

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE  
CLORUROS PARA VARILLAS DE DIFERENTE MANUFACTURA  
EMBEBIDAS EN CONCRETO EXPUESTO EN AMBIENTES  
MARINOS**

**POR**

**ING. RICARDO ADRIÁN MARTÍNEZ GARCÍA**

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
Maestría en Ciencias con Orientación en  
Materiales de Construcción

**Junio 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE  
CLORUROS PARA VARILLAS DE DIFERENTE MANUFACTURA  
EMBEBIDAS EN CONCRETO EXPUESTO EN AMBIENTES  
MARINOS**

**POR**

**ING. RICARDO ADRIÁN MARTÍNEZ GARCÍA**

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
Maestría en Ciencias con Orientación en  
Materiales de Construcción

**Director de Tesis:** Dr. Gerardo Fajardo San Miguel  
**Co-director de tesis:** Dr. Ricardo Orozco Cruz

**Junio 2016**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TÍTULO:**

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE CLORUROS  
PARA VARILLAS DE DIFERENTE MANUFACTURA,  
EMBEBIDAS EN CONCRETO EXPUESTO EN AMBIENTES MARINOS

**POR:**

**ING. RICARDO ADRIÁN MARTÍNEZ GARCÍA**

Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS con Orientación en  
Materiales de Construcción

**Director de tesis:** Dr. Gerardo Fajardo San Miguel

**Co-director de tesis:** Dr. Ricardo Orozco Cruz

**Junio, 2016**

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE CLORUROS**  
**PARA VARILLAS DE DIFERENTE MANUFACTURA,**  
**EMBEBIDAS EN CONCRETO EXPUESTO EN AMBIENTES MARINOS**

Aprobación de Tesis:

---

**DR. GERARDO DEL JESÚS FAJARDO SAN MIGUEL**  
Director de Tesis

---

**DR. RICARDO OROZCO CRUZ**  
Co-Director de Tesis

---

**DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL**  
Evaluador

---

**DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
Subdirector de Estudios de Posgrado

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICyT) y al Programa de Verano de la Investigación Científica y Tecnológica (PROVERICyT) por el soporte financiero brindado a los proyectos IT573-10 y 177839 CB-2012.

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil e Instituto de Ingeniería Civil**, por las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto de investigación. Así como al Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción, el Laboratorio de Tecnología del Concreto y el Laboratorio de Ecomateriales y Energía por el apoyo brindado para la realización de la parte experimental de este trabajo.

Al **Dr. Gerardo Fajardo San Miguel**, mi director de tesis, por compartir su apoyo, su tiempo y sus conocimientos para la elaboración de este escrito.

A la **Universidad Tecnológica de Delft**, a la **Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias**, así como al **M.C. José Pacheco Farías**, por el apoyo y los recursos brindados durante la estancia realizada en el periodo de Junio – Julio 2013.

A la **Universidad Veracruzana**, al **Instituto de Ingeniería**, así como al **Dr. Ricardo Orozco Cruz** y al Dr. Gonzalo Galicia Aguilar, por el apoyo y los recursos brindados durante la estancia realizada en el período de agosto – diciembre 2013.

Finalmente, a todos mis compañeros y amigos, que colaboraron en la parte experimental de este proyecto:

- Ing. Octavio Rivera.
- M.C. Dulce Cruz.
- M.C. Daniel Hernández
- Ing. Enrique Armendáriz.
- Ing. José Huerta.
- Ing. Marín García.
- M.C. Bárbara Ayub.
- Lic. Jackelin Reynoso.

A todos ustedes  
mis más sinceros agradecimientos,  
GRACIAS.  
Ing. Ricardo Adrián Martínez García

## DEDICATORIA

Trabajo dedicado a:

A Dios:  
por todas las bendiciones recibidas.

A mi madre:  
Adriana García Cepeda,  
por su amor incondicional.

A mi padre:  
Javier Martínez González,  
por sus enseñanzas y consejos.

A mi hermano:  
Javier Martínez García,  
por su apoyo siempre presente.

A mis directores de tesis:  
Dr. Gerardo Fajardo San Miguel,  
Dr. Ricardo Orozco Cruz,  
por compartir su tiempo, conocimiento y amistad.

A mis amigos:  
por hacer de las dificultades nuevas oportunidades.

## RESUMEN

### **DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE CLORUROS PARA VARILLAS DE DIFERENTE MANUFACTURA, EMBEBIDAS EN CONCRETO EXPUESTO EN AMBIENTES MARINOS**

La concentración crítica de cloruros, esencial para la iniciación de la corrosión del acero de refuerzo, es uno de los parámetros más significativos para predecir la vida de servicio útil de una estructura de concreto reforzado expuesta a un ambiente marino. Existe una gran cantidad de estos valores relacionados con la barra de acero al carbono utilizada convencionalmente (ASTM A 615); sin embargo, la utilización de nuevos materiales que exhiben un mejor comportamiento contra la corrosión en diferentes ambientes es una realidad.

En este trabajo se determinó la concentración crítica de cloruros para tres diferentes tipos de refuerzo, tales como el acero termotratado, el acero galvanizado y el acero con un recubrimiento dual zinc-polímero. La investigación se llevó a cabo en ambientes controlados de laboratorio, usando especímenes fabricados de concreto reforzado con relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.65. Los especímenes fueron monitoreados a través de diferentes pruebas electroquímicas como el potencial de circuito abierto (OPC), la resistencia a la polarización lineal (LPR) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Adicionalmente, la determinación de la concentración crítica de cloruros se llevó a cabo por medio de un potenciómetro automático y espectroscopia de energía dispersiva de rayos-X (EDS) en el microscopio electrónico de barrido (SEM), con la finalidad de encontrar una correlación de valores.

## **ABSTRACT**

### **CRITICAL CHLORIDE CONCENTRATION IN SEVERAL METALLIC REINFORCING BARS EMBEDDED IN CONCRETE EXPOSED TO MARINE ENVIRONMENTS**

One of the most significant parameters for predicting the service life of reinforced concrete structures exposed to marine environment is the critical chloride concentration; this parameter is considered essential for initiating the reinforcement steel corrosion. The major challenge for the assessment of this value is the amount of factors which are involved in this measurement, such as the concrete properties and the type of reinforcing steel used. The use of different types of steel emerges from the necessity to find new materials that exhibit better corrosion performance in a variety of environments.

There is a great quantity of data related to the mild steel rod (ASTM A 615), for this reason the main objective of this research was determine the critical chloride concentration for three different types of reinforcement, such as thermo-treated , galvanized and dual covering zinc-polymer steel. The research was conducted in a marine environment with a laboratory control, using reinforced concrete specimens fabricated with water/cement ratios of 0.45 and 0.65.

These specimens was monitored through electrochemical tests such as the open circuit potential (OCP), the linear polarization resistance (LPR) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Additionally, the determination of the critical chloride concentration was performed with an automatic potentiometer and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) in the scanning electron microscopy (SEM). From the results of this investigation a range of values for a critical chloride concentration as a function of multiple types of reinforcement steel is were obtained.

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Métodos de prevención y protección contra la corrosión en concreto reforzado.	42
<b>Tabla 2.</b> Criterios de valoración de riesgos de corrosión. ....	44
<b>Tabla 3.</b> Criterio de evaluación para la densidad de corriente en el campo y en el laboratorio.....	46
<b>Tabla 4.</b> Descripción de las capas de la aleación metalúrgica acero-zinc.....	56
<b>Tabla 5.</b> Composición química expresada en porcentaje de óxidos.....	67
<b>Tabla 6.</b> Resumen de propiedades para los componentes de las mezclas de concreto. .	72
<b>Tabla 7.</b> Proporciones para la mezcla de concreto a/c = 0.45 .....	72
<b>Tabla 8.</b> Proporciones para la mezcla de concreto a/c = 0.65 .....	73
<b>Tabla 9.</b> Aceros de diferente manufactura, utilizados como refuerzo para los especímenes de durabilidad. ....	81
<b>Tabla 10.</b> Resumen de propiedades en el concreto fresco.....	94
<b>Tabla 11.</b> Resultados de permeabilidad rápida a cloruros. ....	97
<b>Tabla 12.</b> Composición química de las secciones transversales de las varillas AC y ATT, por ASTM E 415 y ASTM E 1019.....	102
<b>Tabla 13.</b> Resumen resultados para % Cl <sup>-</sup> por titulación potenciométrica y EDS.....	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de fases: hierro (Fe) – carburo de hierro ( $Fe_3C$ ), simplificado para la zona de acero.....	18
<b>Figura 2.</b> Producción de acero en México – CANACERO.....	19
<b>Figura 3.</b> Intervalo dimensional de sólidos y poros en la pasta de cemento hidratada [Metha, 1993].....	24
<b>Figura 4.</b> Diagrama pH-Potencial simplificado del hierro en contacto con el agua, mostrando regiones termodinámicamente estables [Pourbaix, 1987] .....	27
<b>Figura 5.</b> Modelo de vida útil [Tuutti, 1982].....	29
<b>Figura 6.</b> Aporte en el periodo de iniciación y propagación del uso de recubrimientos sobre la superficie del acero de refuerzo. ....	31
<b>Figura 7.</b> Procesos de deterioro en el concreto reforzado. ....	33
<b>Figura 8.</b> Formación de la celda galvánica del acero embebido en concreto [Hernández, 2013] .....	34
<b>Figura 9.</b> Volumen relativo del acero y sus productos de corrosión [Shahzma, 2009]. ....	36
<b>Figura 10.</b> Esquema del mecanismo de corrosión debido a cloruros [Castro, 2001] .....	40
<b>Figura 11.</b> Esquema de medida del potencial de corrosión de la armadura [Garcés et. al., 2004] .....	44
<b>Figura 12.</b> Componentes equivalentes del concreto reforzado utilizando EIS. ....	48
<b>Figura 13.</b> Acero termotratado: núcleo de perlita y ferrita con una capa exterior de martensita.....	54
<b>Figura 14.</b> Perfil estratigráfico de las capas de la aleación metalúrgica acero-zinc [Yeomans, 2004].....	56
<b>Figura 15.</b> Diagrama pH-Potencial simplificado del zinc, en contacto con el agua, mostrando regiones termodinámicamente estables. (Gris: Estado metálico, Verde: Estado pasivo, Rojo: Estado activo) [Pourbaix, 1987].....	57
<b>Figura 16.</b> Varilla con recubrimiento dual metal-polimérico (AD) [Concrete Reinforcing Steel Institute, CRSI].....	60
<b>Figura 17.</b> Distribución de tamaños de partícula por vía húmeda.....	68
<b>Figura 18.</b> Difractograma cualitativo de fases.....	69
<b>Figura 19.</b> Curvas granulométricas para a) agregado grueso y b) agregado fino... ..	70
<b>Figura 20.</b> Compresómetro ASTM C 469.....	76

