autores del proyecto.

En el anexo D.5 figuras 39 a 44 se hallan los diagramas de impedancia donde se puede apreciar claramente que sobre la curva experimental se encuentra la curva de ajuste que surge del modelado con el circuito propuesto para el sistema acero/concreto y acero galvanizado/concreto. Las gráficas aquí representadas incluyen también los datos simulados, además, se puede observar que hay una excelente concordancia entre los datos experimentales y los simulados.

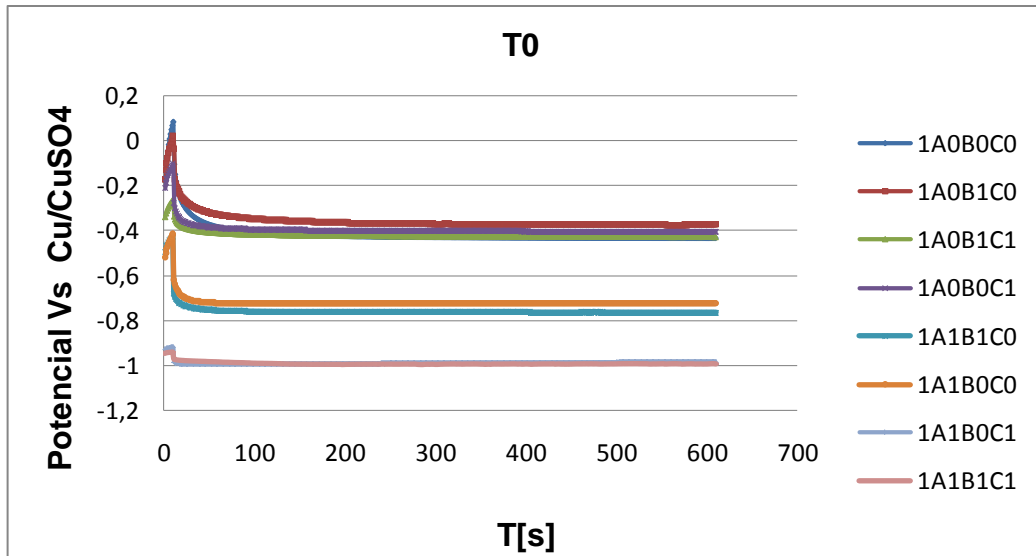
Analizando las gráficas de Bode para las varillas galvanizadas se observan dos zonas: unas a altas frecuencias con pendiente aproximadamente igual a cero llamada la zona resistiva, la cual se refiere a la protección física y química, que ejerce la mezcla del concreto sobre el acero. La segunda zona (a bajas frecuencias), en donde la pendiente está variando es la llamada zona capacitiva, la cual hace referencia a la propiedad de retardar la cinética de transferencia de los procesos de carga; ésta pendiente puede relacionarse con la resistencia a la polarización, de tal manera que a mayor pendiente se tendrán valores mayores de  $R_p$ .

En las gráficas de impedancia aparecen dos bucles correspondientes a dos elementos de fase constante, que evidencian la presencia de dos interfaces; este comportamiento es típico de superficies metálicas con un óxido metálico aislante, poroso o discontinuo que pueden ser representadas mediante los circuitos plateados con anterioridad.

**3.3.4 Medidas de Pulso Galvanostático (GPM).** Las figuras 22 representan las respuestas típicas del potencial del acero en concreto a un pulso galvanostático, para las diferentes condiciones de exposición. Se debe tener en cuenta que las siguientes figuras fueron obtenidas por el software EXCEL, por el hecho que solamente se interesa mostrar la morfología de la gráfica obtenida. Se puede apreciar que las muestras de concreto reforzado galvanizadas tienen una diferencia muy marcada en contraste con las muestras de concreto reforzado sin galvanizar, lo cual es detectable por, primero, el tiempo de relajación de respuesta del pulso (eje abscisas) y segundo, por el grado de polarización alcanzado (eje ordenadas).

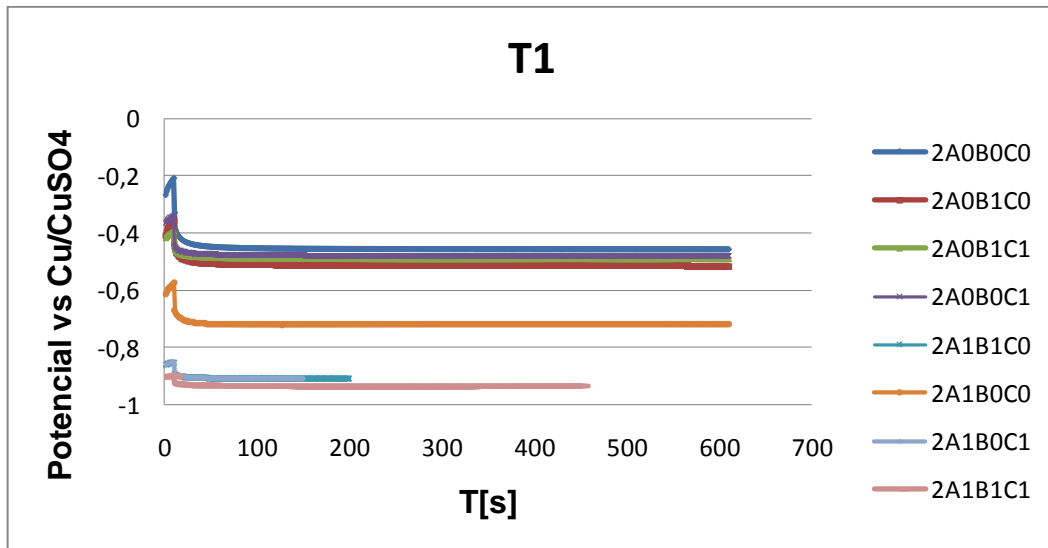
La escala de tiempo para el potencial de descarga del bloque activo (denominado A1, galvanizado) es significativamente más grande que las de los bloques pasivos, tanto es así que no alcanzó el estado estable en el tiempo de monitoreo y cuando los demás especímenes habían alcanzado la relajación y estaban sobre el eje de las abscisas, la familia A1 estaba en un grado de polarización de alrededor de 100 mV de alcanzarlo. Cabe destacar el buen comportamiento alcanzado por las muestras de concreto reforzado en los tres tiempos (activa) tanto en grado de polarización como en tiempo de relajación (Figura 22), comparado con las muestras de concreto reforzado sin galvanizar.

Figura 22. Pulso galvanostático para el primer tiempo de exposición (120 días).



Fuente: autores del proyecto.

Figura 23. Pulso galvanostático para el segundo tiempo de exposición (150 días).

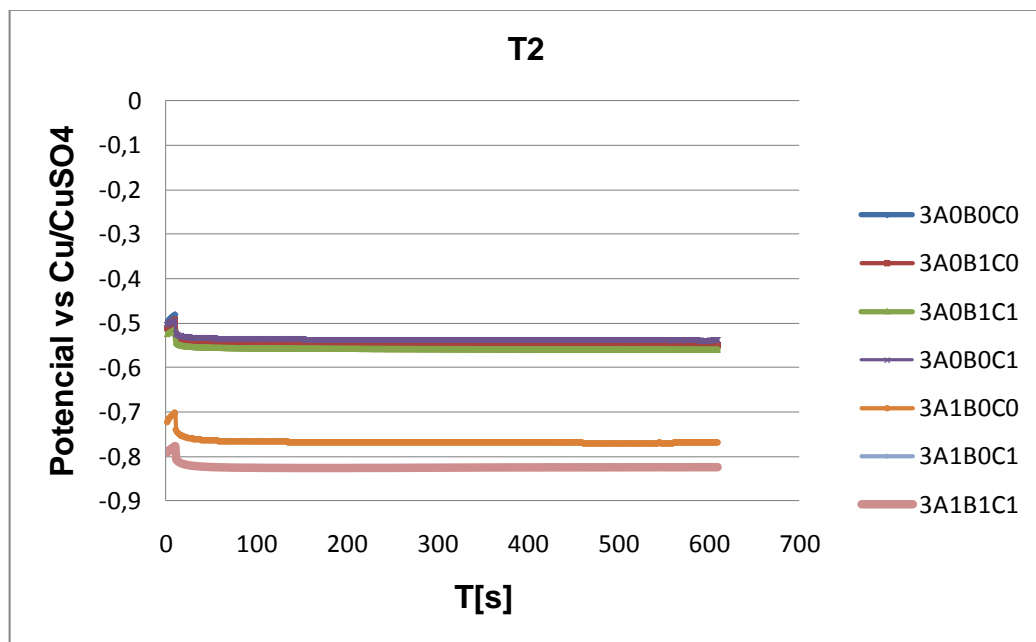


Fuente: autores del proyecto.

En la figura 23 se puede observar la similitud en el comportamiento alcanzado por los electrodos de acero ante la excitación galvánica. Sin embargo, se desarrolla en una escala inferior tanto en grado de polarización alcanzado como en tiempo de relajación de la muestra.

Las probetas denominadas A1( galvanizadas) alcanzaron un grado de polarización de -900mV registrando una pérdida de -100 mV, comparada con la gráfica de la figura 22; las muestras tipo A0 (sin galvanizar) en esta ocasión presentaron una diferencia de grado de polarización de -100 mV, siendo a su vez los especímenes tipo A0 los que alcanzaron más bajo grado de polarización, esto último era esperado, dado que se había sido previsto por la metodología y el análisis de las otras pruebas electroquímicas tales como EIS, LPR y el potencial de corrosión OCP, confirmándose una vez más la efectividad de la técnica de pulso galvanostático en la evaluación morfológica de las muestras. Finalmente a los 180 días de exposición de las muestras y revisando los anteriores valores, se reflejan las pérdidas de resistencia a la polarización soportadas por los aceros de refuerzo al sufrir detrimento de propiedades en el material protector como lo es el concreto para el acero.

Figura 24. Pulso galvanostático para el tercer tiempo de exposición (180 días).

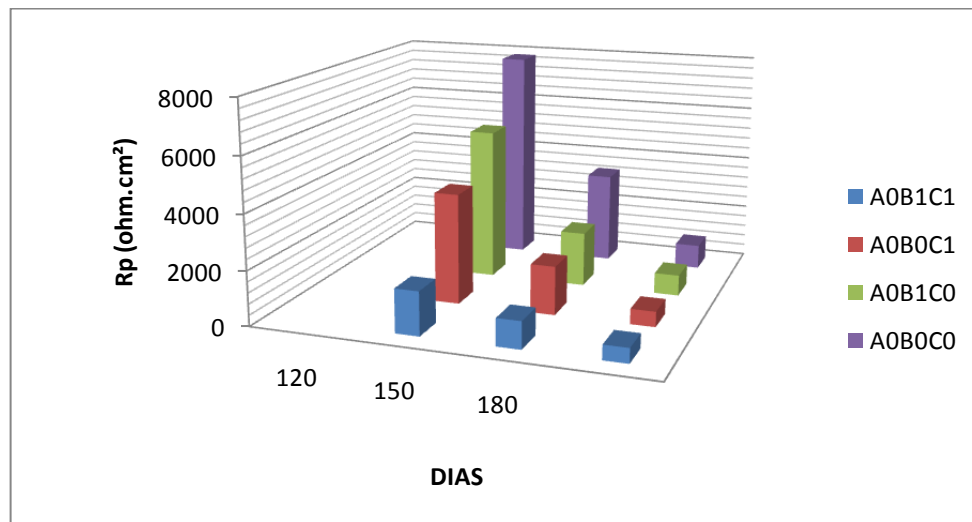


Fuente: autores del proyecto.

En la figura 24 se puede observar como decaen las propiedades de durabilidad ante la corrosión, donde al final del período de monitoreo, las probetas A1 (galvanizadas) alcanzaron un grado de polarización de entre -700 y -800 mV comparado con los -900 mV obtenidos en los tiempos anteriores (figuras 22 y 23). El caso más crítico registrado por pulso galvanostático es, como era de esperarse, para las muestras A1 (galvanizadas) durante el tercer tiempo de exposición (180 días). Esta condición representa la peor situación de durabilidad alcanzada por las probetas, y la técnica de pulso se ajusta perfectamente a los resultados en cuanto al comportamiento ante la corrosión del acero de refuerzo, reflejando elevado estado de deterioro de estos especímenes comparado con los tiempos T1 (120 días) y T2 (150 días).

El análisis morfológico de las gráficas solamente permite obtener ciertas conclusiones como las antes expuestas en cuanto a grado de polarización alcanzado y tiempo de relajación, para determinar de manera preliminar y cualitativa el estado del electrodo por el método de pulso galvanostático.

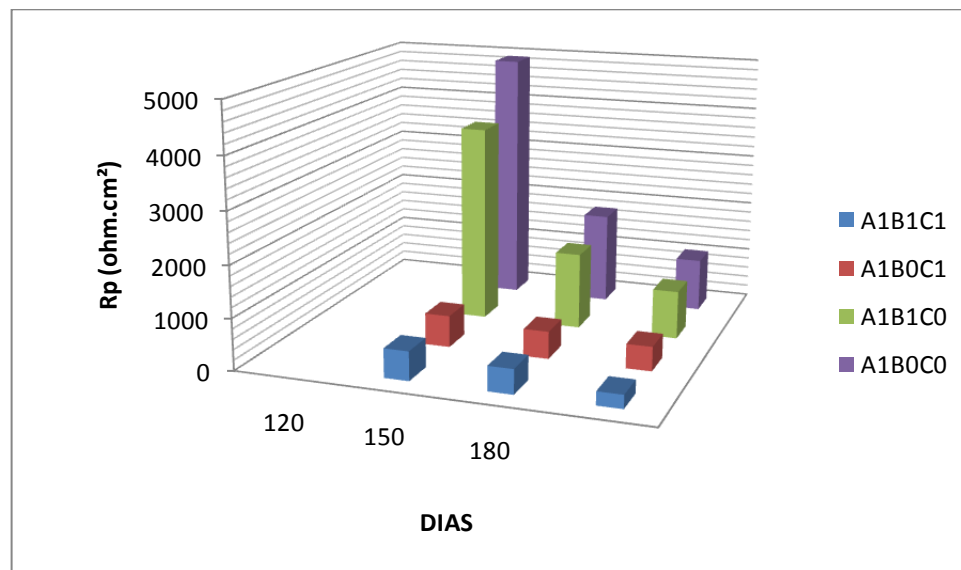
Figura 25. Rp obtenidos por la técnica de pulso galvanostático. Especímenes sin galvanizar



Fuente: autores del proyecto.

El parámetro morfológico no es fácil ni adecuado para cuantificar en forma exacta el estado de deterioro en pulso para la toma de decisiones y se requiere de ajustes de circuitos equivalentes para evitar errores de interpretación. Lo positivo de este análisis es que permite dejar ver la factibilidad del método conforme a lo esperado en las probetas ante el ataque por cloruros y carbonatos. Es por esto que se es necesario hacer una evaluación en cuanto a parámetros analizados por esta técnica tales como  $R_p$ , (tablas en el anexo D.4), mostrados en las figuras 24, 25 y 26, las cuales demuestran perfectamente el comportamiento del rápido deterioro de la capa de galvanizado (cinc), permitiendo ver que en los especímenes con acero sin galvanizar los valores de  $R_p$  ( anexo D.4) comparados con los valores de  $R_p$  de la técnica RPL se muestran un poco más bajos pero presentando la misma tendencia: la capa de galvanizado se corroe con altos valores, dejando desprotegida la varilla de acero, tendencia que se muestra en las Figuras ( 25 y 26).

Figura 26.  $R_p$  obtenidos por la técnica de pulso galvanostático. Especímenes con acero galvanizado.



Fuente: autores del proyecto.

**3.3.5 Comparación de los resultados obtenidos mediante las técnicas electroquímicas EIE, RPL y PG.** Se observa que existen grandes diferencias tanto en los valores como en sus magnitudes, al comparar los valores de las  $R_p$  obtenidos por LPR se observa que estos valores son mayores que los obtenidos por EIE y por GPM. En la técnica LPR esto se debe a que se toma en cuenta la resistencia presentada por el concreto que recubre el electrodo lo que incrementa el valor real del  $R_p$ , haciendo que esta técnica no sea tan confiable al utilizarla, pero si muestra, al igual que la técnica OPC, un dato cualitativo de lo que ocurre en la superficie del acero.

Con los datos obtenidos por la técnica EIS se observa una disminución de los valores de  $R_p$ , ya que se logra separar la resistencia del recubrimiento con la de la capa formada en el electrodo, esta técnica es efectiva, ya que utiliza bajas frecuencias por lo que detecta la resistencia de la capa formada en el electrodo obteniendo valores de  $I_{corr}$  más precisos.

Las técnica GPM permite estimar una densidad de corriente de corrosión muy precisa y de manera rápida ya que el grado de error es mínimo en comparación con LPR, no es muy sensible al medio de trabajo, y no es tan compleja como lo es la técnica EIE, por lo cual se ha convertido en la técnica más factible para hacer utilizada en la detección de daños por corrosión en armaduras de concreto.

### **3.4 INSPECCIÓN VISUAL**

La inspección visual se estima como un método válido para detectar la mayor parte de las posibles degradaciones del acero de refuerzo y por supuesto del hormigón. Sin embargo, tiene sus limitaciones debido a que puede no haber signos externos, además de tener una fuerte dependencia del juicio del operador y, también se hace un ataque destructivo a la probeta, por tal motivo este procedimiento se realizó después de haberle concluido todos los ensayos requeridos en la presente investigación.

**3.4.1 Características visuales.** Los resultados de inspección visual son una prueba del estado real de los especímenes. En caso de existir manchas, desgaste del refuerzo, concreto deteriorado, productos de corrosión o picaduras, sería la evidencia física de la existencia de corrosión en el acero, por esta razón los especímenes fueron inspeccionados periódicamente durante el transcurso de la experimentación, un resumen de este registro se presenta en la tabla 14, figura 27 y adicionalmente en el anexo E se puede apreciar el registro fotográfico.

Para el primer tiempo (T1, 120 días) de experimentación el espécimen con refuerzo sin galvanizar, se encontró en términos generales en buen estado de acuerdo a la inspección visual (solo presentaban inicios poco relevante de problemas de corrosión), a pesar de clasificarse con corrosión severa (en función de su  $E_{corr}$ ) y tener una densidad de corrosión mayor a  $1\mu A/cm^2$ . Por el contrario, los especímenes con refuerzo galvanizado tenían la evidencia física un poco más notable del deterioro causado por los problemas de corrosión de la capa de cinc (una capa de productos corrosivos de colores blancos y grisáceos), esto ratificaba los resultados obtenidos en las pruebas electroquímicas.

Para los resultados de inspección visual en los tiempos T2 y T3 de experimentación, se observa que todos los especímenes (tanto los probetas de concreto reforzado galvanizado como las de sin galvanizar A0 y A1 respectivamente, a diferentes concentraciones de carbonatos (B0 y B1) y cloruros (C0 y C1)) tienen problemas de corrosión, iniciando con manchas, productos de corrosión o daño ya sea en la interface acero/concreto o en la varilla de refuerzo.

Generando una tendencia de mayor degradación las varillas galvanizadas sobre las sin galvanizar, también se puede notar que el daño por corrosión es más elevado en las probetas de mayor concentración de cloruros y carbonatos (predominando los cloruros), este efecto se presenta en los dos tipos de refuerzo.

Lo anterior valida los resultados obtenidos de las pruebas electroquímicas en las que se presenta la misma tendencia y a de mas todos los especímenes tienen un valor de  $E_{corr}$  mayor a  $-350\text{mV}$  y  $I_{corr}$  superior a  $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , quedaron clasificados con corrosión severa.

En el momento de retirar la capa generada por los productos de corrosión de las varillas de acero de refuerzo, se deja en evidencia el fuerte daño presente en los especímenes del tipo A0 (acero sin galvanizar), ya que no solo se aprecia la corrosión generalizada sino que también picaduras y con profundidades apreciable a simple vista. Caso contrario sucede en las varillas de la familia A1 (acero galvanizado), que a pesar de observarse una capa considerable de productos de corrosión procedentes de la capa galvanizada, en el momento de retirarla se deja al descubierto el acero en buen estado.

Lo anterior permite deducir, que las armaduras galvanizadas pueden resistir niveles de carbonatos y cloruros superiores a los de armaduras convencionales y retrasar el tiempo de iniciación de la corrosión de 4 a 5 veces, lo que supone un aumento considerable de su vida útil. Además de este retardo en el inicio de la corrosión, los productos que se forman en la corrosión de armaduras galvanizadas por efecto de los cloruros y carbonatos no tienen carácter expansivo, por lo que durante el tiempo que el galvanizado se va consumiendo el acero se mantiene sin daño. Sin embargo, en soluciones de alta concentración de cloruros, el riesgo de corrosión por picaduras aumenta en el sustrato de cinc como consecuencia de que no existe capa pasiva y el acero muestra una velocidad de corrosión mayor. Para evitar este problema en una estructura galvanizada es necesario tener presente tres parámetros que parecen determinar el proceso de corrosión de los refuerzos galvanizados, estos son: el tipo de concreto, el tipo de estructura metalográfica del revestimiento galvanizado y la humedad relativa, si se hace un adecuado estudio y control de los anteriores parámetros se puede afirmar que el proceso de

galvanizado es una buena alternativa en la protección de los daños generados por corrosión en el acero de refuerzo.

Tabla 14. Registro de las características en inspección visual.

CARACTERÍSTICAS VISUALES						
Tiempo	Espécimen	Manchas de corrosión	Desgaste del refuerzo	Concreto deteriorado	Productos de corrosión	Picadura
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>						
T1	1A0B0C0	X			X	
	1A0B1C0	X			X	
	1A0B1C1	X	X		X	
	1A0B0C1	X			X	
T2	2A0B0C0	X	X		X	X
	2A0B1C0	X	X		X	
	2A0B1C1	X	X		X	X
	2A0B0C1	X	X		X	X
T3	3A0B0C0	X	X	X	X	X
	3A0B1C0	X	X	X	X	
	3A0B1C1	X	X	X	X	X
	3A0B0C1	X	X	X	X	X
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>						
T1	1A1B1C0	X	X		X	
	1A1B0C0	X			X	
	1A1B0C1	X	X		X	
	1A1B1C1	X	X		X	
T2	2A1B1C0	X	X	X	X	
	2A1B0C0	X	X		X	
	2A1B0C1	X	X	X	X	X
	2A1B1C1	X	X	X	X	X
T3	3A1B1C0	X	X	X	X	
	3A1B0C0	X	X	X	X	
	3A1B0C1	X	X	X	X	X
	3A1B1C1	X	X	X	X	X

Fuente: autores del proyecto

Figura 27. Inspección visual del espécimen de pruebas en el  $t_2 = 180$  días.

a) Varillas de acero de refuerzo tipo A0 y A1



b) Probeta de concreto reforzado tipo A1



c) Probeta de concreto reforzado tipo A0



Fuente: autores del proyecto

En el anexo E se muestra claramente el daño en la interface acero/concreto causado por la corrosión del acero de refuerzo, ya que se puede observar desde manchas en la superficie del concreto, como consecuencia de la formación de productos de corrosión en la superficie del acero hasta productos de corrosión, que generan agrietamiento en dirección del acero de refuerzo. Con este registro de inspección visual se confirma el avanzado estado de corrosión en el que quedan clasificados los especímenes de acuerdo a sus valores de potenciales e intensidades de corrosión.