<b>Figura 21.</b> Desecador UNE 61 033 75. ....	77
<b>Figura 22.</b> Celda de transferencia ASTM C 1202 .....	78
<b>Figura 23.</b> Área delimitada para el seguimiento electroquímico (L = Longitud = 5 cm) ....	82
<b>Figura 24.</b> Esquema de especímenes monitoreados durante la experimentación .....	82
<b>Figura 25.</b> Especímenes para pruebas de durabilidad. ....	83
<b>Figura 26.</b> Esquema del ciclo de exposición acelerada inmersión-secado. ....	83
<b>Figura 27.</b> Especímenes expuestos a inmersión-secado.....	84
<b>Figura 28.</b> Equipo y configuración para la aplicación de las técnicas electroquímicas.....	85
<b>Figura 29.</b> Muestras de concreto pulverizadas, correspondientes a diferentes profundidades, tituladas según ASTM C 1152. ....	86
<b>Figura 30.</b> Muestra de concreto cubierta con resina epóxica.....	88
<b>Figura 31.</b> Muestra de concreto cubierta con resina epóxica, sobre superficie de material acrílico.....	89
<b>Figura 32.</b> Muestras de concreto para el análisis de concentración de cloruros, EDS-SEM.....	90
<b>Figura 33.</b> Esquema de puntos analizados en una muestra de concreto utilizando EDS-SEM.....	91
<b>Figura 34.</b> Resistencia a la compresión (MPa) vs. Tiempo de curado (Días).....	95
<b>Figura 35.</b> Esfuerzo ( $\sigma$ ) vs. Deformación ( $\epsilon$ ) para Módulo de Elasticidad (E).....	95
<b>Figura 36.</b> Porosidad accesible al agua en probetas de concreto.....	96
<b>Figura 37.</b> Micrografía AC a 100 X.....	98
<b>Figura 38.</b> Micrografía ATT a 50 X .....	98
<b>Figura 39.</b> Micrografía AG a 10 X.....	99
<b>Figura 40.</b> Micrografía AG –Fases del galvanizado a 50 X.....	100
<b>Figura 41.</b> Micrografía AD a 20 X.....	100
<b>Figura 42.</b> Microdureza Vickers con esquema de indentaciones para ATT y AC según, ASTM E 384 .....	101
<b>Figura 43.</b> Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – AC – a/c = 0.65 y 0.45. ....	104
<b>Figura 44.</b> Intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ) – AC – a/c = 0.65 y 0.45... ..	104
<b>Figura 45.</b> Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – ATT – a/c = 0.65 y 0.45.....	106
<b>Figura 46.</b> Intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ) – ATT – a/c = 0.65 y 0.45. ....	106
<b>Figura 47.</b> Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – AG – a/c = 0.65 y 0.45.....	109
<b>Figura 48.</b> Intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ) – AG – a/c = 0.65 y 0.45.....	110

<b>Figura 49.</b> Imágenes representativas de incisiones en la superficie de las varillas de acero dual (ADCI).....	111
<b>Figura 50.</b> Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – ADCI – $a/c = 0.65$ y $0.45$ .....	112
<b>Figura 51.</b> Intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ) – ADCI – $a/c = 0.65$ y $0.45$ .....	113
<b>Figura 52.</b> Nyquist para sistemas $0.65$ concreto – aceros de diferente manufactura.....	115
<b>Figura 53.</b> Perfiles de concentración de cloruros ASTM vs. EDS.....	118
<b>Figura 54.</b> Perfiles de concentración de cloruros ASTM vs. EDS para sistemas acero-concreto $a/c=0.65$ .....	119

## CONTENIDO

### CAPÍTULO 1 – GENERALIDADES

1.1 Concreto reforzado: concreto + acero.....	15
• El concreto.....	15
• El acero.....	16
• El concreto reforzado.....	20
1.2 Sinergia concreto-acero.....	21
• Protección física.....	22
• Protección química.....	26
1.3 Durabilidad y vida útil del concreto reforzado.....	28
1.4 Impacto ambiental del concreto reforzado.....	31
1.5 Procesos de deterioro del concreto reforzado.....	32
1.6 Corrosión del acero de refuerzo.....	34
1.7 Consecuencias de la corrosión.....	35
1.8 Impacto económico de la corrosión.....	37
1.9 Corrosión por cloruros.....	39
1.10 Contenido crítico de cloruros.....	40
1.11 Medidas de prevención contra la corrosión.....	41
1.12 Técnicas de evaluación para la corrosión.....	42

### CAPÍTULO 2 – ANTECEDENTES

2.1 Antecedentes.....	50
2.2 Justificación.....	63
2.3 Hipótesis.....	64
2.4 Objetivos.....	64
• General.....	64
• Particulares.....	64

### CAPÍTULO 3 – MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 Descripción y caracterización de los materiales para concreto.....	67
• Cemento.....	67
○ Análisis químico.....	67
○ Pérdida por ignición.....	67
○ Análisis de distribución de tamaños de partícula.....	68
○ Análisis de difracción de rayos X (DRX).....	68
• Agregados.....	69
○ Análisis granulométrico.....	69
○ Masa específica (d).....	71
○ Peso volumétrico suelto seco (PVSS).....	71
○ Peso volumétrico varillado seco (PVVS).....	71
○ Porcentaje de absorción.....	71

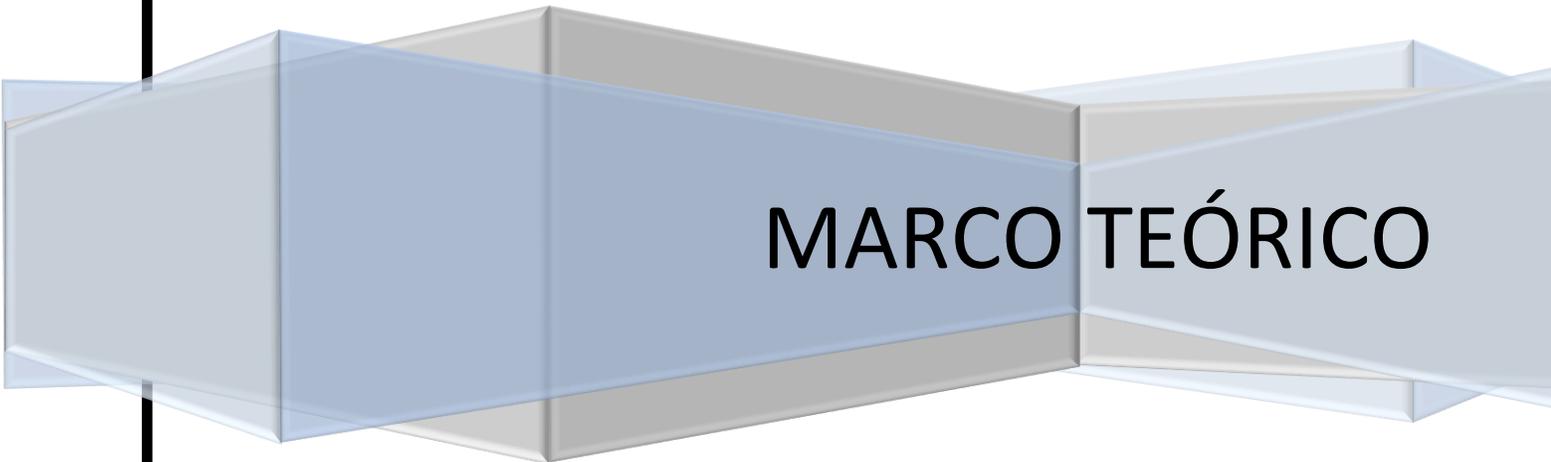
3.2	Diseño de las mezclas de concreto.....	71
•	Parámetros de diseño.....	71
•	Mezclas de concreto.....	72
3.3	Caracterización de las mezclas de concreto.....	74
•	Determinación de las propiedades en estado fresco.....	74
○	Revenimiento.....	74
○	Temperatura.....	74
○	Masa unitaria.....	74
○	Contenido de aire.....	75
•	Determinación de las propiedades físico-mecánicas.....	75
○	Resistencia a la compresión.....	75
○	Módulo de elasticidad.....	76
○	Porosidad accesible al agua.....	76
○	Resistencia a la penetración de cloruros.....	78
3.4	Descripción y caracterización de las varillas de refuerzo utilizadas.....	79
•	Acero al carbono, acero termotratado, acero galvanizado y acero dual.....	79
○	Micrografías.....	79
○	Análisis químico.....	80
○	Resistencia al esfuerzo de tensión y microdureza.....	80
3.5	Fabricación de los especímenes.....	81
3.6	Exposición de los especímenes.....	83
•	Medio acelerado.....	83
3.7	Seguimiento electroquímico.....	84
•	Potencial de media celda (E).....	84
•	Resistencia a la polarización lineal (LRP).....	85
•	Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).....	85
3.8	Inspección y cuantificación de cloruros en el concreto.....	86
•	Titulación potenciométrica.....	86
•	Espectroscopía de energía dispersiva (EDS – SEM).....	86

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Caracterización de las mezclas de concreto.....	94
•	Determinación de las propiedades en estado fresco.....	94
○	Revenimiento.....	94
○	Temperatura.....	94
○	Masa unitaria.....	94
○	Contenido de aire.....	94
•	Determinación de las propiedades físico-mecánicas.....	94
○	Resistencia a la compresión.....	95
○	Módulo de elasticidad.....	95
○	Porosidad accesible al agua.....	96

○ Resistencia a la penetración de cloruros .....	96
4.2 Caracterización de las varillas de refuerzo utilizadas.....	97
• Acero al carbono, acero termotratado, acero galvanizado, acero dual (metal-polímero).....	97
○ Micrografías.....	97
○ Análisis químico.....	102
○ Resistencia al esfuerzo de tensión y microdureza. ....	103
4.3 Seguimiento electroquímico.....	103
• Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) e Intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ).....	103
• Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).....	113
4.4 Inspección y cuantificación de cloruros en el concreto.....	117
4.5 Correlaciones de valores. ....	119
<hr/>	
<b>Conclusiones.</b> .....	122
<b>Recomendaciones.</b> .....	126
<b>Referencias.</b> .....	128

# CAPÍTULO 1



MARCO TEÓRICO

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1. Concreto reforzado: concreto + acero.

Actualmente, el concreto reforzado es uno de los materiales más empleados en la industria de la construcción. Este material compuesto de concreto y acero ofrece una alta resistencia mecánica a la compresión y a la tracción, por lo que se ha utilizado para construir gran parte de la infraestructura, en el nivel mundial.

#### 1.1.1. El concreto.

El concreto es básicamente una mezcla de agregados y pasta. La pasta, que une a los agregados, se compone de cemento portland y/o materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado) y constituye del 25% al 40% del volumen total del concreto. Los agregados, por otra parte, se dividen en finos y gruesos: los agregados finos están constituidos por arenas, limos y arcillas que pueden ser naturales o productos de un proceso de trituración con partículas de hasta 9.5 mm (3/8 de pulgada); mientras los agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 1.18 mm y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulgadas). En conjunto, constituyen del 60% al 75% del volumen total del concreto [PCA, 2006].

La resistencia mecánica del concreto es producto de las reacciones de hidratación del cemento. En este proceso los componentes se cristalizan progresivamente para formar un gel de diferentes fases, que rodea a los agregados, uniéndolos para producir un conglomerado. Tanto su resistencia mecánica como su permeabilidad están regidas por la relación agua - material cementante ( $a/mc$ ). Cuanto más baja sea dicha relación, más alta será su resistencia y menor su permeabilidad.

El concreto tiene vital importancia como material estructural, ya que en estado fresco puede adquirir distintas formas complejas y tamaños, debido a su consistencia plástica. Una vez que ha endurecido tiene una buena resistencia mecánica a la compresión, poca

variación volumétrica, baja conductividad térmica, así como resistencia a la penetración de humedad, a los ataques químicos y al desgaste. Por otra parte, requiere poco mantenimiento cuando se fabrica de manera apropiada; sin embargo, un inadecuado diseño y/o deficiencias en el mezclado y la colocación pueden causar su degradación prematura [Rasheeduzzafar et. al., 1984]. Debido a sus propiedades, el concreto es sin duda el material de construcción más difundido y de mayor uso, por lo que se encuentra implícito en toda actividad de desarrollo y lo seguirá estando, hasta que se desarrolle un material más versátil y económico [Neville, 1998].

#### 1.1.2. El acero.

Técnicamente, el acero es una aleación de hierro con una cantidad de carbono variable, entre el 0.008 al 2.11% en el peso de su composición [Callister, 2007]. La inserción de este elemento en la estructura cristalina del primero se debe a la diferencia de diámetros atómicos, formándose una solución sólida. La adición de carbono (C) al hierro en estado puro (Fe) formará una fase de carburo de hierro o cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Esta nueva fase, además de otras resultantes de añadir algunos otros elementos (metálicos o no metálicos), modifican las propiedades físicas y mecánicas del acero.

El diagrama de fases hierro (Fe) – carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) de la Figura 1, muestra la composición del acero, en función de la adición de carbono y la temperatura, partiendo del hecho de que el hierro puro tiene tres estados alotrópicos [Mamlouk et. al., 2006]:

- Ferrita (Hierro  $\alpha$ ). Es una fase cristalina con un sistema cúbico centrado en el cuerpo, estable a intervalos partiendo de temperatura ambiente hasta los 912 °C. Esta fase tiene una solubilidad del 0.022% en peso. Es relativamente blanda, magnética por debajo de los 768 °C y tiene una densidad de 7.88 g/cm<sup>3</sup>.
- Austenita (Hierro  $\gamma$ ). Es una fase cristalina con un sistema cúbico centrado en las caras, estable a intervalos de temperatura entre 912 y 1394 °C. Esta fase tiene una solubilidad del 2.11% en peso. No es una fase magnética.

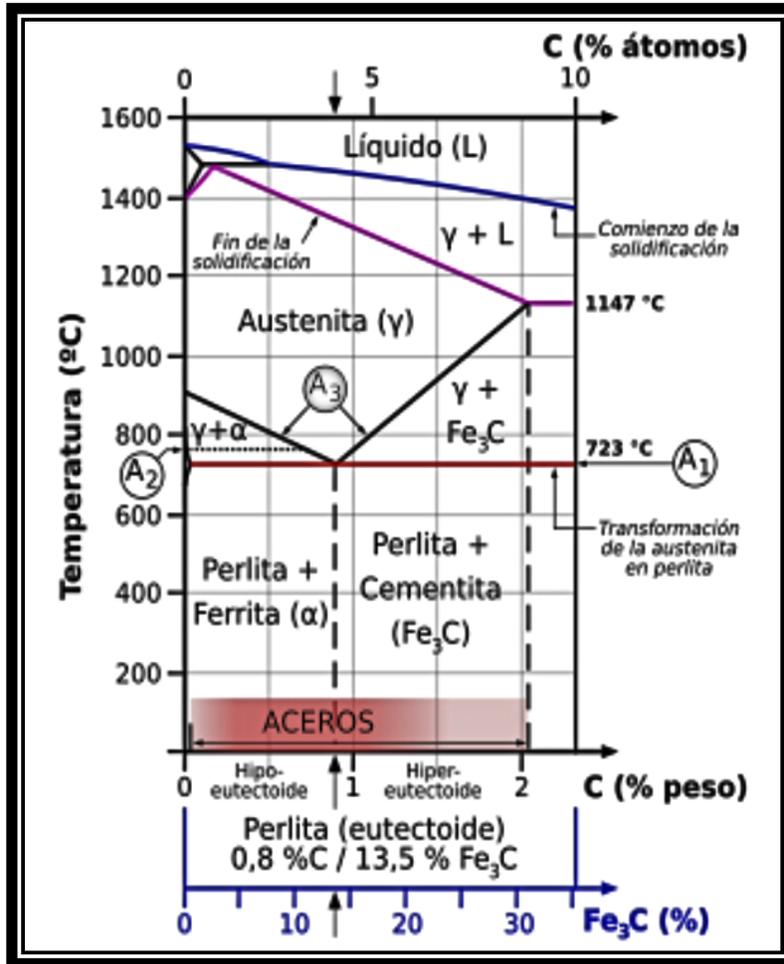
- Ferrita  $\delta$  (Hierro  $\delta$ ). Es una fase cristalina con un sistema cúbico centrado en el cuerpo, estable a intervalos de temperatura entre 1394 y 1538 °C. Es en esencia el mismo hierro  $\alpha$ , pero con parámetros de red mayores por efecto de la temperatura.
- Finalmente, el hierro líquido se obtiene a temperaturas mayores que los 1538 °C.

Además de los estados alotrópicos del hierro puro, en el diagrama Fe- Fe<sub>3</sub>C, se pueden encontrar otras fases producto de la adición de carbono:

- Cementita (Fe<sub>3</sub>C). Es una fase cristalina que se obtiene cuando se excede el límite de solubilidad del carbono en la ferrita  $\alpha$  por debajo de los 727 °C, es de carácter metaestable y mecánicamente se caracteriza por ser dura y frágil.
- Perlita. Es una fase laminar de placas alternadas de ferrita y cementita con propiedades mecánicas intermedias entre las mismas. Se forma en el eutectoide de la zona de los aceros, donde la temperatura de transformación de la austenita es mínima. Dicho eutectoide contiene un 0.80% de carbono (13.5% de cementita).

Otras fases pueden ser obtenidas por tratamientos térmicos:

- Bainita. En fase cristalina tiene una estructura similar a la perlita, formada por agujas de ferrita y cementita, pero de mayor ductilidad y resistencia. Se obtiene mediante velocidades intermedias de enfriamiento.
- Martensita. [Smith et. al., 2006] Es una fase cristalina que se obtiene como producto del enfriamiento súbito de la austenita, siendo el constituyente típico de los aceros templados y también uno de los más duros. Es una solución sobresaturada de carbono en hierro  $\alpha$  con tendencia, cuanto mayor es el carbono, a la sustitución de la estructura cúbica centrada en el cuerpo por tetragonal centrada en el cuerpo.



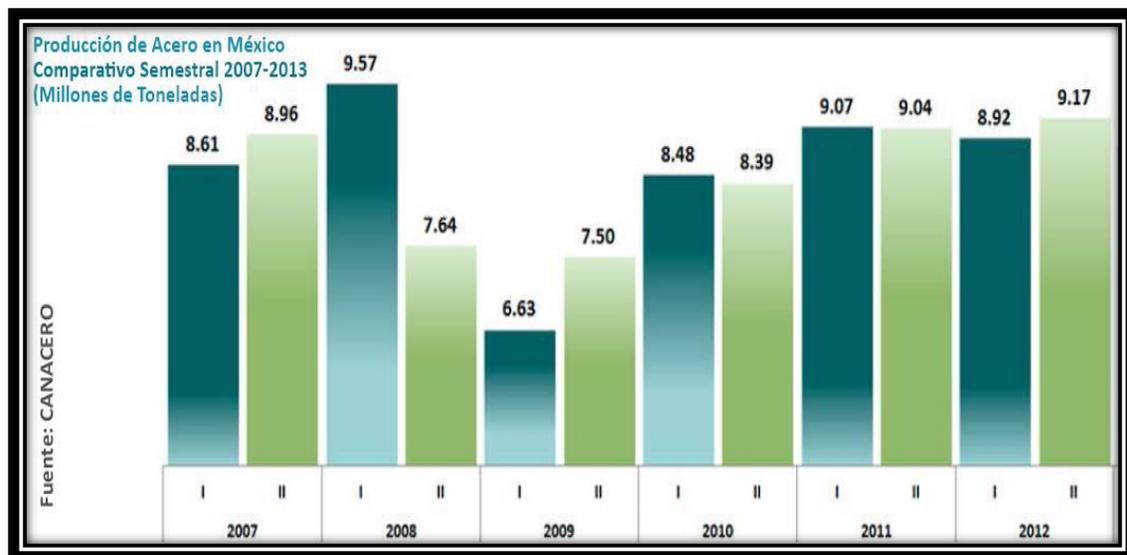
**Figura 1.** Diagrama de fases: hierro (Fe) – carburo de hierro (Fe<sub>3</sub>C), simplificado para la zona de acero.

Sea cual sea la composición química o de fases, todo acero utilizado en la industria de la construcción como acero de refuerzo estructural para concreto deberá cumplir la norma ASTM A 615 “Especificación Normalizada para Barras de Acero al Carbono Lisas y Corrugadas para refuerzo de Concreto”.

El acero de refuerzo utilizado en las estructuras de concreto normalmente se puede encontrar en forma de varilla o malla electrosoldada de alambre, siendo las varillas corrugadas el tipo de manufactura más utilizada [Mc.Cormac et. al., 2011] debido a que poseen protuberancias en su superficie, lo que aumenta la adherencia entre el concreto y el acero y permite que trabajen como un solo elemento estructural a tensión, y a compresión.

El acero es uno de los insumos más importantes para distintos tipos de industria. Debido a sus prominentes ventajas en cuanto a velocidad de producción y control de calidad, ha desarrollado una amplia diversidad de aplicaciones que lo han convertido en la solución económica más factible para diferentes requerimientos. La industria de la construcción no ha sido la excepción, ya que el acero resulta indispensable para el desarrollo de cualquier tipo de obra de infraestructura; y aunque existe una amplia gama de productos de acero para la construcción, los concernientes a este trabajo de investigación serán sólo los productos utilizados como acero de refuerzo en las estructuras de concreto.

The World Steel Association, en su informe anual para el año 2012, reportó una producción mundial de 1560 millones de toneladas de acero, de las cuales México aportó aproximadamente una producción de 18.1 millones de toneladas, como se muestra en la Figura 2. Sin embargo, la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero – CANACERO en su Boletín No.9 2012 reporta que las barras de acero y alambón para la construcción ocupan solo un volumen del 9.8% dentro de la producción nacional de acero, lo cual sería aproximadamente 1.77 millones de toneladas.



**Figura 2.** Producción de acero en México – CANACERO.

Es importante mencionar que, al final de su vida útil, el acero es desechado recibiendo comúnmente el nombre de chatarra (desperdicio metálico ferroso), que se almacena y se clasifica para ser reciclado a través de procesos de fundición estrictamente controlados,

reduciendo el consumo de materias primas y energía para la producción del acero de refuerzo. Sin embargo, sus propiedades físico-mecánicas son apenas suficientes para los requerimientos que sus aplicaciones demandan, por lo que se ha optado por utilizar microaliantes (Mn, Mo) y/o tratamientos térmicos (Tempcore®, QTB) como una alternativa económica, para alcanzar los requerimientos de calidad exigidos.

### 1.1.3. El concreto reforzado.

El concreto reforzado se puede clasificar como un material compuesto, que se conforma de una parte de concreto en masa y otra de acero de refuerzo. El concreto tiene una baja resistencia a esfuerzos de tensión, pero relativamente alta resistencia a esfuerzos de compresión, por lo que se utilizan las barras de acero de refuerzo en los puntos sujetos a tensión dentro de la estructura.

El acero de refuerzo, por su parte, también puede emplearse para soportar esfuerzos de compresión, reduciendo la sección transversal de elementos estructurales como columnas; o bien, cumpliendo una función de control sobre los agrietamientos debido a los cambios de longitud por temperatura. En cualquiera de los dos casos se debe utilizar en una cantidad mínima necesaria, según el diseño óptimo [Mamlouk et. al., 2006].

Como se ha mencionado, el concreto reforzado es probablemente el material disponible más importante para la construcción, ya que puede adaptarse a prácticamente cualquier forma y tamaño; lo que lo hace el candidato más fuerte en obras de vivienda, comunicación e infraestructura. Su gran éxito universal se debe a que:

- Tiene una considerable resistencia a la compresión y tensión por unidad de costo; desarrollando miembros rígidos con gran resistencia a la humedad, al fuego y al intemperismo (cuando se fabrica de manera adecuada). Esto lo hace un material que requiere poco mantenimiento, lo que incrementa notablemente su durabilidad y vida útil, sin mermar su capacidad de carga. Además de que tiene un mínimo consumo de energía [Rasheeduzzafar et. al., 1984].

- Por lo general, se puede fabricar con materiales locales de bajo costo (arena, grava y agua) utilizando cantidades relativamente pequeñas de cemento y acero de refuerzo; lo que lo hace el único material económico disponible para elementos estructurales sometidos a cargas ambientales como zapatas, losas de piso, muros de sótano, pilares y construcciones similares. Además, con una adecuada supervisión y control de calidad, se puede utilizar mano de obra relativamente de baja calificación para su montaje [Mc.Cormac et. al., 2011].
- Actualmente la evolución de la tecnología del concreto ha permitido atenuar alguno de los inconvenientes que presentaban las estructuras de concreto reforzado, tales como la baja resistencia por unidad de peso o por unidad de volumen, con lo que se han logrado construir elementos más esbeltos y de mayor capacidad de carga, siempre y cuando se haga un buen diseño de mezcla y exista un control de calidad adecuado en su fabricación, transporte, colocación, acabado y curado. Por otra parte, el desarrollo de moldes prefabricados para su colado ha abatido el costo elevado de las obras falsas para su colocación.