**3.4.2 Tipos de daño por corrosión.** El agrietamiento y desprendimiento del concreto que cubre las varillas de acero es lo que se conoce como daño por corrosión aunque se puede considerar que existe daño en las estructuras de

concreto reforzado, aún antes de que aparezcan grietas, ya que una vez despasivada la superficie del acero de refuerzo se pierde la adherencia entre las varillas y el acero por dos acciones simultáneas, la acumulación de productos de corrosión y la reducción en el diámetro del acero.<sup>39</sup>

La pérdida de adherencia causa el debilitamiento mecánico de puentes y estructuras aún antes de ser visible en forma de grietas, manchas café rojizas que se presentan cuando los productos de corrosión llegan hasta la superficie, es por eso que resulta de suma importancia poder detectar el daño a tiempo con el fin de tomar medidas precautorias.<sup>41</sup> Al realizar la respectiva inspección visual de los especímenes se presentaron los siguientes tipos de corrosión (Tabla 15).

Como resultado del análisis se puede observar que el tipo de daño que predomina en una varilla sin galvanizar es por picadura o localizada, mientras que el tipo de daño predominante en una varilla de acero galvanizada después de ser expuesta a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos es uniforme o generalizada durante los tres tiempos de exposición (0, 30, 60 días de exposición a diferentes concentraciones de cloruros y carbonatos).<sup>42</sup> Esto se debe precisamente a la despasivación del efecto galvanizado (cinc) de la varilla.

---

<sup>39</sup> GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; and FELIU, S. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, p. 257. 1995.

<sup>41</sup> CASTRO BORGES, Pedro, Op. Cit., p. 258

<sup>42</sup> GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; and FELIU, S., Op. Cit., p. 264.

Tabla 15: Tipos de corrosión.

TIPOS DE CORROSIÓN							
Tiempo	Espécimen	Por picaduras o localizada	En espacios confinados	Bajo tensión	Por corrientes de interferencia	Uniforme o generalizada	Corrosión galvánica
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>							
T1	1A0B0C0	X				X	
	1A0B1C0	X				X	
	1A0B1C1	X				X	
	1A0B0C1	X					
T2	2A0B0C0	X				X	
	2A0B1C0	X				X	
	2A0B1C1	X	X			X	
	2A0B0C1	X	X				
T3	3A0B0C0	X			X	X	
	3A0B1C0	X			X	X	
	3A0B1C1	X	X		X	X	
	3A0B0C1	X	X		X	X	
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>							
T1	1A1B1C0					X	X
	1A1B0C0					X	X
	1A1B0C1	X				X	X
	1A1B1C1	X				X	X
T2	2A1B1C0					X	X
	2A1B0C0					X	X
	2A1B0C1	X	X			X	X
	2A1B1C1	X	X			X	X
T3	3A1B1C0	X			X	X	X
	3A1B0C0	X			X	X	X
	3A1B0C1	X	X		X	X	X
	3A1B1C1	X	X		X	X	X

Fuente: autores del proyecto

Cabe hacer mención que cuando se analiza el proceso de corrosión en el concreto reforzado , es importante notar que se trata de un fenómeno extremadamente

complejo que se ve afectado por múltiples factores internos y externos tales como las propiedades del concreto al cual se le considera como un medio no homogéneo<sup>43</sup> y la humedad relativa del medio ambiente la cual nunca alcanza el estado estacionario,<sup>44</sup> entre otros, por lo tanto se debe esperar que el daño por corrosión se intensifique localmente en ciertas partes de la estructura y a cierto tipo de estructuras dependiendo de diversos factores como por ejemplo la porosidad del concreto, o en el caso del refuerzo dependiendo del recubrimiento que para esta investigación fue de cinc (galvanizado) esto se muestra por ejemplo cuando el tipo de daño por corrosión se da por espacios confinados como se observa en algunos especímenes: 2A1B0C1, 2A1B1C1, 3A1B1C1, vistos claramente en la tabla 15, por esta razón se hace de vital importancia realizar evaluaciones de rutina para detectar sitios donde se esté desarrollando la corrosión, preferentemente con técnicas no destructivas considerando que el concreto es una barrera física que impide la detección visual.<sup>45</sup>

Debido a la expansión volumétrica ocasionada por el aumento del diámetro del acero de refuerzo que visualmente se nota con facilidad en una varilla de acero galvanizada, al producirse despasivación y a las grietas formadas que conllevan al desprendimiento de la capa de concreto del refuerzo de acero se generan daños por corrosión en la interface acero-concreto, daños que se observan claramente al realizar un análisis visual, donde se aprecian productos de corrosión del cinc, manchas blancas grisáceas y grietas, generando así en el concreto una menor resistencia y acelerando la corrosión en el acero de refuerzo.

Es importante observar que los productos de corrosión generados en la interface acero-concreto por disolución y precipitación son conocidos como herrumbre y son

---

<sup>43</sup> GONZALEZ, J.A.; OTERO, E. and FELIU, S. Initial steps of corrosion in the steel/Ca (OH)<sup>2</sup> + Cl- system: the role of heterogeneities on the steel surface and oxygen supply, Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp. 33-40, 1993.

<sup>44</sup> SARRIA, J.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, Cement and Concrete Research, Vol. 29, p. 1249- 1259. 1999.

<sup>45</sup> GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; and FELIU, S., Op. Cit., p. 259

de naturaleza no adherente, además de ser porosos y con diferentes características de expansibilidad y solubilidad,<sup>46,47</sup> por último, estos precipitados crecen en forma de hojas considerándose como multicapa.<sup>48</sup>

---

<sup>46</sup> ALONSO, C.; CASTELLOTE, M. and ANDRADE, C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements, *Electrochimica Acta*, Vol.47, p. 3469-3481, 2002.

<sup>47</sup> CASCUDO, and HELENE, P. Mechanical behavior of the cover concrete related to the formation of reinforcement corrosion products. *Hormigón y Acero*, No. 214, 4o Trimestre 1999.

<sup>48</sup> COOK, D.C. Application of mössbauer spectroscopy to the study of corrosion. Accepted for publication in *Hyperfir Interactions* in June 2003.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron establecer que en un concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Esto se evidencia en los valores obtenidos de resistencia a la compresión, porque independientemente del frente generado se obtuvo un comportamiento estable de esta propiedad, a diferencia del daño ocasionado por cloruros en donde se observó que la resistencia a la compresión disminuye ligeramente a medida que aumenta el porcentaje de NaCl.

Las varillas de acero galvanizado embebidas en concreto expuestas a concentraciones altas de cloruros y carbonatos son susceptibles al daño por corrosión, comprobado al analizar los resultados de potencial, corriente y velocidades de corrosión. Sin embargo estos datos corresponden a los productos de corrosión procedentes de la capa galvanizada lo que permite concluir que este tipo de protección en las armaduras pueden resistir ambientes agresivos con niveles superiores a los de armaduras convencionales, lo que supone un aumento considerable de su vida útil, ya que durante el tiempo que el galvanizado se va consumiendo, la vida de la estructura se prolonga. La galvanización es por lo tanto beneficiosa en concreto carbonatado con la presencia de cloruros.

El aumento en la concentración de cloruros y carbonatos aumenta la velocidad de corrosión, debido al incremento de los valores de densidad de corriente y a la disminución de la resistencia a la polarización del sistema, así mismo, se comprobó que el agente contaminante que predomina en el daño por corrosión son los cloruros ya que el iones  $\text{Cl}^-$ , rompen la película pasiva, aumentan la corriente de disolución anódica y favorecen la disolución de los metales. Lo anterior estuvo en completo acuerdo con la tendencia global del comportamiento ante la corrosión de las familias investigadas, ordenadas en orden decreciente:

A1B1C1, A1B0C1, A1B1C0 Y A1B0C0, la misma tendencia se presentó en las varillas de la familia A0.

A concentraciones altas de cloruros y carbonato , se demuestra que el deterioro del recubrimiento galvanizado se ve influenciado por el picado, el cual es producido por los cloruros quienes difunden a través de la capa de productos de corrosión y del galvanizado integrándose uniformemente y concentrándose en estos puntos hasta romper las capas; esto sigue sucediendo a medida que se aumentan las concentraciones de los electrolitos, solo que a concentraciones más elevadas el deterioro se vuelve más localizado, hasta convertirse en una corrosión por picado, la cual resulta ser más severa.

Debido a la expansión volumétrica ocasionada por el aumento del diámetro del acero de refuerzo, y a las grietas formadas que conllevan al desprendimiento del recubrimiento de concreto, se generan daños por corrosión en la interface acero galvanizado-concreto, daños que se observan claramente al realizar un análisis visual, donde se aprecian productos de corrosión del cinc, manchas blancas grisáceas y grietas, generando así en el concreto una menor resistencia y acelerando la corrosión en el acero de refuerzo.

Una decisión para usar galvanizado por inmersión en caliente, o cualquier otro método complementario de protección de refuerzos en un ambiente agresivo particular, depende del balance entre ventajas técnicas y consideraciones económicas. El aumento esperado en la vida útil debe justificar el aumento en costos y el método de protección debe ser técnicamente disponible.

Las técnicas electroquímicas empleadas en la investigación: OCP, LPR, EIE y PG aportan información valiosa para estimar el grado de avance de la corrosión en las varillas embebida en concreto, con lo que es posible realizar diagnósticos

confiables que permitan tomar medidas adecuadas para la protección y mantenimiento pertinentes de estructuras de concreto armado. También es importante comprobar los resultados cuantitativos obtenidos mediante la electroquímica con una rigurosa inspección visual.

## 5. RECOMENDACIONES

Se hace necesario estudiar el periodo de curado del concreto mediante técnicas electroquímicas para determinar el tiempo al cual se alcanza la pasividad del refuerzo del concreto.

Efectuar ensayos a tiempos más prolongados, con el fin de determinar posibles cambios cinéticos en el comportamiento de una varilla de acero galvanizado en concreto reforzado a diferentes concentraciones de cloruros y carbonato.

## BIBLIOGRAFÍA

ACI Comité 222. Informe 222R. Protection of Metals in Concrete against Corrosion. American Concrete Institute. EUA. 2002

AGUILAR M. Rebeca. Determinación de la influencia de las Nano moléculas de Sílice en el Concreto frente a un factor que afecta su Durabilidad. Tesis para optar el Título en Ingeniería Civil en obras civiles, Universidad Austral de Chile. 2007.

ALATORRE GONZÁLEZ, Jesús y URIBE, Rafael. Agregados para concreto [en línea]. [Consultado el 5 de febrero del 2012, 8:00 a.m.]. Disponible en Internet: <URL: <http://es.scribd.com/doc/22864133/Agregados-Para-Concreto>>

ALONSO, C.; CASTELLOTE, M. and ANDRADE, C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements, Electrochimica Acta, Vol.47, p. 3469-3481, 2002.

ARIZA, Diana y ATUESTA, Javier. Evaluación del efecto de la relación agua/cemento, tamaño de agregado y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010

ASTM C 192 / C 192M.- Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.- American Society for Testing and Materials.-EUA. - 2000.

ASTM C 39 / C 39M.- Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. - American Society for Testing and Materials. - EUA. - 2001.

ASTM C876-91. Standar test method for half-cell potentials of reinforcing steel in concrete. Philadelphia, EE.UU, 1992. 12 p.

BALAGUERA REINA, Diego Armando y PORRAS ARÉVALO, Blanca Elizabeth. Evaluación del efecto de la carbonatación sobre el coeficiente de difusión del ion cloruro en concreto. Trabajo de Grado realizado para optar al título de Ingeniero(a) Metalúrgico(a), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2009

BARD, A, J. Electrochemical Methods. Fundamentals and applications, John Wiley & Sons 2002.

BERMÚDEZ ODRIOZOLA, Miguel Ángel. Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, octubre de 2007.

BLOQUE REGIONAL PARLAMENTO. Puerto de Bahía Málaga vuelve al debate regional [en línea]. En: Revista Acción. [Consultado el 10 de febrero del 2012, 9:35 a.m.]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.ccc.org.co/accion/103/k.html>>

CARRASCO, María Fernanda. Evaluación de estructuras de hormigón. Universidad Tecnológica Nacional. 2007.

CASCUDO, and HELENE, P. Mechanical behavior of the cover concrete related to the formation of reinforcement corrosion products. Hormigón y Acero, No. 214, 4o Trimestre 1999.

CASTRO BORGES, Pedro, Op. Cit., p. 258 El umbral de los cloruros para despasivar el acero de refuerzo, Criterios y resultados en el mundo. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Revista Construcción y Tecnología. México. Enero 2001.

COMITÉ EUROPÉEN DU BETON. Design Guide to Durable Concrete Structures. Thomas Therford Publishers. - G.9. - 1992.

COOK, D.C. Application of mössbauer spectroscopy to the study of corrosion. Accepted for publication in Hyperfinr Interactions in June 2003.

CUESTA, Harry y LUQUE, Héctor. Evaluación del efecto sobre la de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo sometido a fuego. Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.

DEL VALLE, Angélica et al. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001.

FRANCOIS R. y ARLIGUIE G. Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environment. ACI SP-145. American Concrete Institute. EUA. 1994

GONZÁLEZ, Francisco; ROCHA CHIU, Luis y FLÓRES, J. Antonio. Elaboración de concretos con agua tratadas. Ponencia presentada en el X Encuentro Nacional de la Industria del Concreto Premezclado por sus autores, quienes pertenecen a la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana.

GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; and FELIU, S. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement, Cement and Concrete Research, Vol. 25, p. 257. 1995.

GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; and FELIU, S., Op. Cit., p. 264. Y 259.

GONZALEZ, J.A.; OTERO, E. and FELIU, S. Initial steps of corrosion in the steel/Ca (OH)<sub>2</sub> + Cl<sup>-</sup> system: the role of heterogeneities on the steel surface and oxygen supply, Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp. 33-40, 1993.

GONZÁLEZ, J.A. On-site determination of corrosion rate in reinforced concrete structures by use of Galvanostatic pulses. Corrosion Science Vol. 43, 2001; p. 611-625.

HANSSON C.M. Concrete: The Advances Industrial Material of the 21st Century. Metallurgical and Materials Transactions A. Vol. 26 A. - EUA. - 1995.

HELENE, Paulo y PEREIRA, Fernanda. Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección.-CYTED.-Brasil.-Septiembre 2003. p.46.

HLADKI, K.; CALLOW, L. & LAWSON, J. L. Corrosion rates from impedance measurements: an introduction. British Corrosion Journal Vol. 15, 1980; p. 20-25

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Bogotá: ICONTEC. 2p. II. y 2p. II. 1995.

KONDRATOVA, I.L. Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements. Science Direct, Received 18 September 2001; accepted 29 September 2003.

LEE ORANTES, Francisco. Refuerzo-Protección en Estructuras de Concreto Dañadas por Corrosión, utilizando Fibras de Grafito como Protección Catódica. Tesis. Celaya, Gto., México.- 2005.

M. ANDRADE, M. C. ALONZO and J. A. GONZÁLEZ, Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, N. S. Berke, V. Chaker, and W. D. Whiting Eds., American Society of Testing and Materials, Philadelphia, 29, 1990.

MENA FERRER, Manuel.- Durabilidad de Estructuras de Concreto en México.- IMCYC.- Primera Edición.- México.- 2005. p. 31-32

MONTANI, Rick. La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Revista Construcción y Tecnología. México. Diciembre 2000.

NMX C 83.- Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto. Método de Prueba.- ONNCCE.- México.- 2002

QUIROS, Gilberto y SANTAMARIA, Ruth. Evaluación del efecto del ataque de sulfatos sobre concreto, mediante la técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Trabajo de grado [Ingenieros metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales. 2010.

RODRÍGUEZ S. William. Evaluación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto afectada por la acción de la corrosión en el refuerzo. Tesis de grado en la modalidad de investigación para optar al título de Ingeniero Civil, universidad industrial de Santander, 2009.

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. "Tecnología del concreto y del mortero". Bhandar Editores LTDA. 3ra Ed. Bogotá DC, Colombia. 1996.

SARRIA, J.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, Cement and Concrete Research, Vol. 29, p. 1249- 1259. 1999.

TORRES ACOSTA, A. A.- Período de iniciación de la Corrosión (T1) en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino.- Revista Internacional Construlink (RCI).- V.2, No. 5, Construlink.- ISSN 1645-576.- 2004.

TORRES C. Ana. Curso Básico de Tecnología del Concreto, Laboratorio de Ensayos de Materiales. Universidad Nacional de Ingeniería. 2004.

TROCÓNIS DE RINCÓN, Oladis y miembros de la Red DURAR. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.- CYTED. Tercera Edición.- Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000. p. 13-14

TROCÓNIS DE RINCÓN, Oladis. Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto, Proyecto XV.3, DURACON Documento 1.-CYTED.- Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000.

TUUTTI, K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Suecia. 1982.

VÁZQUEZ, Marcela y FERNÁNDEZ, Raúl. Revistas Ciencia Hoy en Línea.- Volumen 14- N°82.- Mar de Plata, Argentina.- Agosto-Septiembre 2004.

## ANEXOS

### Anexo A. Teoría Diagramas de Nyquist y Bode

#### A.1 DIAGRAMA DE NYQUIST

Una forma de mostrar cómo se comporta un sistema sobre un intervalo de frecuencias angulares es trazar los datos de la respuesta para el sistema en un diagrama de Nyquist. El diagrama de Nyquist es una gráfica de la magnitud de  $W(j\omega)$  contra el ángulo de fase de  $W(j\omega)$  en coordenadas polares, conforme varía de cero a infinito.

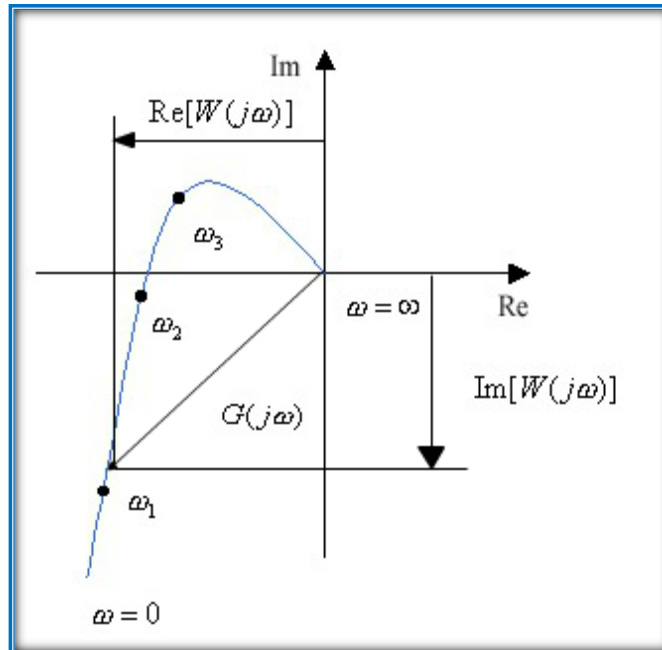
Por lo tanto el diagrama de Nyquist es el lugar geométrico de los vectores  $|W(j\omega)| \angle W(j\omega)$  conforme  $\omega$  varía de cero a infinito. El diagrama de Nyquist también se denomina traza o curva polar.

La magnitud  $|W(j\omega)|$  y el ángulo de fase  $\angle W(j\omega)$  deben calcularse directamente para cada frecuencia con el propósito de construir el diagrama de Nyquist.

Sin embargo dado que es fácil construir diagramas de bode asintóticos, los datos necesarios para graficar la traza polar deben obtenerse directamente del diagrama de Bode.

O bien, por supuesto, puede usarse MATLAB para obtener una traza polar  $W(j\omega)$ , de forma precisa para diversos valores de  $\omega$  en el rango de frecuencias que interesa. VENTAJA: En una sola gráfica se puede ver la respuesta en frecuencia de un sistema en el rango de frecuencias completo.

**Figura 28:** Ejemplo diagrama de Nyquist



Fuente: <http://usuarios.multimania.es/automatica/temas/tema5/pags/nyquist/intro.htm>

## A.2 DIAGRAMA DE BODE

Una función de transferencia puede representarse mediante dos gráficas distintas: una que ofrece el logaritmo de la ganancia, y otra que muestra el ángulo de la fase (en grados) contra la frecuencia en escala logarítmica. Estas gráficas son conocidas como el Diagrama de Bode, herramienta esencial en el análisis de frecuencias. Se trata de una representación frecuencial mediante dos curvas en función de la frecuencia en escala logarítmica. La primera es la relación de amplitudes  $G(\omega) [dB]$  y la segunda el ángulo de fase  $\varphi(\omega) [^\circ]$

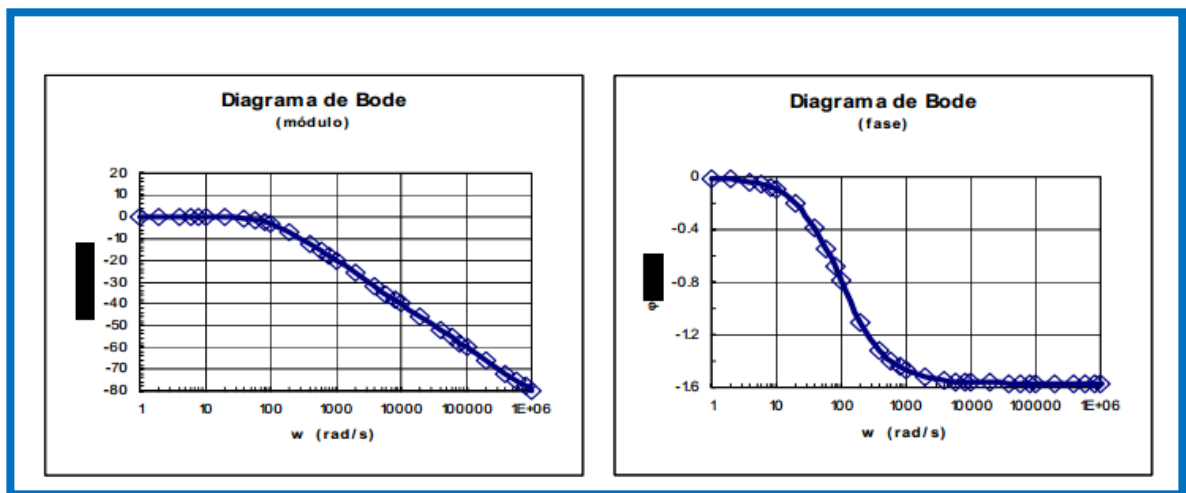
### Características:

- Se parte de la notación polar  $W(j\omega) = G \angle \varphi$  Se trabaja con ganancias logarítmicas  $G [dB] = 20 \cdot \log G$
- El ángulo de fase en grados  $\varphi = \angle G(j\omega) [^\circ]$

- El diagrama se hace a partir del trazado de las formas canónicas ya que la notación polar se puede descomponer  $G\angle\varphi = G_1\angle\varphi_1 \cdot G_2\angle\varphi_2 \cdot \dots \cdot G_x\angle\varphi_x$ , lo que facilita el trazado del diagrama.

El proceso de obtener la traza logarítmica se simplifica todavía más mediante aproximaciones asintóticas para las curvas de cada factor.