## **1.2. Sinergia entre el concreto y el acero.**

El concreto reforzado aporta amplias prestaciones estructurales debido a la sinergia mecánica entre el concreto y el acero, ya que sus coeficientes de dilatación térmica son muy similares; el acero tiene un coeficiente de  $0.0000065$  y el del concreto varía entre  $0.000004$  y  $0.000007$  (con un valor promedio de  $0.0000055$ ) por unidad de longitud, por grado fahrenheit, en ambos casos [McCormac et. al., 2011].

Además, ha demostrado tener una adecuada durabilidad para la mayoría de los casos en los que ha sido utilizado, siempre y cuando exista un adecuado control de calidad. Dicha durabilidad es el resultado natural de la acción protectora de doble naturaleza, que el concreto ejerce sobre el acero [Garcés et. al., 2008]: la protección física y la química.

Sin embargo, y a pesar de dichas protecciones conferidas por el concreto al acero, estudios recientes de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE – [www.oecd.org](http://www.oecd.org)) han demostrado que existen serios problemas de durabilidad en el concreto reforzado, asociados sobre todo con procesos de deterioro por corrosión.

#### 1.2.1. Protección física.

El concreto recién mezclado o semifluido, no tiene una estructura definida hasta que fragua, endurece y se cura. En este estado plástico posee propiedades electroquímicas muy similares a las de un electrolito líquido, con una resistividad,  $\rho$ , del orden de 200  $k\Omega \cdot cm$ , permitiendo fenómenos de transporte. Una vez que el concreto ha endurecido, actúa físicamente como un recubrimiento, que separa al acero del medio que lo rodea; sin embargo, esta barrera física no es del todo impermeable. El concreto está constituido por agregados que consideran inertes, relativamente impermeables y con una resistividad muy elevada. Sin embargo la pasta, debido a su naturaleza porosa, sigue permitiendo procesos de transporte de masa y carga eléctrica, entre el medio y la armadura, por lo cual es el componente con mayor importancia electroquímica [Moreno, 2005].

El análisis microestructural de la pasta de concreto endurecida permite distinguir una fase sólida, formada por los compuestos sólidos productos de la hidratación del cemento; una red porosa y una fase acuosa. Esta última que actúa como un electrolito en contacto con la fase sólida a través de la misma red porosa [Molina, 2008]. Sus intervalos dimensionales se pueden observar en la Figura 3.

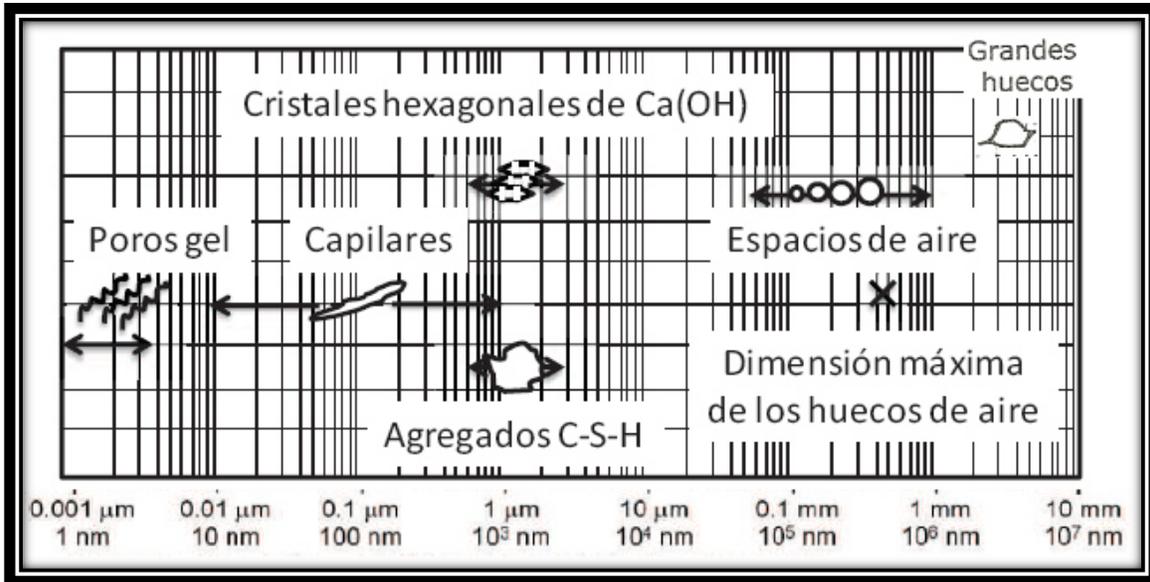
- Fase sólida. Son todos aquellos componentes producto de las reacciones de hidratación del cemento con el agua de reacción de la mezcla de concreto.
- Red porosa. La cantidad de poros presentes en la mezcla de concreto está relacionada directamente con su relación  $a/mc$ , debido a que el máximo de agua que se combina químicamente con el cemento en las reacciones de hidratación no es mayor que 0.24 veces su peso [Maruya et. al., 2003]; sin embargo, usualmente se utiliza una mayor cantidad de agua en la dosificación de concretos para alcanzar la trabajabilidad deseada en la mezcla. Al final de la hidratación del

cemento, los precipitados o fases sólidas producidas no son suficientes para llenar los espacios que ocupaba el agua extra cuando ésta se evapora: por lo tanto, se crea una red de huecos o estructura porosa. Esta estructura porosa, además es función de la compactación del material, del contenido de cemento y de su grado de hidratación.

Esta estructura de poros se puede clasificar por su tamaño y distribución [Garcés et. al., 2008]. Los que suelen afectar a la durabilidad de la estructuras de concreto reforzado son los mesoporos y macroporos, especialmente si se encuentran interconectados, facilitando los fenómenos de transporte, sobre todo de sustancias solubles en líquidos y gases.

- Microporos. También llamados poros de gel, son los que se encuentran entre las fibras de S-C-H (Silicatos de Calcio Hidratado). Su tamaño oscila entre un diámetro,  $\phi$ , de 0.2 nm a 4.0 nm y ocupan un 28% del volumen total de la pasta de concreto. Éstos no afectan la durabilidad del concreto ni a la protección de la armadura, debido a que son demasiado pequeños para permitir el transporte significativo de especies agresivas; no obstante, el agua contenida en ellos puede afectar la estabilidad volumétrica, en su conjunto.
- Mesoporos. También llamados poros capilares, son producto de los volúmenes que no son cubiertos por los productos hidratados o el cemento anhídrido. El volumen, tamaño y cantidad de estos poros depende fundamentalmente de la relación a/mc y del grado de hidratación de cemento. Su tamaño oscila entre  $\phi$  de 10 nm a 1  $\mu\text{m}$ . Son los responsables de la entrada de agentes agresivos por capilaridad y tensión superficial.
- Macroporos. Suelen provenir de burbujas de aire que se quedan atrapadas en el concreto, y suelen presentarse de forma esférica con  $\phi$  superiores a los 50  $\mu\text{m}$ . Su presencia se debe a dos causas fundamentales: la primera sería el amasado, donde los poros originados pueden llegar hasta  $\phi$  de 3 mm y su presencia aumenta debido a la compactación inadecuada. La

segunda puede producirse premeditadamente, mediante aditivos, para mejorar las prestaciones del material frente a ciertos ambientes agresivos.



**Figura 3.** Intervalo dimensional de sólidos y poros en la pasta de cemento hidratada [Metha, 1993].

- Fase acuosa. Esta fase se encuentra contenida en la estructura porosa de la pasta de cemento endurecida y puede clasificarse en función del grado de enlace con las superficies de los poros. Según el modelo de Feldman-Sereda, en la pasta de cemento endurecida y saturada, la humedad puede estar presente como agua ligada químicamente, interlaminar y capilar.
  - Agua ligada químicamente. También llamada agua adsorbida, es el agua que forma parte de la estructura de los productos hidratados y no se pierde por secado, salvo cuando se calienta a 1000 °C, causando su descomposición.
  - Agua interlaminar: También llamada agua de gel, está asociada a la estructura laminar del gel S-C-H y, por lo tanto, es de carácter estructural. Forma una monocapa de agua fuertemente enlazada a las láminas del gel por puentes de hidrógeno. Su pérdida se produce en condiciones muy

secas, cerca del 11% de humedad relativa a temperaturas mayores que los 100 °C. Las consecuencias de su pérdida son irreversibles en la estabilidad del material.

- Agua capilar. Es el agua presente en los poros capilares, su propiedad de movimiento depende de la distancia a la superficie del poro a la que se encuentra. Desde este punto de vista, se puede dividir en dos categorías:
  - Agua sujeta a tensión capilar. Es el agua contenida en los poros capilares pequeños, su evaporación puede alterar la estabilidad volumétrica de la masa.
  - Agua libre. Es el agua contenida en los poros grandes. su evaporación no produce alteraciones volumétricas de la masa.

Hay cierta agua restante de las reacciones de hidratación, que queda atrapada en el interior de la pasta. Dentro de ella se pueden encontrar disueltos iones tales como  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , además de los que penetren desde el exterior, tal como el ion  $\text{Cl}^-$ , recibe el nombre de solución poro y su composición varía, dependiendo de la relación a/mc, del cemento usado y la edad del concreto.

En resumen:

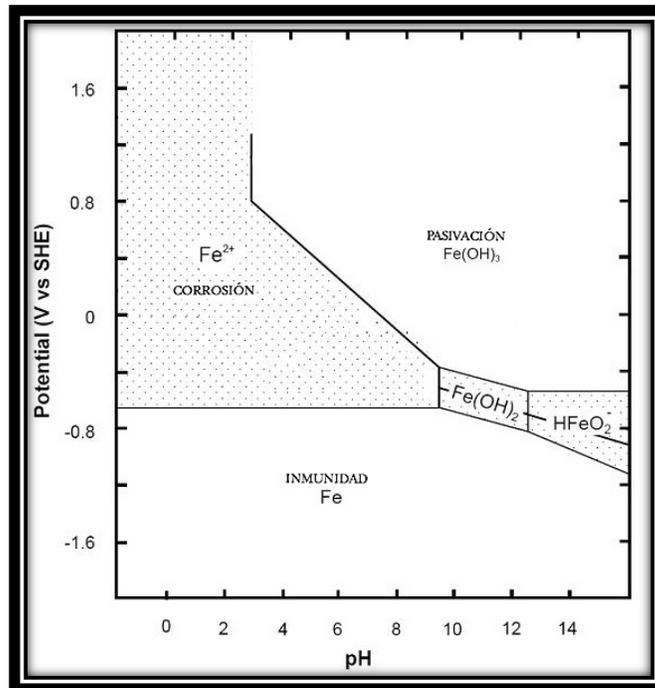
- El concreto actúa como un recubrimiento que protege al acero del medio; sin embargo, su inherente porosidad (abierta) es un factor crítico en la corrosión del acero de refuerzo. Pero, en realidad, no es la porosidad, sino el contenido de humedad dentro de los poros capilares, el factor desencadenante del proceso de degradación del acero, ya que representa el electrolito necesario para el proceso de corrosión, y en muchos casos el medio a través del cual se transportan agentes agresivos como los iones  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{CO}_2$ .
- Los mecanismos a través de los que se transporta la masa (iones y gases), en la estructura porosa del concreto utilizan el agua evaporable, libre o solución poro, ya

que el agua absorbida en las paredes de los poros casi no contribuye a los fenómenos del transporte. Dichos mecanismos de transporte son: la capilaridad, la permeabilidad por gradientes de presión, la difusión por gradientes de concentración y la migración por gradientes de potencial eléctrico. Cabe mencionar que las propiedades de transporte variarán debido a que el agua evaporable o solución poro nunca alcanzará un estado estable, por estar en función de la humedad del medio ambiente.