**Figura 29:** Ejemplo Diagrama de Bode



Fuente: <http://www.ugr.es/~jmolin/files/elaboraciondediagramasdebode.pdf>

## Anexo B. Descripción de los equipos empleados durante la elaboración del proyecto.

### B.1 Máquina de resistencia a la compresión

El equipo marca AMSLER, ubicado en el Centro de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil, es una máquina que permite realizar ensayos de resistencia a la compresión aplicando una carga axial en un rango de 5 a 80 toneladas. (Figura 30)

**Figura 30.** Máquina para medir resistencia a la compresión.

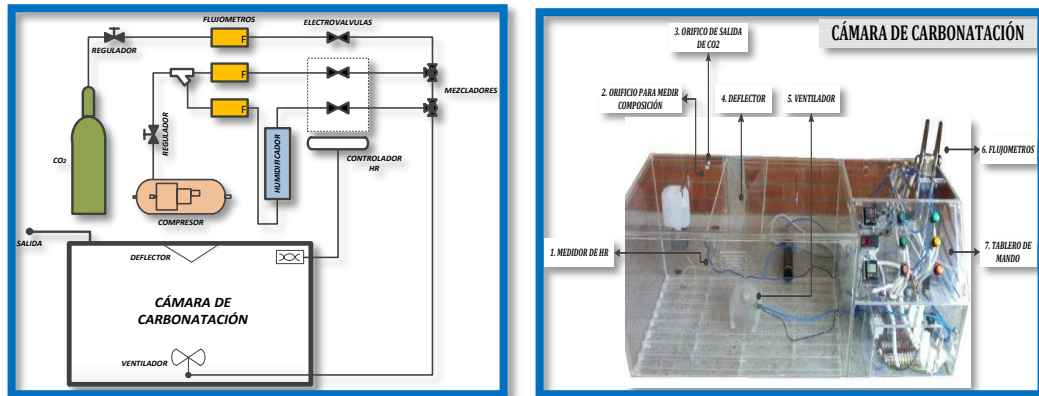


Fuente: autores del proyecto.

### B.2 Cámara de carbonatación

Para el estudio del proceso de carbonatación se utilizó un equipo que acelera artificialmente la velocidad de reacción por medio del aumento de la concentración de dióxido de carbono en una atmósfera controlada. La cámara de carbonatación es un sistema capaz de simular, mantener condiciones estables y constantes de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono.

**Figura 31.** Esquema de la cámara de carbonatación. **Figura 32.** Cámara de carbonatación



Fuente: autores del proyecto.

**Figura 33.** Otros componentes de la cámara de carbonatación.



Fuente: autores del proyecto.

En las figuras 31, 32 y 33 se muestran el esquema de la cámara de carbonatación y fotografías de la misma con sus partes constitutivas.

### B.3 Balanza electrónica

La balanza electrónica (Mettler PB 3002) hace parte de los equipos del grupo de investigación en corrosión (GIC) de la escuela de Ingeniería de metalúrgica y está ubicado en la sede de Guatiguará.

**Figura 34:** balanza electrónica



Fuente: autores del proyecto.

#### **B.4 Potenciostato GAMRY y sistema de cómputo**

Para las pruebas electroquímicas realizadas en la presente investigación se empleó un Potenciostato/Galvanostato marca GAMRY (Software Gamry Reference 600) ver figura 35, el cual se encuentra en las instalaciones del laboratorio (GIC) de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica ubicado en la Sede Guatiguará y ha sido utilizado en la evaluación de concretos.

**Figura 35.** Potenciostato GAMRY



Fuente: autores del proyecto.

### 3.3.5 Electrodo cobre – sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>).

Este equipo (fue el electrodo de referencia a usar en el momento de realizar las pruebas electroquímicas), hace parte del inventario del grupo de investigación en corrosión (GIC), ubicado en Guatiguará.

**Figura 36.** Electrodo cobre – sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>).



Fuente: autores del proyecto.

## Anexo C. Selección y caracterización de los materiales

### C.1 CEMENTO

Figura 37: Reporte de calidad del cemento.

CEMEX COLOMBIA S.A., PLANTA BUCARAMANGA			
		Km 4 Via Rio Negro Bucaramanga Colombia TEL (097) 6402600 / 31714, FAX (097) 6402599 / 31714	
<b>REPORTE DE CALIDAD</b>			
Referencia: CEMENTO PORTLAND TIPO 1 Reporte No. 2008BG-T1-40-01 Semana No. 40 Cemento despachado del 30 - 6 de Octubre 08 Fecha: 14-11-2008			
Análisis Químicos	Resultados	Requisitos Norma NTC 321	Observaciones
% SO <sub>3</sub>	2.31	Máximo 3.5	Cumple
% MgO		Máximo 7.0	Cumple
Análisis físicos		Requisitos Norma NTC 121	Observaciones
Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4113	Mínimo 2800	Cumple
Tiempos de fraguado Vicat (minutos)			
Inicial	119	Mínimo 45	Cumple
Final	179	Máximo 480	Cumple
Expansión en autoclave (%)	0.0025	Máximo 0.80	Cumple
Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )			
3 días	165	Mínimo 80	Cumple
7 días	210	Mínimo 150	Cumple
28 días	264	Mínimo 240	Cumple
Observaciones: El cemento analizado cumple con la totalidad de los requisitos obligatorios establecidos para el cemento Portland Tipo 1 por las Normas NTC 121 y NTC 321. El presente reporte corresponde exclusivamente al cemento de la referencia y no a otros lotes de cemento de la misma procedencia.			
 Maria Claudia Canvajal Cabeza Coordinador Aseguramiento de Calidad			

Fuente: CEMEX Colombia S.A

## C.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS.

**Tabla 16:** Gravedades Específicas del Agregado.

<b>GRAVEDADES ESPECIFICAS</b>		
	<b>Agregado Fino</b>	<b>Agregado Grueso</b>
<b>Real</b>	2,783	2,703
<b>Aparente</b>	2,568	2,623
<b>Aparente s.s.s</b>	2,645	2,652
	<b>Agregado Fino</b>	<b>Agregado Grueso</b>
<b>Peso unitario suelto</b>	1374,84 kg/m <sup>3</sup>	1407,29 kg/m <sup>3</sup>
<b>Peso unitario compactado</b>	1585,77 kg/m <sup>3</sup>	1556,97 kg/m <sup>3</sup>
<b>Absorción %</b>	1.514	1,133
<b>Porcentaje de vacíos %</b>	40,046	41,291

**Tabla 17:** Análisis Granulométrico del Agregado Fino.

<b>GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO</b>				
<b>TAMIZ</b>	<b>Peso retenido [g]</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Que pasa</b>
4	37,10	3,71	3,71	96,29
8	51,80	5,18	8,89	91,11
16	92,00	9,20	18,09	81,91
30	196,30	19,63	37,72	62,28
50	359,20	35,92	73,64	26,36
100	176,70	17,67	91,31	8,69
<b>FONDO</b>	84,90	8,49	99,80	0,20
<b>TOTAL</b>	998,00	99,80	<b>PESO MUESTRA</b>	1000 gramos
<b>MODULO DE FINURA: 2,3</b>				

**Tabla 18:** Análisis Granulométrico del Agregado Grueso.

<b>GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO</b>				
<b>TAMIZ</b>	<b>Peso retenido [g]</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Que pasa</b>
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	2122,00	30,31	30,31	69,69
3/8"	2034,00	29,06	59,37	40,63
No. 4	2844,00	40,63	100,00	0,00
<b>FONDO</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>TOTAL</b>	7000		<b>PESO MUESTRA</b>	7000 gramos
<b>TAMAÑO MÁXIMO: 3/4"</b>				

Fuente: autores del proyecto.

### C.3 AGUA

Tabla 19: Reporte de calidad del agua.

MUNICIPIO:		BUCARAMANGA		AÑO:		2008		Parámetros Físicoquímicos							
PARAMETROS	MES	No. Muestras Físicoquímicas	Cloro residual mg Cl <sub>2</sub> /L	Turbiedad UNT	Color Aparente UPC	pH Unidades	Clor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg Al/L	Alcalinidad mg CaCO <sub>3</sub> /L	Dureza mg CaCO <sub>3</sub> /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO <sub>4</sub> /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO <sub>3</sub> /L	Nitritos mg NO <sub>2</sub> /L
		<i>Enero</i>	90	0,98	0,79	4,1	7,36	0	0,06	51,1	64,6	3,1	22,7	0,09	1,4
<i>Febrero</i>	87	0,93	1,1	4,6	7,29	0	0,06	50,3	66,4	3,6	24,8	0,07	1,3	0,00	
<i>Marzo</i>	90	0,97	1,7	9,0	7,28	0	0,09	47,5	63,1	2,7	22,0	0,16	1,5	0,00	
<i>Abril</i>	90	0,88	0,94	5,0	7,16	0	0,06	42,8	63,3	3,0	27,1	0,08	1,4	0,00	
<i>Mayo</i>	93	0,99	1,7	11,3	7,12	0	0,17	41,6	65,8	2,5	32,5	0,15	2,0	0,00	
<i>Junio</i>	90	1,03	1,1	5,8	7,23	0	0,10	45,1	59,8	2,4	24,6	0,12	1,7	0,00	
<i>Julio</i>	93	0,98	1,1	2,5	7,33	0	0,08	45,1	60,1	2,7	21,6	0,10	1,7	0,00	
<i>Agosto</i>	93	1,01	1,2	3,2	7,27	0	0,07	48,0	64,4	2,7	22,3	0,07	1,9	0,00	
<i>Septiembre</i>	90	1,09	1,3	3,4	7,12	0	0,11	40,9	58,8	3,3	25,2	0,06	1,4	0,00	
<i>Octubre</i>	93	1,07	1,1	3,1	7,10	0	0,08	42,6	60,9	2,3	26,0	0,03	1,9	0,00	
<i>Noviembre</i>	90	1,03	1,5	8,6	7,17	0	0,13	47,2	75,1	2,6	31,3	0,09	2,1	0,00	
<i>Diciembre</i>	90	1,00	1,1	6,0	7,28	0	0,11	42,7	56,5	2,0	19,2	0,08	2,1	0,00	
<b>PROMEDIO</b>	91	1,00	1,2	5,6	7,23	0	0,09	45,4	63,2	2,7	24,9	0,09	1,7	0,00	
<b>RES. 2115/07</b>	3/día	0,3-2,0	2	15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	

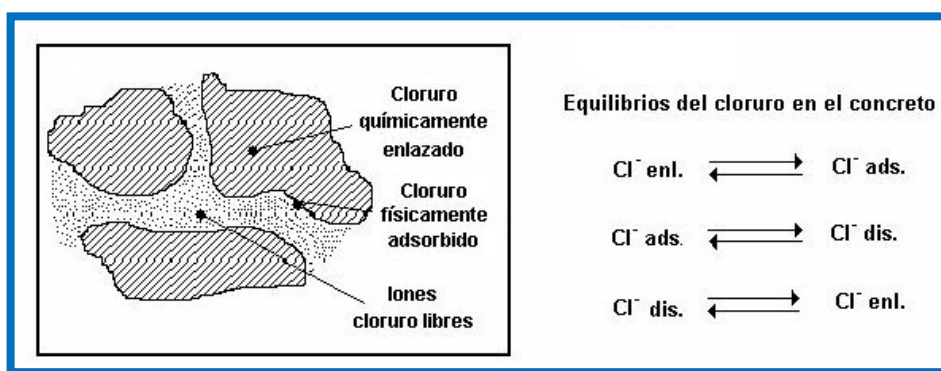
Fuente: www.amb.com.co

## Anexo D. Tablas Figuras y Resultados

### D.1 Ensayo de fenolftaleína

La figura 38 ilustra los tres casos del ion cloruro presente en el concreto, e indica los equilibrios que se establecen para los cloruros en el concreto.

**Figura 38.** Equilibrios del ion cloruro en el concreto



Fuente: Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001

### D.2 Medidas de potencial de circuito abierto (OCP).

**Tabla 20.** Potenciales de corrosión para diversos electrodos de referencia.

Lecturas en milivolts				Condición de corrosión.
Cu / CuSO <sub>4</sub>	Ag / AgCl	ENH	Calomel (Hg/HgCl)	
> -200	> -106	> +116	> -126	Bajo (10% riesgo de corrosión).
-200 a -350	-106 a -256	+116 a -34	-126 a -276	Intermedio riesgo de corrosión.
<-350	<-256	<-34	<-276	Alto >90% riesgo de corrosión.
<-500	<-406	<-184	<-426	Corrosión severa.

Fuente: ASTM C 876

**Tabla 21.** Potenciales de corrosión OCP Probetas sin galvanizar.

PROBETAS SIN GALVANIZAR	POTENCIALES DE CORROSIÓN $E_{corr}$ [mV]		
	120 Días	150 Días	180 Días
Espécimen			
A0B0C0	-436,5	-509,4	-551,3
A0B1C0	-355,4	-443,4	-550,1
A0B1C1	-420,2	-483,5	-549
A0B0C1	-400,5	-472,8	-537,5

Fuente: autores del proyecto

**Tabla 22.** Potenciales de corrosión OCP Probetas galvanizadas.

PROBETAS GALVANIZADAS	POTENCIALES DE CORROSIÓN $E_{corr}$ [mV]		
	120 Días	150 Días	180 Días
Espécimen			
A1B1C0	-750,3	-737,9	-734,5
A1B0C0	-717,1	-724,3	-800,4
A1B0C1	-1000,1	-904,1	-800,4
A1B1C1	-986,8	-910	-835,6

Fuente: autores del proyecto

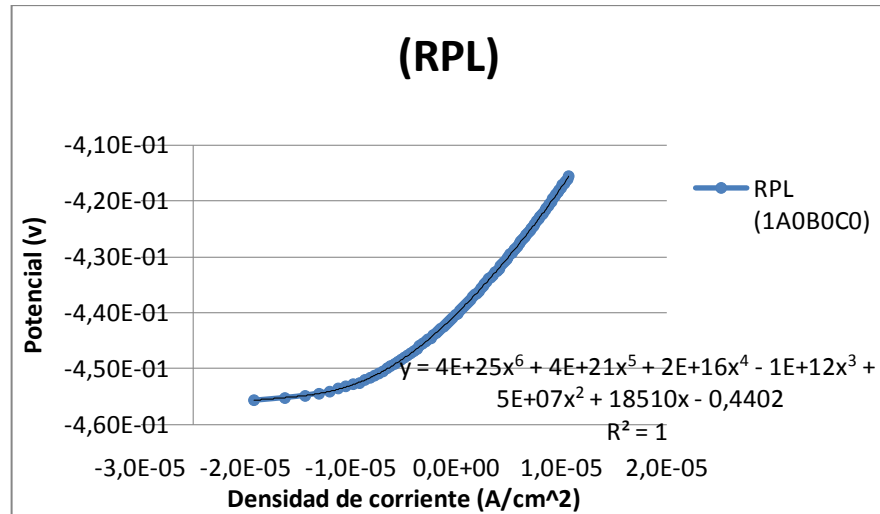
### **D.3 Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).**

Para poder determinar el valor de  $R_p$  en las gráficas de RPL fue necesario agregar una línea de tendencia a la curva.

- Se realiza un gráfico de potencial vs. densidad de corriente.
- Se realiza una regresión mediante un polinomio de grado seis de dicha curva (el grado seis es lo corresponde al mejor).
- Se obtiene el valor de la resistencia de polarización de la fórmula del polinomio, como el coeficiente de grado 1.
- Se calcula el valor de densidad de corriente dividiendo una Cte., de un valor de  $B = 52$  mV, respecto de la resistencia de polarización.

- Ahora teniendo en cuenta de que  $R_p = dE/di$  cuando  $i = 0$  se tiene la ecuación de la línea de tendencia que se muestra en la gráfica de RPL al derivarla  $dy/dx$  e igualarla a  $R_p$  va a quedar que el valor de  $R_p = 18510$  como lo muestra la gráfica 39.

**Figura 39.** Valores de Resistencia a la Polarización Lineal.



Fuente: autores del proyecto.

**Tabla 23** Interpretación de los valores de densidad de corrosión.

$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$i_{corr} \times 0.0116$ (mm/año)	Grado de Corrosión
< 0.1	< 0.00116	Despreciable
0.1 - 0.5	0.00116 - 0.0058	Moderado
0.5 - 1	0.0058 - 0.0116	Elevada
> 1	> 0.0116	Muy elevada

Tiempo de corrosión	
Corrosión no esperada	$i_{corr} < 0.2 \mu Acm^{-2}$
Corrosión posible en 10-15 años	$i_{corr}$ 0.2 a $1 \mu Acm^{-2}$
Corrosión esperada de 2 - 10 años	$i_{corr}$ 1 a $10 \mu Acm^{-2}$
Corrosión alta esperada en 2 años o menos	$i_{corr} > 10 \mu Acm^{-2}$

Fuente: Broomfield, 1997

#### D.4 Pulso Galvanostático

Parámetros obtenidos por la técnica de pulso galvanostático para los diferentes tipos de mezcla.

**Tabla 24.** Parámetros obtenidos por la técnica de pulso galvanostático en el primer tiempo de exposición (120 días).

<b>T0</b>				
<b>ESPECIMEN</b>	<b>Rp (ohm.cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cdl (μF/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>T(s)</b>	<b>Icorr (μA/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>				
<b>A0B1C1</b>	1602,600	77374,267	124	16,224
<b>A0B0C1</b>	4050,500	36291,816	147	6,419
<b>A0B1C0</b>	5571,600	41280,781	230	4,667
<b>A0B0C0</b>	7836,000	23481,368	184	3,318
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO GALVANIZADO</b>				
<b>A1B1C1</b>	562,800	506396,588	285	46,198
<b>A1B0C1</b>	614,850	442384,321	272	42,287
<b>A1B1C0</b>	3841,500	41910,712	161	6,768
<b>A1B0C0</b>	4915,500	16478,486	81	5,289

Fuente: autores del proyecto.

**Tabla 25.** Parámetros obtenidos por la técnica de pulso galvanostático en el segundo tiempo de exposición (150 días).

<b>T1</b>				
<b>ESPECIMEN</b>	<b>Rp (ohm.cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cdl (μF/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>T(s)</b>	<b>Icorr (μA/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>				
<b>A0B1C1</b>	996,050	106420,360	106	26,103
<b>A0B0C1</b>	1779,900	54497,444	97	14,608
<b>A0B1C0</b>	2001,050	42977,437	86	12,993
<b>A0B0C0</b>	3356,600	28600,369	96	7,746
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO GALVANIZADO</b>				
<b>A1B1C1</b>	476,000	100840,336	48	54,622
<b>A1B0C1</b>	531,500	144873,001	77	48,918
<b>A1B1C0</b>	1489,500	55052,031	82	17,456
<b>A1B0C0</b>	1784,500	37545,531	67	14,570

Fuente: autores del proyecto.

**Tabla 26.** Parámetros obtenidos por la técnica de pulso galvanostático en el tercer tiempo de exposición (150 días).

<b>T2</b>				
<b>ESPECIMEN</b>	<b>Rp (ohm.cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cdl (μF/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>T(s)</b>	<b>Icorr (μA/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR</b>				
<b>A0B1C1</b>	539,000	306122,449	165	48,237
<b>A0B0C1</b>	557,700	195445,580	109	46,620
<b>A0B1C0</b>	761,650	156239,743	119	34,136
<b>A0B0C0</b>	890,100	121334,681	108	29,210
<b>PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO GALVANIZADO</b>				
<b>A1B1C1</b>	260,600	376055,257	98	99,770
<b>A1B0C1</b>	471,150	229226,361	108	55,184
<b>A1B1C0</b>	937,000	110992,529	104	27,748
<b>A1B0C0</b>	1029,900	98067,774	101	25,245

Fuente: autores del proyecto.

#### **D.5 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE).**

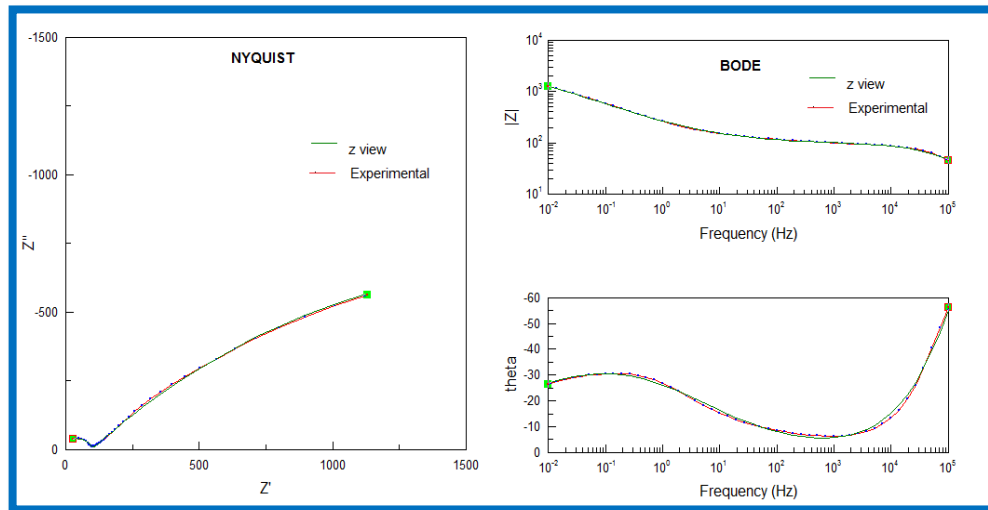
A través de esta prueba electroquímica se pueden encontrar los diagramas de Nyquist y Bode para los especímenes, estas gráficas dan un indicio cualitativo del estado en el que se encuentra el acero en cada uno de los especímenes para así determinar a través del tiempo si está en estado de pasivación o en estado activo. A continuación se muestran las tablas obtenidas mediante la simulación en el software Zviewy posteriormente se encuentran las gráficas de Nyquist y Bode en el tiempo de ciclos de inmersión.

**Tabla 27.** Valores de resistencias, densidades y capacitancias para los especímenes sin galvanizar a diferentes tiempos, mediante la simulación en el software Zview.

PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR						
TIEMPO	ESPECIMEN	Rs (Ohm*cm <sup>2</sup> )	CPE (F)		Rp (Ohm*cm <sup>2</sup> )	Icorr (μA/cm <sup>2</sup> )
			CPE-T	CPE-P		
T0	1A0B1C1	41,420	0,008	0,356	571,000	45,534
	1A0B0C0	121,610	0,002	0,462	3528,000	7,370
T1	2A0B1C1	37,400	0,014	0,267	322,000	80,745
	2A0B0C0	60,290	0,010	0,471	777,200	33,453
T2	3A0B1C1	26,500	0,030	0,353	165,800	156,815
	3A0B0C0	36,600	0,010	0,399	235,300	110,497

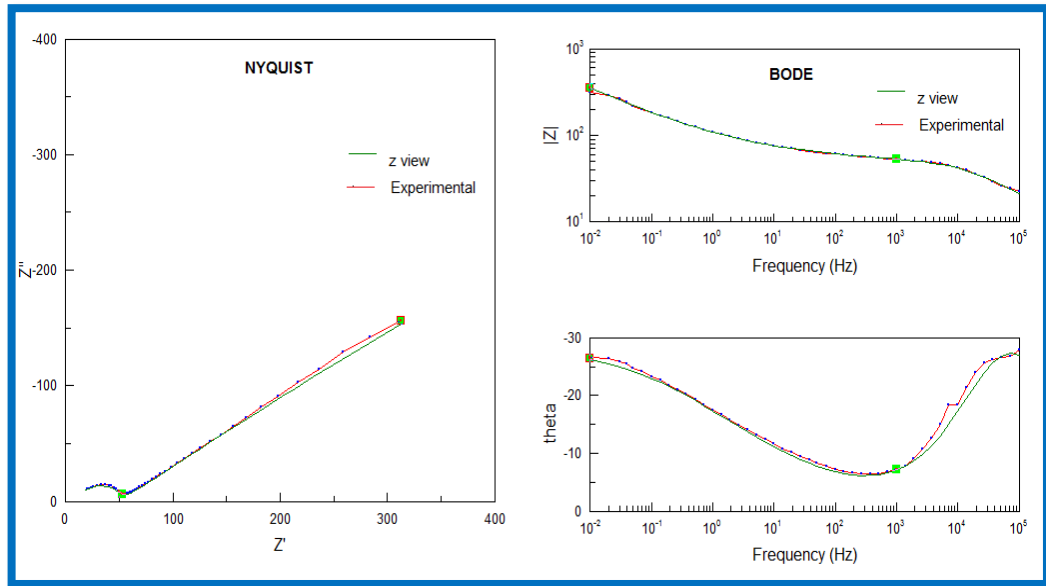
Fuente: autores del proyecto.