#### 1.2.2. Protección química.

El ambiente altamente alcalino del concreto se genera principalmente por el hidróxido de calcio o portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que se forma durante la hidratación de los silicatos y los álcalis  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  propios del cemento; lo que genera en el concreto recién mezclado un pH de 12 a 13.5 [Garcés et. al., 2008]. Esta alta alcalinidad significa una abundancia de iones hidroxilo  $(\text{OH})^-$  que, por tener alta adsorbilidad en la superficie metálica, modifican el proceso de oxidación en los sitios anódicos, de tal manera que la liberación de iones ferrosos  $\text{Fe}^{2+}$  a la solución se ve impedida por la formación de una capa de óxidos; es decir, el metal no se transforma a una especie soluble, sino a un producto de corrosión sólido no soluble y, además, de carácter protector [Escobar, 2012]. Bajo estas condiciones y con la presencia de oxígeno, al acero se encontrará en un estado pasivo.

Esta protección química tiene fundamento en los estados termodinámicos del hierro en agua que han sido estudiados ampliamente [Pourbaix, 1987] y son presentados en su diagrama de pH-potencial de la Figura 4.



**Figura 4.** Diagrama pH-Potencial simplificado del hierro en contacto con el agua, mostrando regiones termodinámicamente estables [Pourbaix, 1987].

En el concreto no carbonatado y libre de cloruros, la concentración de iones hidroxilo varía desde 0.1 M a 0.9 M, debido a la presencia de NaOH y KOH, manteniendo una alta alcalinidad y un entorno favorable para la pasivación del acero de refuerzo [Bertolini et al., 2004]. Sin embargo, existen factores desencadenantes que pueden generar la pérdida de pasividad, los que se pueden clasificar en dos grandes mecanismos:

- 1) El primero se produce cuando el concreto se somete a carbonatación, acidificando el pH del concreto, que se reduce a valores cercanos a la neutralidad, como consecuencia de una drástica reducción en la concentración de iones hidroxilo ( $OH^-$ ).
- 2) El segundo mecanismo se produce por la penetración de sales provenientes del medio ambiente, que pueden romper de manera localizada la capa pasiva, como es el caso del  $Cl^-$ . Además, la adición de sales de cloruro cambia la composición química de la solución poro, dependiendo del tipo de sal: sódica o cálcica, que incrementan y reducen los valores de pH, respectivamente.

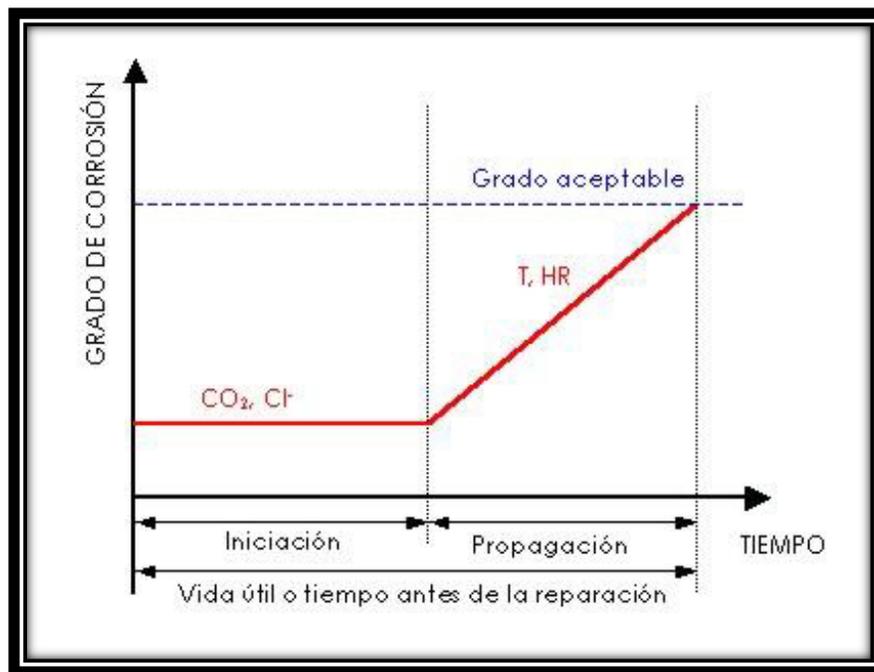
### 1.3. Durabilidad y vida útil del concreto reforzado.

Según el comité ACI 201; la durabilidad para una estructura de concreto reforzado se puede definir como la capacidad para resistir la acción del tiempo, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso que pueda causar deterioro; reteniendo las condiciones originales de forma, calidad y aptitud de servicio, ante su exposición al medio ambiente. O bien, mantener los requisitos de calidad en un periodo de vida útil, para el que existen distintas, pero similares definiciones, por ejemplo:

- a) El comité ACI 365 define vida útil como el período de tiempo después de la instalación, en el que el desempeño de la estructura cumple los valores mínimos de mantenimiento.
- b) The International Federation for Structural Concrete (CEB/FIP), en su código de diseño 2010, define Vida Útil como el periodo de tiempo durante el que una estructura de concreto reforzado es capaz de desempeñar las funciones para las que fue proyectada, sin necesidad de intervenciones no previstas.
- c) The American Section of the International Association for Testing Materials, en su norma ASTM E 632, define Vida Útil como el período de tiempo después de la construcción, durante el que todas las propiedades esenciales alcanzan o superan el valor mínimo aceptable, con un mantenimiento rutinario.
- d) The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), define la Vida Útil en su código de especificaciones de diseño para puentes, como el periodo de tiempo que se espera que la estructura esté en operación, con un mantenimiento mínimo.
- e) El Manual DURAR define la “vida útil” como un período en que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento.

Sin embargo, toda estructura de concreto reforzado expuesta al ambiente tenderá a sufrir, tarde o temprano, algún tipo de degradación [ACI 365]. Estudios recientes sobre un gran número de este tipo de estructuras han demostrado que existen numerosos y diferentes problemas de durabilidad ante las condiciones de servicio a las que son expuestas, por lo cual se han tenido que investigar con el fin de diagnosticar los problemas que las aquejan y los factores que intervienen, siendo el problema más importante el deterioro por corrosión del acero de refuerzo.

El modelo más utilizado para describir el proceso de corrosión del acero de refuerzo puede dividirse en dos periodos [Tuutti, 1982], según la Figura 5: El período de iniciación y el de propagación. El periodo de iniciación es el periodo durante el que los agentes externos, iones cloruro o dióxido de carbono, penetran el recubrimiento, pero su concentración alrededor del refuerzo aún no es suficiente para causar la corrosión de éste. El final de este período y principio del período de propagación es el momento en el que se alcanza el umbral de concentración de las especies agresivas y se produce la despasivación, dando inicio a la corrosión. Durante el período de propagación, el deterioro de las estructuras aparece como resultado de la pérdida de sección del acero de refuerzo. Esta segunda etapa termina cuando se presenta un grado inaceptable de deterioro.



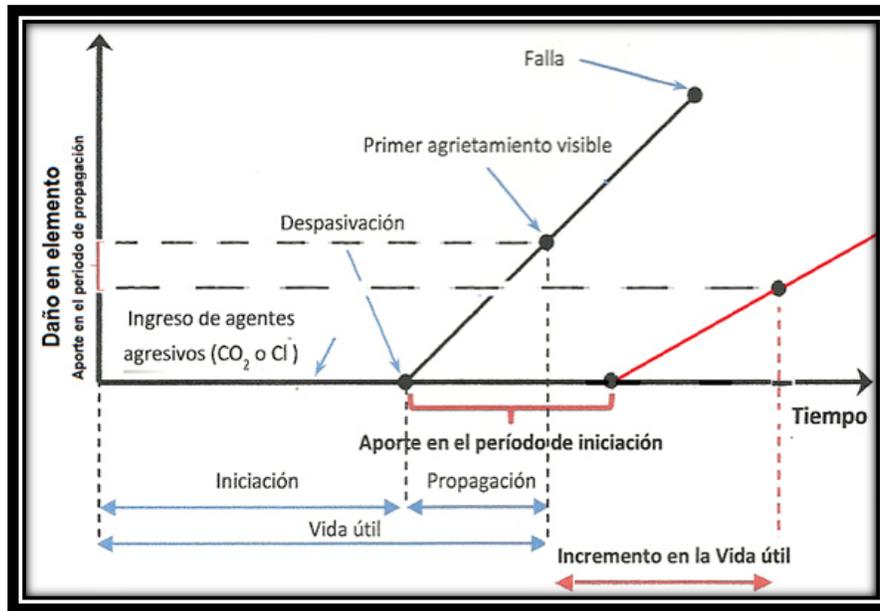
**Figura 5.** Modelo de vida útil [Tuutti, 1982].

La condición que define el fin de la vida útil puede ser la reducción de la capacidad estructural, la seguridad estructural o algún otro parámetro, como la estética. Consecuentemente, el final de la vida útil depende de la estructura, por lo tanto, la magnitud del daño provocado por el deterioro, que en la mayoría de los casos es la corrosión, define el fin de la vida útil [Weyers, 1998].

Algunos autores [Funashi, 1990] definen el fin de la vida útil como el momento en el que el acero se ha despasivado, lo que sería equivalente al periodo de iniciación del modelo de Tuutti, que es una consideración muy conservadora, especialmente si el periodo de iniciación es muy corto.

Otros autores [Sygulan et. al., 1984] prefieren identificar la vida útil como el momento en que ocurren el agrietamiento del recubrimiento, ya que el agrietamiento del concreto puede resultar en una rápida difusión de agentes agresivos, lo que deriva en una mayor reducción de la sección transversal del acero y de la capacidad estructural. Por lo anterior, se puede definir la “vida útil” como el tiempo de iniciación de la corrosión, más el tiempo en que se genera el primer agrietamiento.

Se han realizado diversas investigaciones para elevar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, que van desde el incremento del espesor del recubrimiento y la calidad del concreto [Gu et. al., 1984]; el uso de cementos compuestos, puzolanas [Fajardo et. al., 2008] y aditivos para hacer más impermeable la matriz de cemento [Fajardo et. al., 2015]; hasta el uso de acero galvanizado, acero inoxidable y recubrimientos sobre el acero de refuerzo para prevenir la corrosión [Rasheeduzzafar et. al., 1984; Roper, 1992]. Estos métodos de modificación sobre la superficie del acero de refuerzo han demostrado ampliar considerablemente el período de iniciación y disminuir la velocidad del periodo de propagación en el modelo de vida útil, como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.** Aporte en el periodo de iniciación y propagación del uso de recubrimientos sobre la superficie del acero de refuerzo.

#### 1.4. Impacto ambiental del concreto reforzado.

El calentamiento global provocado principalmente a los denominados gases de efecto invernadero es uno de los temas de sustentabilidad más recurrentes y de gran importancia actualmente. El calentamiento global está ocurriendo a un ritmo de crecimiento exponencial que puede tener consecuencias irreversibles, de no tomar acciones inmediatas. [Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2007].

La concentración promedio de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, en la actualidad, es de 390 ppm, la más alta concentración registrada históricamente; por lo que la IPCC recomienda que la tasa anual de emisiones de este gas sea reducida sustancialmente. Por ello las industrias generadoras de electricidad, transporte, refinación de petróleo y de construcción han contemplado importantes medidas para reducir la tasa de emisiones globales de CO<sub>2</sub> hacia el año 2030 [Metha et. al., 2009]. Las industrias del acero, el cemento y el concreto se encuentran clasificadas dentro de las categorías de energía y procesos industriales.

El proceso de fabricación del acero primario consume gran cantidad de energía, dando lugar a la liberación de gases de efecto invernadero. En promedio, la producción de 1

tonelada de acero primario genera 1.7 toneladas de CO<sub>2</sub>. Con los avances tecnológicos se ha conseguido una mayor eficiencia energética, el aprovechamiento de los subproductos industriales del proceso y abatir las emisiones de gases de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, la creciente demanda y producción de acero ha compensado en cierta medida la cantidad total de emisiones de este tipo de gases. En resumen, la producción del acero representa aproximadamente el 5.5% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> y el 27% de las emisiones industriales [World Steel Association, 2013].

El cemento portland, por su parte, es uno de los materiales más empleados en la industria de la construcción y su producción es responsable de una gran cantidad de gases de efecto invernadero. Su impacto más importante al medio ambiente son las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la calcinación de las materias primas y los combustibles fósiles en la producción del clínker [Uzal, 2007]. Los cementos actuales contienen, en promedio, un 84% de clínker y por cada tonelada de clínker se liberan 0.9 toneladas de CO<sub>2</sub> [Metha et. al., 2008]. En 2007, The European Cement Association - [CEMBUREAU, 2008] la industria concretera de nivel mundial consumió cerca de 3.05 billones de toneladas de cemento, lo cual representa 2.77 billones de toneladas de clínker, formando una huella de carbono de proporciones considerables. Esto hace responsable a la industria cementera del 7% de emisiones totales de CO<sub>2</sub>.

El aumento de la vida útil de las estructuras de concreto reforzado ha sido una alternativa viable para reducir el impacto ambiental generado por el consumo del acero y del cemento. Dentro de los esfuerzos realizados para combatir este problema, resalta el uso de recubrimientos y modificaciones en la superficie del acero de refuerzo.

### **1.5. Procesos de deterioro del concreto reforzado.**

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado se ha visto comprometida debido a distintos procesos de deterioro, que tienen su origen en diferentes fenómenos concernientes al concreto en estado fresco, en estado endurecido o al concreto reforzado como tal. Dichos fenómenos se describen y se citan de manera general en la Figura 7; sin embargo el objetivo de este trabajo de investigación está orientado al análisis y estudio del comportamiento electroquímico del concreto reforzado en ambientes ricos en cloruros.

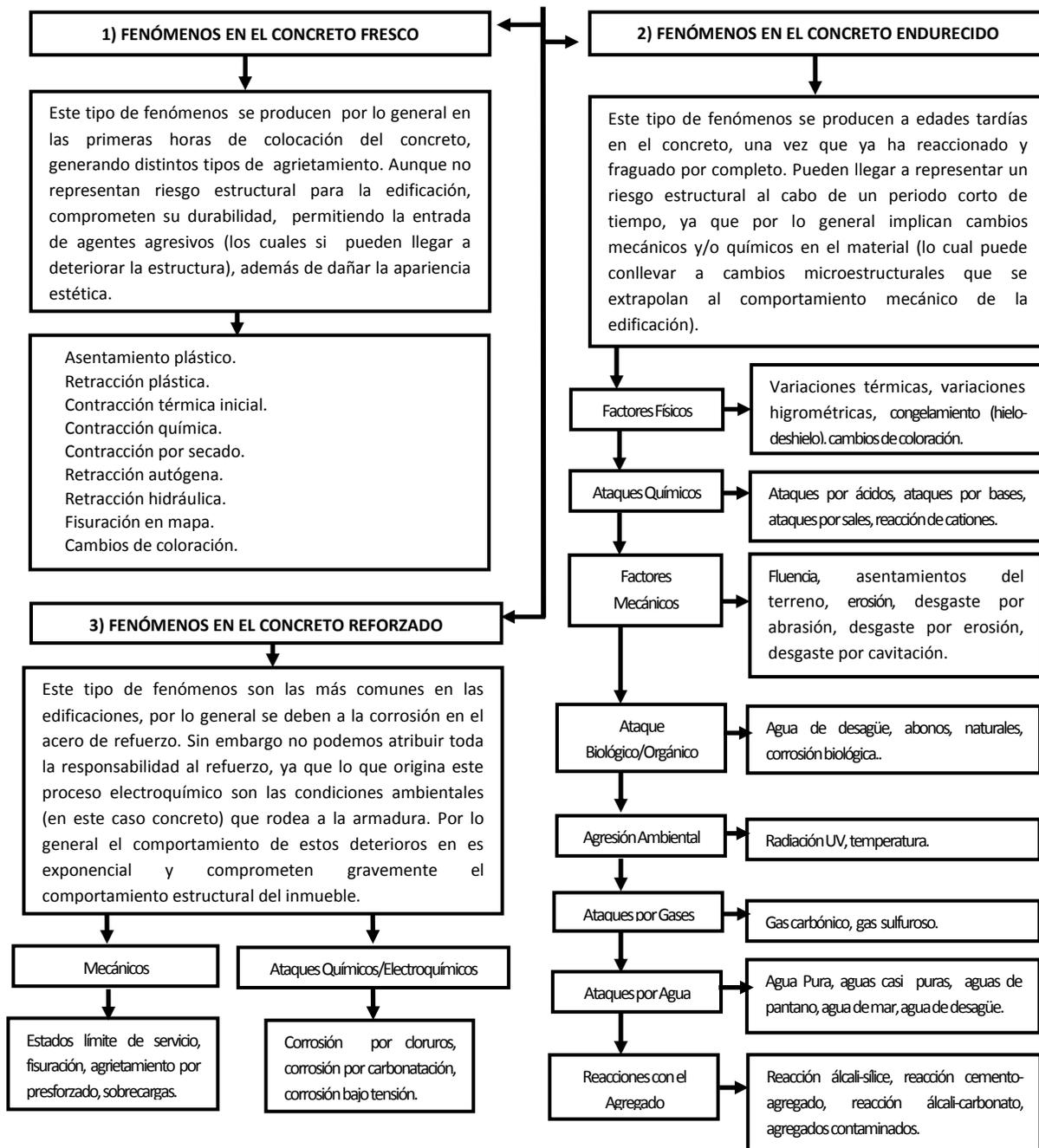
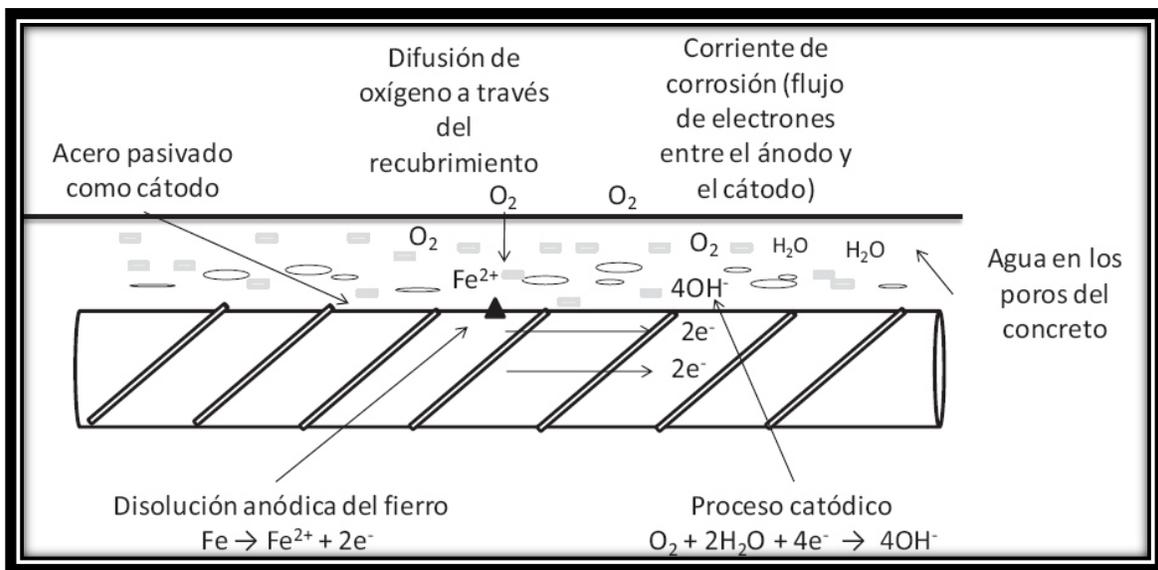
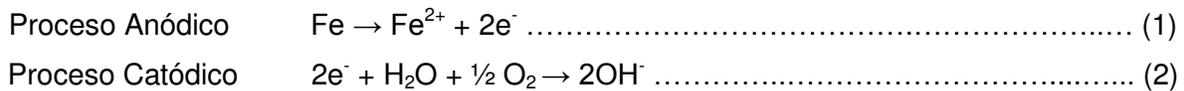


Figura 7. Procesos de deterioro en el concreto reforzado.

### 1.6. Corrosión del acero de refuerzo.

El deterioro por corrosión del concreto reforzado es un fenómeno de naturaleza electroquímica; en el que el acero de refuerzo lleva a cabo las funciones de ánodo, cátodo y puente eléctrico (necesario para la transferencia de carga), mientras que el concreto representa el electrolito (a través del cual pueden migrar las especies iónicas). Este proceso causa una disolución del acero metálico para formar productos de corrosión sólidos, que pueden ser óxidos o hidróxidos, dependiendo de las condiciones del medio ambiente [Garcés et. al., 2008; Benture et. al., 1997]

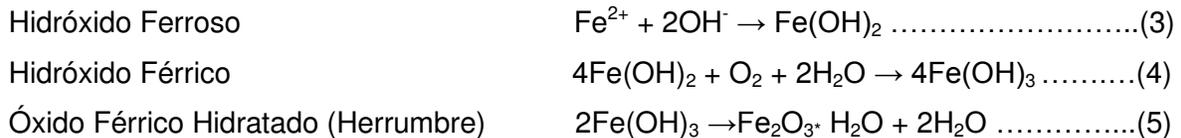
Para el acero embebido en concreto, la reacción de media celda anódica por lo general es la oxidación del hierro descrita en la Ecuación 1. Al ocurrir la reacción de oxidación, el hierro libera dos electrones que son consumidos en otra parte de la superficie del acero para mantener la neutralidad eléctrica, produciendo la reacción catódica, en la que se reduce oxígeno y se lleva a cabo un consumo de agua, para formar iones hidroxilo; tal como se indica en la Ecuación 2. Dicho proceso se puede observar en la Figura 8.



**Figura 8.** Formación de la celda galvánica del acero embebido en concreto

[Hernández, 2013].

Una vez que suceden las reacciones anódica y catódica, se comienzan a formar los productos de corrosión, como se muestra en las Ecuaciones 3, 4 y 5, lo que produce manchas en la superficie del concreto, grietas y desprendimiento, como consecuencia de la corrosión del acero de refuerzo.



Cualquiera de estas reacciones, anódica o catódica, dependen de la disponibilidad de oxígeno y del valor del pH de la solución poro que se encuentra en las proximidades del acero. Esto se demuestra en el diagrama de Pourbaix, de la Figura 4, donde se limita termodinámicamente las áreas de estabilidad para cada una de las especies involucradas en las reacciones mencionadas anteriormente, como una función del potencial electroquímico y el pH del medio ambiente.