**Figura 40.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 1A0B0C0.



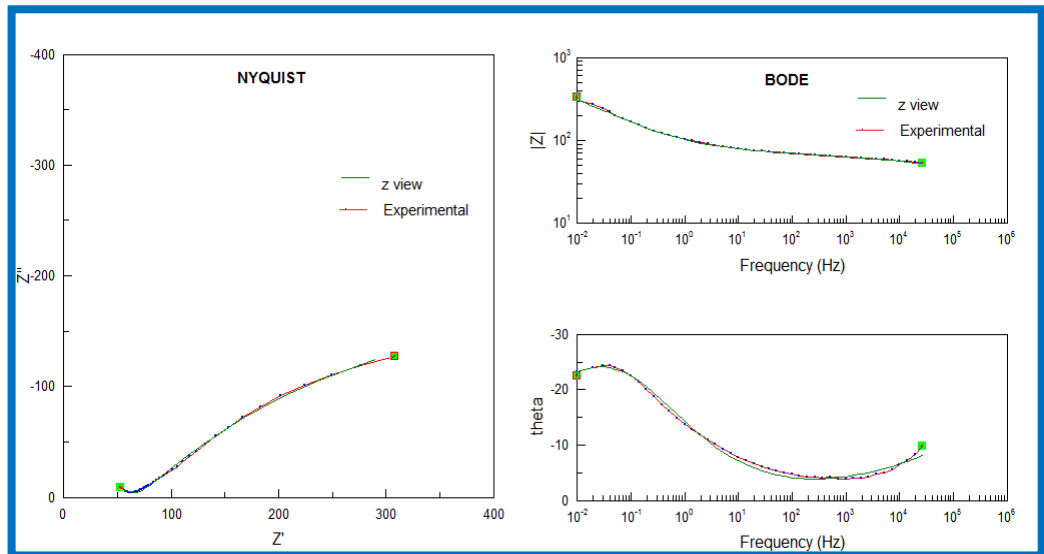
Fuente: autores del proyecto.

**Figura 41.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 1A0B1C1.



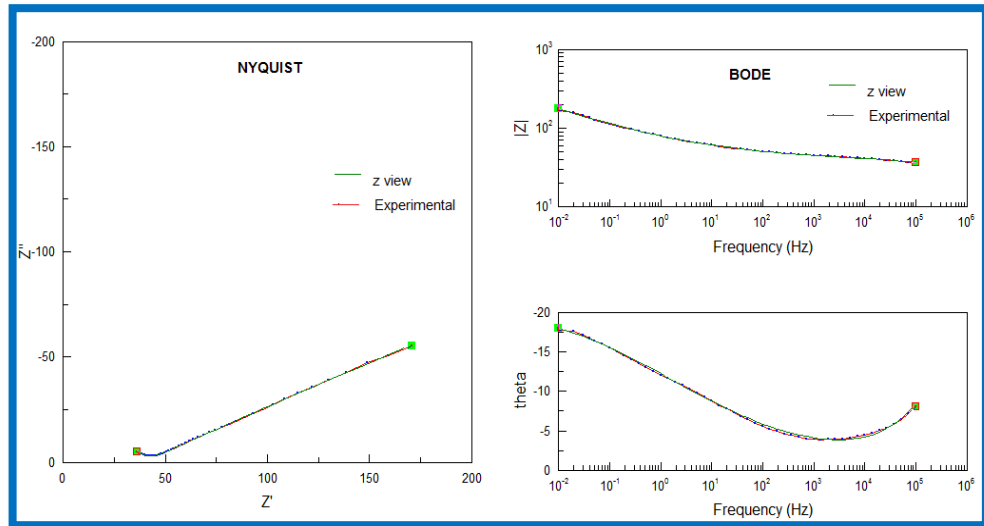
Fuente: autores del proyecto.

**Figura 42.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 2A0B0C0.



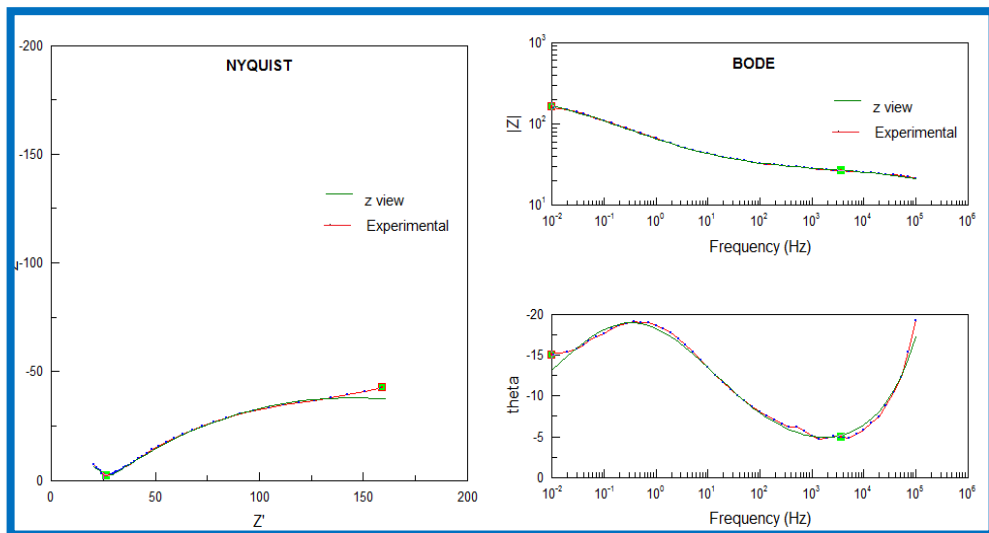
Fuente: autores del proyecto.

**Figura 43.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 2A0B1C1.



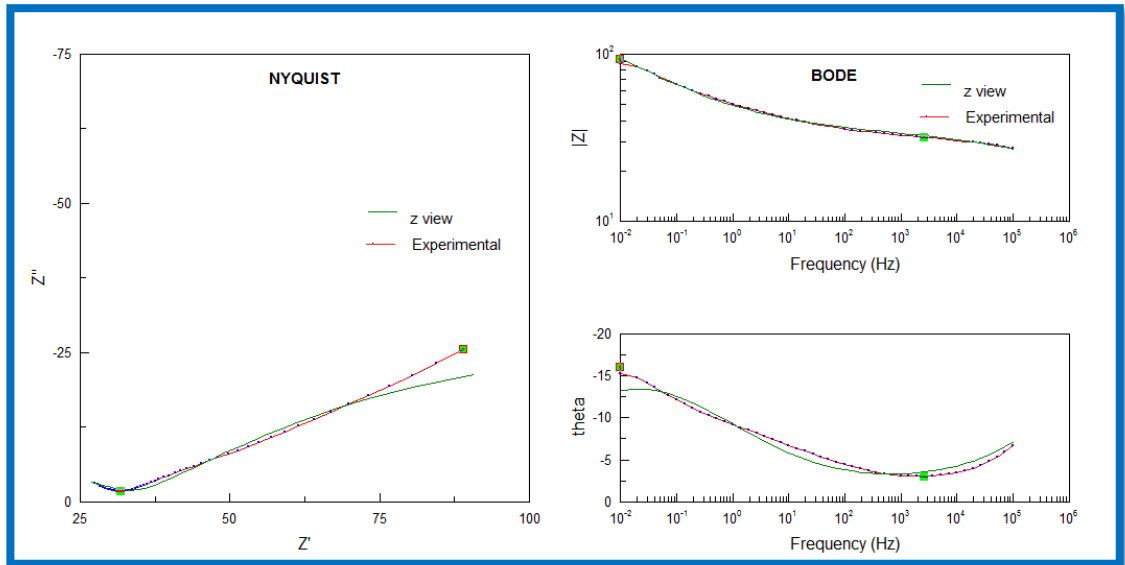
Fuente: autores del proyecto.

**Figura 44.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 3A0B0C0.



Fuente: autores del proyecto.

**Figura 45.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 3A0B1C1.



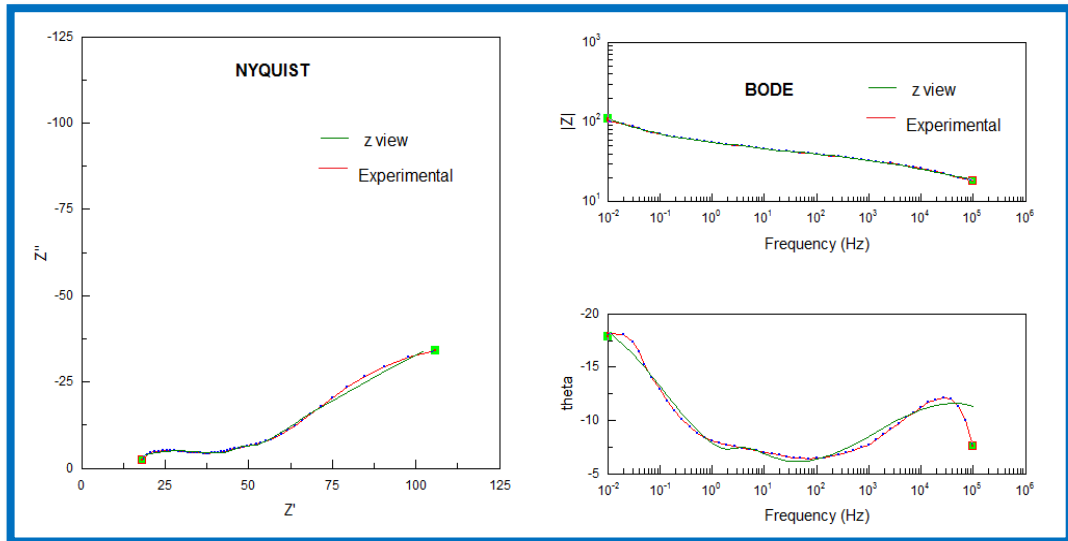
Fuente: autores del proyecto.

**Tabla 28.** Valores de resistencias, densidades y capacitancias para los especímenes galvanizados a diferentes tiempos, mediante la simulación en el software Zview.

PROBETAS DE CONCRETO REFORZADO CON ACERO SIN GALVANIZAR									
TIEMPO	ESPECIMEN	R $\Omega$ (Ohm*cm $^2$ )	CPE (Cc)		Rp (Ohm*cm $^2$ )	CPE (Cdl)		Rt (Ohm*cm $^2$ )	Icorr ( $\mu$ A/cm $^2$ )
			CPE- T	CPE- P		CPE- T	CPE- P		
T0	1A1B1C1	20,860	0,033	0,286	196,000	0,003	0,005	1468,300	132,653
	1A1B0C0	77,290	0,008	0,193	2357,000	0,006	0,002	29150,700	11,031
T1	2A1B1C1	15,680	0,076	0,388	165,000	0,007	0,045	1050,000	157,576
	2A1B0C0	57,290	0,009	0,248	501,000	0,086	0,015	3696,900	51,896
T2	3A1B1C1	12,260	0,035	0,532	105,000	0,019	0,115	1656,000	247,619
	3A1B0C0	25,800	0,219	0,324	401,800	0,168	0,029	4230,300	64,709

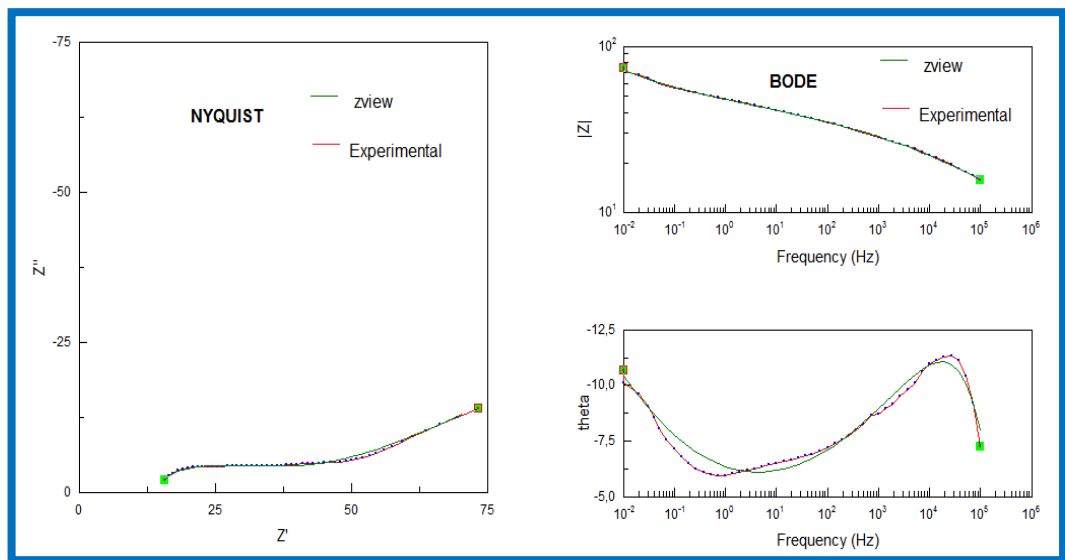
Fuente: autores del proyecto.

**Figura 46.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 1A1B1C1.



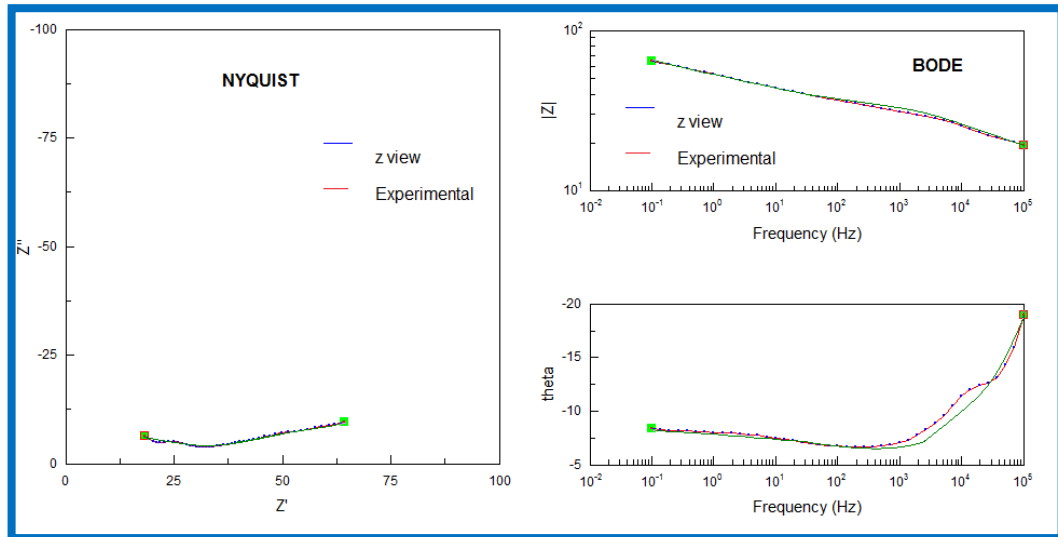
Fuente: autores del proyecto

**Figura 47.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 2A1B1C1.



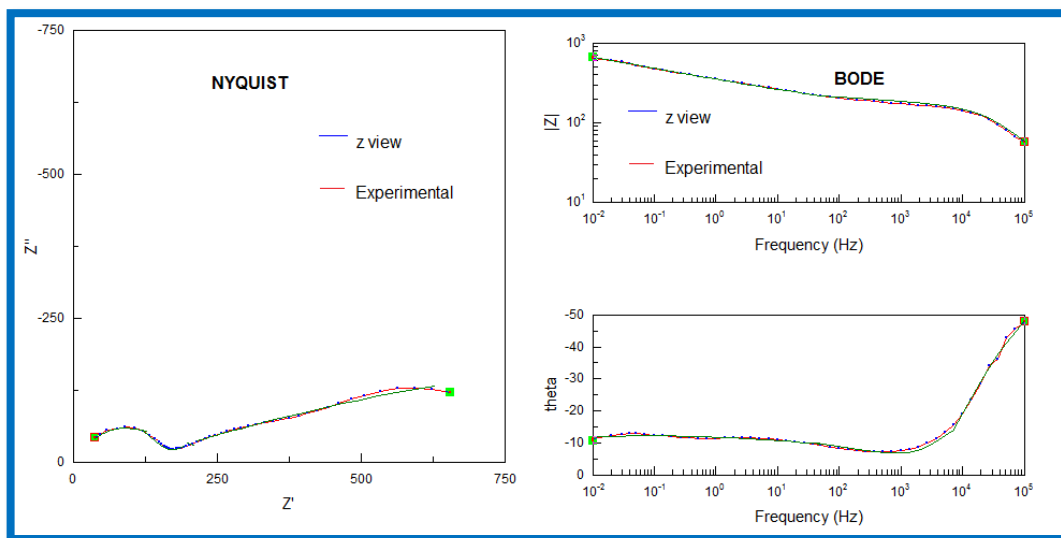
Fuente: autores del proyecto

**Figura 48.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 3A1B1C1.



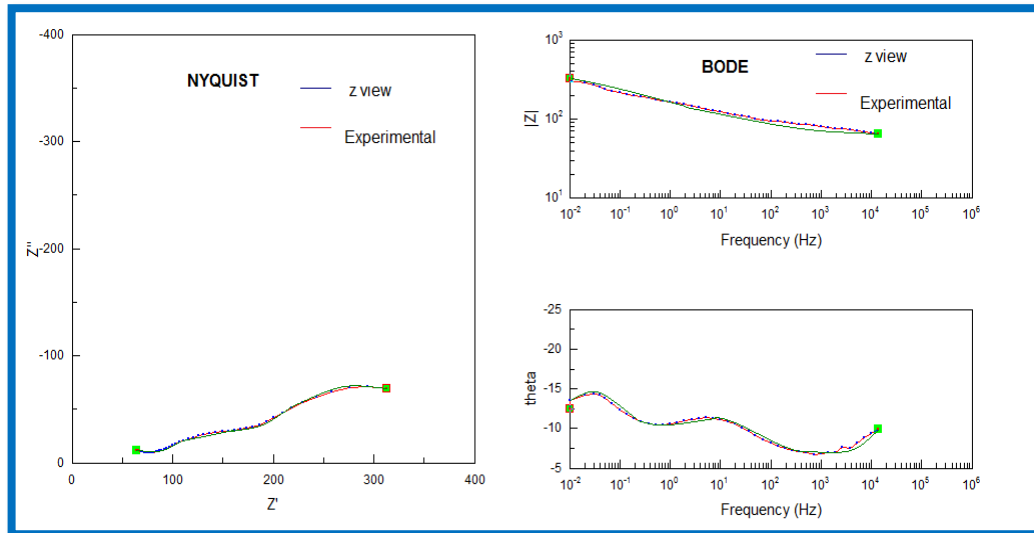
Fuente: autores del proyecto

**Figura 49.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 1A1B0C0.



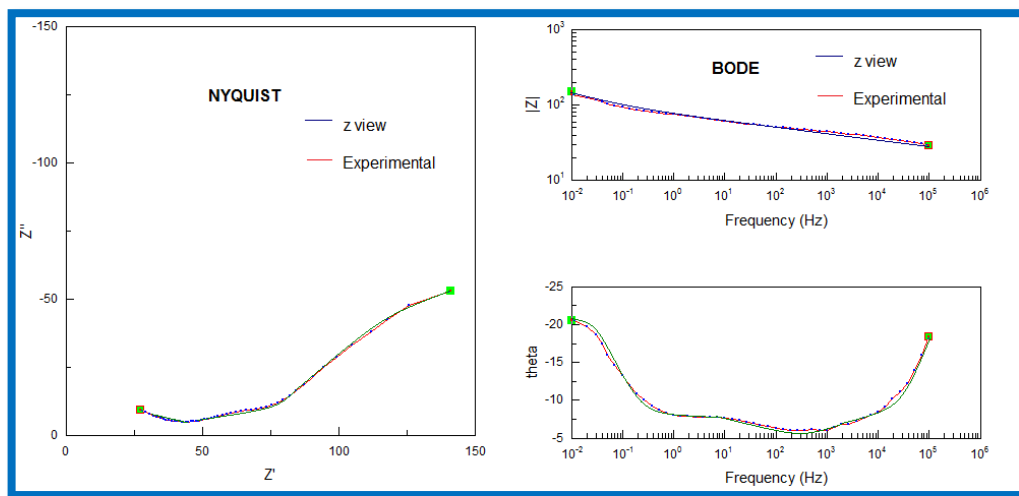
Fuente: autores del proyecto

**Figura 50.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 2A1B0C0.



Fuente: autores del proyecto

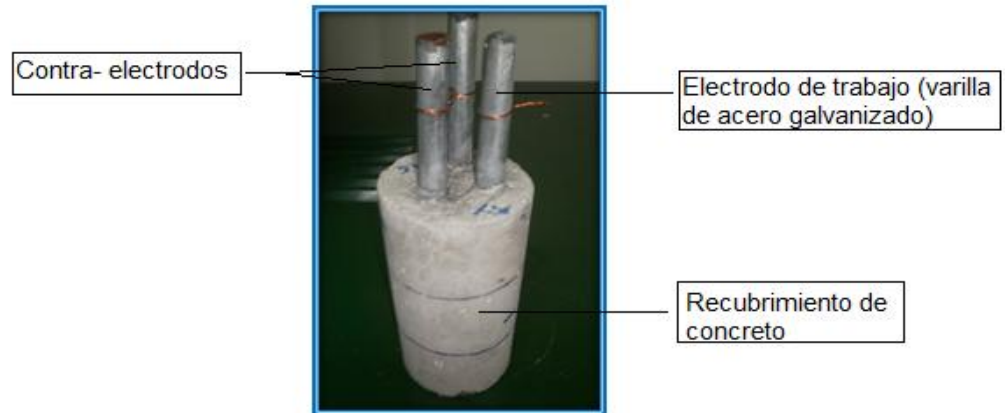
**Figura 51.** Diagramas experimentales y simulados en el software Zview para el espécimen 3A1B0C0.



Fuente: autores del proyecto

## Anexo E. Registro fotográfico de la inspección visual

**Figura 52.** Probeta de acero galvanizado.



**Figura 53.** Inspeccion visual de un espécimen tipo A1.



**Figura 54.** Inspeccion visual de un espécimen tipo A0 .



**Figura 55.** Registro fotográfico de la inspección visual.

a) Varillas de acero galvanizado y sin galvanizar con productos de corrosión adherido a su superficie.



b) Recubrimiento de concreto de las varillas de acero galvanizado y sin galvanizar con productos de corrosión.



c) Inspección visual de las varillas galvanizadas y su interface acero galvanizado- concreto





d) Inspección visual de las varillas de acero y su interface acero-concreto





Fuente: autores del proyecto.