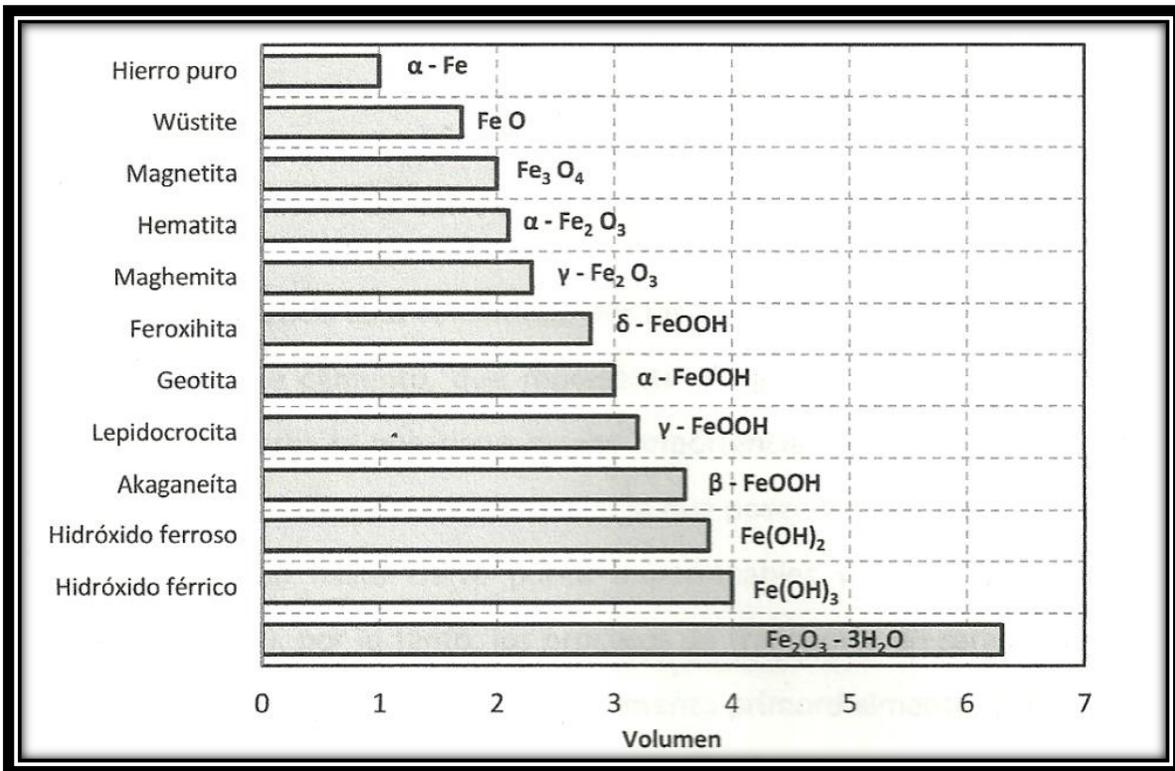
Aunque la corrosión del acero es controlada por la capa pasiva de óxidos formada naturalmente como producto de la sinergia con el concreto, la disminución de la alcalinidad del concreto cuando éste reacciona con sustancias ácidas del medio ambiente (CO<sub>2</sub>) o la presencia de una cantidad suficiente de cloruros (Cl<sup>-</sup>), en la interfase acero-concreto, puede romper esta estabilidad termodinámica, quedando su velocidad de disolución en función de factores ambientales, como la humedad, la temperatura y la misma concentración de las especies agresivas.

### 1.7. Consecuencias de la corrosión.

Como ya se ha hecho mención, el entorno alcalino del concreto forma sobre la superficie del acero una película de óxido estable que lo protege de la corrosión. Sin embargo, la corrosión se puede iniciar debido a la penetración de agentes agresivos que pueden disminuir su alcalinidad (CO<sub>2</sub>), volviendo al acero de refuerzo inestable al medio que lo rodea; o bien, por iones que pueden romper la capa pasiva del acero de refuerzo, como el cloruro (Cl<sup>-</sup>).

Una vez que la capa pasiva está dañada, se inicia la corrosión electroquímica del acero y los productos de corrosión tienden a acumularse en la interface acero-concreto. Conforme los productos de corrosión incrementan su cantidad y volumen, se generan presiones internas que inducen agrietamientos, desprendimientos o delaminaciones del recubrimiento de concreto. Éste daño provoca la reducción o pérdida de las características de funcionalidad, seguridad y vida útil de las estructuras [Weyers, 1998]. El proceso de agrietamiento del recubrimiento de concreto por corrosión del acero de refuerzo consta de cuatro etapas:

- I. Inicio de la corrosión. Una vez que se ha dañado la capa pasiva, comienza la corrosión del acero de refuerzo; dependiendo de su grado de oxidación y de condiciones como el pH de la solución, la disponibilidad de oxígeno y el contenido de humedad. Los diferentes productos de corrosión tienen diferentes densidades y volúmenes, que van de 2 a 7 veces mayor que el del metal original, como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9.** Volumen relativo del acero y sus productos de corrosión [Shahzma, 2009].

- II. Expansión libre. Esta etapa recibe dicha denominación debido a que no todos los productos de corrosión generan presión en el concreto circundante, esto se debe a que algunos de ellos llenan los vacíos de la interface acero-concreto o pueden migrar fuera de dicha interface a través del sistema de poros [Liu et. al., 1998; Andrade et. al., 1993]. El volumen del espacio libre en los poros está directamente relacionado con el área del acero de refuerzo, la relación  $a/mc$ , el grado de hidratación del cemento y el grado de consolidación del concreto, cuando el espacio de dichos poros se satura se inicia la siguiente etapa.
- III. Esfuerzos de tensión por corrosión. Una vez que estos poros se saturan, se comienza a generar una presión expansiva, al incrementarse la acumulación de productos de corrosión del acero de refuerzo.
- IV. Agrietamiento del recubrimiento. Una vez que el esfuerzo interno generado supera el esfuerzo de tensión del concreto, se posibilita el agrietamiento, la fractura, el desprendimiento o la delaminación del recubrimiento [Liu et. al., 1998; González et. al., 1996]; además de la consecuente disminución de la sección transversal y la capacidad estructural del acero de refuerzo [Wheat et. al., 2001].

#### **1.8. Impacto económico de los procesos de la corrosión.**

Como ya se ha mencionado, el concreto reforzado es el material más empleado en la industria de la construcción. Sin embargo, recientemente los problemas de durabilidad que aquejan a estos tipos de estructuras son cada vez más frecuentes, teniendo como principal protagonista a la corrosión del acero de refuerzo. Este tipo de fenómeno afecta la funcionalidad, la eficiencia y la estética durante la operación y el mantenimiento de los elementos estructurales, acortando su vida útil y causando pérdidas económicas de inversión por deterioro prematuro, causando costos directos e indirectos [Garcés et. al., 2004]:

Costos directos:

- Son los costos atribuibles a la reparación parcial o sustitución completa de elementos estructurales, la implementación de sistemas de monitoreo de la corrosión utilizando técnicas electroquímicas, o bien son los costos imputables a remodelación o mantenimiento de la estructura durante su operación.

Costos indirectos:

- Son los costos atribuibles a la suspensión de la utilidad de la estructura de forma temporal o permanente.

El proceso de deterioro por corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto es un problema importante y el parámetro utilizado para evaluar este fenómeno es la pérdida económica expresada como porcentaje del Producto Interno Bruto - PIB de un país. The Federal Highway Administration (U.S. – FHWA), en 2002 dio a conocer un estudio que define el costo total directo anual de la corrosión como el generado por los propietarios y operadores de las estructuras, los fabricantes de productos y proveedores de servicios. Mientras los costos indirectos son atribuibles a factores tales como la pérdida de productividad debida las interrupciones, las demoras, los errores y los litigios. En el mismo estudio se publicó que los costos directos anuales asociados con la corrosión metálica en U.S. es de 276 billones de dólares, siendo aproximadamente el 3.1% del PIB; sin embargo, el estudio estima conservadoramente el costo indirecto igual al costo directo, por lo que se tiene un total de 552 billones de dólares, lo que representa el 6% del PIB.

En los países industrializados se estiman pérdidas directas por el 3.5% del PIB y se ha estimado que las pérdidas por corrosión en la industria de la construcción representan del 15-20% del total. Esto es aproximadamente 0.6% del PIB [Garcés et. al., 2004], por lo que el ahorro que puede lograr un país en 30 años por investigar y construir estructuras durables puede ser detonante fundamental en el futuro, dada la escasez de materiales y recursos [Hernández, et. al. 2006]. En México no existen datos suficientes para establecer un porcentaje; sin embargo, se estiman pérdidas por el 4% del PIB de manera optimista, si se trata de abatir los costos con una correcta difusión de los conocimientos básicos del fenómeno de la corrosión, para hacer una planeación y una previsión adecuadas.

### 1.9. Corrosión por cloruros.

El fenómeno de la corrosión en el acero de refuerzo debido a los cloruros es una de las principales formas de ataque del medio ambiente al concreto reforzado, lo que puede provocar reducción en la capacidad estructural y de servicio, así como en la estética de la edificación misma. El problema es que los productos de corrosión (óxidos / hidróxidos), se expanden ocupando un gran volumen, lo que puede crear tensiones circunferenciales alrededor del refuerzo, provocando agrietamientos y desprendimientos de concreto. Esto facilitaría la entrada de humedad, de oxígeno y de cloruros libres, acelerando el proceso de corrosión [Zoubir, 2006].

Una teoría que explica este fenómeno es la “formación del compuesto” [Castro, 2001], que plantea que los cloruros libres forman un compuesto soluble con los iones de hierro; Ecuación (6). Éstos difunden hacia otra zona alejada del ánodo, donde el pH y la concentración de oxígeno disuelto son altos. En consecuencia, el compuesto se disocia precipitando el hidróxido de hierro, liberando los iones cloruro. Ecuación (7). Debido a que los cloruros funcionan como un catalizador y la corrosión no se detiene por la alta concentración de hierro en la vecindad del acero, el proceso puede continuar por sí mismo, emigrando los iones de hierro desde el acero y reaccionando con el oxígeno para formar óxidos o hidróxidos. Por lo tanto, en vez de que la corrosión se propague a lo largo del acero de refuerzo, continúa en las zonas anódicas, desarrollándose picaduras profundas en el acero, tal como se muestra en la Figura 10.

En México éste es un problema severo. Las agencias de transporte gastan millones de pesos anuales en la construcción y mantenimiento de puentes, puertos e infraestructura de concreto reforzado en las zonas costeras, debido a las condiciones corrosivas severas que representa la solución salina del agua de mar y las altas temperaturas, las que aceleran el movimiento de iones dentro del concreto. Actualmente se está desarrollando investigación acerca de cómo incrementar la vida útil de este tipo de estructuras, además disminuir el costo y la frecuencia de las reparaciones.

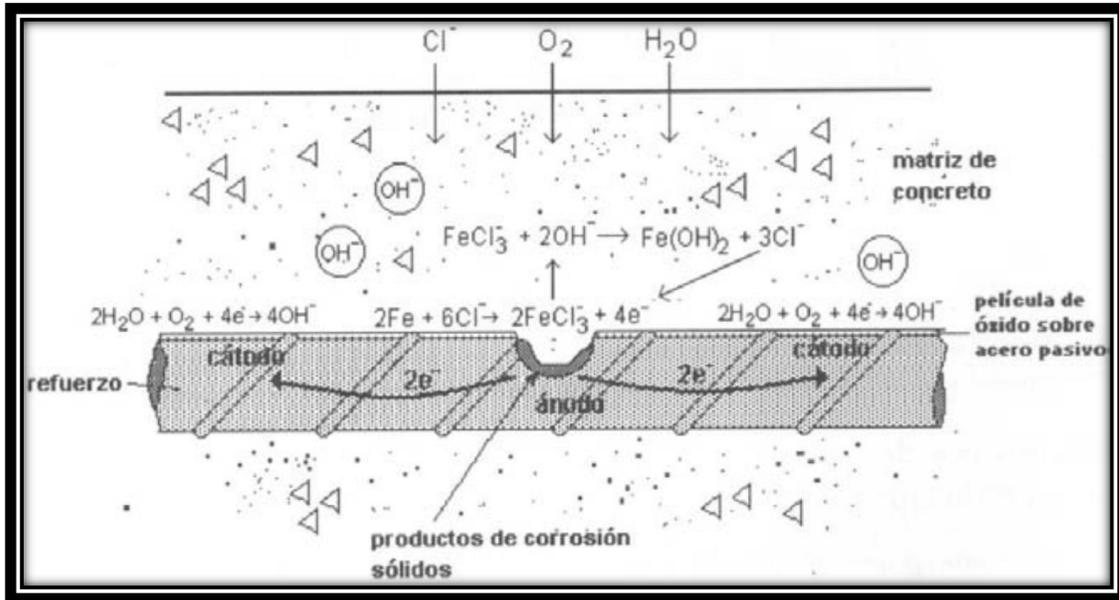
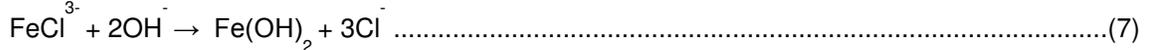
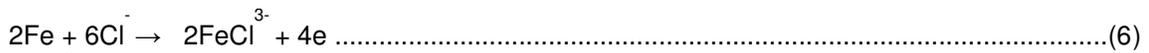


Figura 10. Esquema del mecanismo de corrosión debido a cloruros [Castro, 2001].

Ecuaciones correspondientes a la Teoría “Formación del Compuesto” [Castro, 2001]:



### 1.10. Contenido crítico de cloruros.

El concepto de contenido crítico de cloruros o concentración crítica de cloruros, anteriormente conocido también como umbral de cloruros (CCC) se define como la cantidad necesaria de cloruros requerida en la interfase acero-concreto, para romper la capa pasiva producto de la sinergia química entre el acero y el concreto, para iniciar la corrosión [Maldonado, 2009]. Aunque se puede expresar en porcentaje de cloruros por masa de concreto o como la relación  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  presente en la solución poro, por lo general, se expresa en porcentaje de cloruros por masa de cemento.

Para obtener esta relación de porcentajes, por lo general se lleva a cabo un seguimiento electroquímico mediante diferentes técnicas, como el potencial de circuito abierto (OPC), la resistencia a la polarización lineal (LRP) o la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS); y al momento en que se detecta el cambio representativo de un estado de pasividad a uno de activación se procede a realizar un análisis químico mediante distintas técnicas, como la titulación potenciométrica, fluorescencia de rayos – X (FRX), la espectroscopía de energía dispersiva de rayos – X (EDS) de una muestra de concreto que se encuentre próxima a la interfase acero-concreto. Además, se pueden obtener los perfiles de concentración de cloruros a través del concreto, con el fin de hacer modelaciones matemáticas de fenómenos de transporte.

Cabe mencionar que la CCC es un valor que se encuentra en función de distintos parámetros, tales como: el tipo de cemento, el contenido de cemento, el contenido de  $C_3A$  del cemento, las proporciones de la mezcla, la relación a/mc, la temperatura, la humedad relativa y las condiciones superficiales del acero de refuerzo, así como el tipo de sal y fuente de donde proviene [Alonso et al., 2000]. Por otra parte, pueden existir variaciones de cuantificación que se pueden atribuir a las técnicas electroquímicas de monitoreo o de análisis químico de las muestra; por lo que este valor nunca será una constante, sino que representa un intervalo de valores obtenidos bajo ciertas condiciones específicas de investigación.

### **1.11. Medidas de protección contra la corrosión.**

La corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto a causa de la penetración de agentes agresivos como el  $CO_2$  y/o iones cloruro, ha sido contrarrestada desde diversos frentes (Tabla 1). Algunos investigadores han trabajado con el mejoramiento de las propiedades del concreto, densificando la matriz cementante mediante el uso de puzolanas naturales y/o artificiales [Fajardo et. al., 2008]; mientras que otros, como ya se ha mencionado, han propuesto la modificación de las propiedades de la superficie del acero de refuerzo [Castro, 2011]. Además, recientemente se ha trabajado con métodos alternos de protección externa, como la extracción electroquímica de cloruros [Sánchez M., 2004] y la realcalinización del concreto carbonatado [González et. al., 2010].

**Tabla 1.** Métodos de prevención y protección contra la corrosión en concreto reforzado.

<u>Modificación de las Propiedades del Concreto</u>	<u>Modificación de las Propiedades del Refuerzo</u>	<u>Métodos alternos de protección externa</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiales cementantes suplementarios.</li> <li>• Inhibidores de corrosión agregados a la mezcla de concreto.</li> <li>• Empleo de aditivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceros galvanizados.</li> <li>• Aceros inoxidables.</li> <li>• Aceros termotratados.</li> <li>• Aceros con recubrimientos metálicos-poliméricos.</li> <li>• Recubrimientos superficiales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protección catódica.</li> <li>• Extracción electroquímica de cloruros.</li> <li>• Recubrimientos superficiales sobre el concreto.</li> </ul>

Estos métodos se han desarrollado para proteger al concreto reforzado de la corrosión; dando lugar a una serie de normas, recomendaciones, técnicas de evaluación, procedimientos de inspección y métodos de prueba, desarrollados por diversos organismos internacionales como la ASTM, el RILEM, la NACE, entre otros. Dichos procedimientos fueron desarrollados con base en las barras de refuerzo de acero al carbono, con acabado superficial metálico; pero algunos pueden adaptarse al acero inoxidable, al acero galvanizado o al acero termotratado.

El hecho de utilizar cualquiera de los métodos de prevención y protección requiere una gran cantidad de estudios previos a su empleo práctico o implementación industrial, para determinar qué tan efectivos son contra la corrosión y en qué etapa del proceso de deterioro pueden ser aplicados.

### **1.12. Técnicas de evaluación para la corrosión.**

Los estudios de durabilidad acerca del contenido crítico de cloruros habían tenido siempre grandes limitaciones, debido a la falta de accesibilidad directa al acero de refuerzo en las

estructuras de concreto y a la necesidad de romper probetas para obtener un solo dato utilizando técnicas gravimétricas [Garcés et. al., 2004]. Con el avance tecnológico se han desarrollado técnicas electroquímicas y equipos especiales para medir los niveles de riesgo por corrosión en el concreto reforzado.

Estas técnicas permiten en un corto tiempo de medición y el seguimiento de la cinética de la corrosión, reduciendo el daño estructural y estético de la estructura; sin embargo, fueron desarrolladas para materiales metálicos, adaptando cada una de las técnicas al caso particular del acero de refuerzo embebido en concreto; por lo que no son válidas para aceros con recubrimientos no conductores, presentando diferencias en su aplicación e interpretación de resultados. Las técnicas para el monitoreo de la corrosión más comunes en la actualidad son las siguientes [Song et. al., 2007]:

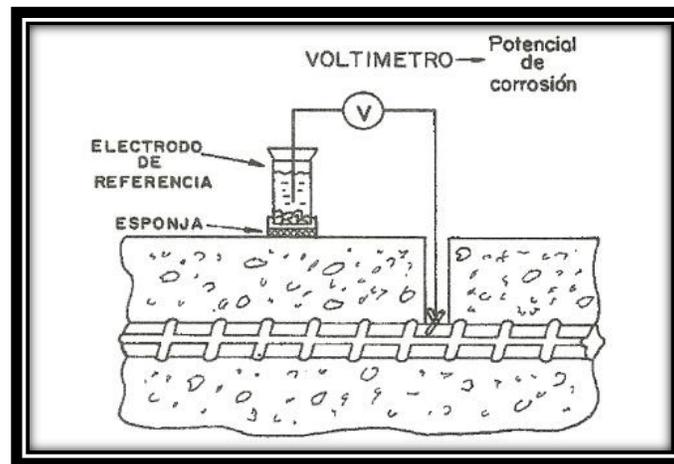
- Potencial de circuito abierto (OPC).
- Resistencia a la polarización lineal (LPR).
- Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

#### 1.12.1. Potencial de circuito abierto (OPC).

La corrosión del concreto reforzado es un fenómeno electroquímico que involucra una reacción rédox. En el equilibrio la intensidad de corriente de los procesos anódico y catódico es igual, recibiendo el nombre de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), que es una magnitud eléctrica que se puede asociar a una velocidad de corrosión. Dentro de este equilibrio, el metal se corroe a un potencial característico de su naturaleza y la del medio, recibiendo el nombre de potencial libre, potencial mixto o potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ).

El potencial del acero embebido en concreto se mide frente a un electrodo de referencia, obteniendo un potencial mixto, que representa un equilibrio entre las reacciones anódicas y catódicas del sistema. De acuerdo con ciertas relaciones termodinámicas, es posible identificar el estado en que se encuentra el acero justo al momento de la medición, identificando si el metal se encuentra en estado activo o pasivo [Vagn, 2008].

La norma ASTM C 876 describe el procedimiento estandarizado para este método electroquímico, que consiste en conectar el electrodo de trabajo (acero de refuerzo) con un electrodo de referencia, midiendo la diferencia de potencial existente entre éstos, a través de un voltímetro. Para cerrar el circuito, se debe colocar una esponja húmeda entre el electrodo de referencia y el concreto. El esquema se muestra en la Figura 11.



**Figura 11.** Esquema de medida del potencial de corrosión de la armadura [Garcés et. al., 2004].

Además del procedimiento estandarizado, ASTM C 876 establece los criterios de valoración de potenciales de acero de refuerzo embebido en concreto. Relacionando el valor del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) contra el riesgo de corrosión que se puede presentar, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Criterios de valoración de riesgos de corrosión.

<b><math>E_{corr}</math> (mV) vs Electrodo de Calomel Saturado (ECS)</b>	<b>Riesgo de Corrosión</b>
$\geq -123$	10%
-123 a -273	50%
$\leq -273$	90%

1.12.2. Resistencia a la polarización lineal (LRP).

La resistencia a la polarización lineal es una técnica por medio de la cual se puede conocer de manera indirecta la velocidad de corrosión, utilizando la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), que representa la cantidad de corrosión generada por unidad de área en un tiempo determinado. La  $i_{corr}$  puede ser estimada en  $\mu A/cm^2$ , mientras que la velocidad de corrosión en  $\mu m/año$ . El uso de esta técnica radica en la aplicación de incrementos de potencial en el acero y la apreciación de la variación de corriente para dichos potenciales. La curva generada representa una relación lineal entre la densidad de corriente y el potencial. A la razón de cambio de esta curva se le conoce como resistencia a la polarización [Genescá, 2003].

En las mediciones de LRP el acero de refuerzo es perturbado por una señal a partir de potencial de equilibrio. Esto se puede lograr potencioestáticamente al cambiar el potencial del acero de refuerzo ( $\Delta E$ ) y monitorear el cambio de corriente ( $\Delta I$ ) después de un tiempo fijo. Alternativamente se puede hacer galvanostáticamente, aplicando una corriente pequeña ( $\Delta I$ ) y monitoreando el cambio de potencial ( $\Delta E$ ), después de un periodo fijo de tiempo [Won, 2007].

En cada caso, las condiciones se seleccionan de tal manera que el cambio en el potencial está comprendido en el intervalo lineal de Stern-Geary, que para el acero de refuerzo varía entre 10-30 mV [Stern-Geary, 1957]. La resistencia a la polarización LRP del acero entonces se calcula como se muestra en la Ecuación 8:

$$LRP = \Delta E / \Delta I \dots\dots\dots(8)$$

Dónde:

LRP = Resistencia a la polarización lineal.

$\Delta E$  = Diferencia de potencial.

$\Delta I$  = Diferencia de corriente.

A partir de la cual la velocidad de corrosión,  $i_{corr}$ , puede ser calculada como se muestra en la Ecuación 9:

$$I_{corr} = \beta / LRP \dots\dots\dots(9)$$

Donde B de la ecuación simplificada de Stern-Geary se relaciona con las pendientes anódicas y catódicas ( $b_a$  y  $b_c$  respectivamente) que, por lo general, se encuentran en el intervalo de 12 a 52 mV, dependiendo del sistema. Para el sistema de acero embebido en concreto, B toma el valor de 52 mV, en estado pasivo y 26 mV en estado activo. Con la finalidad de determinar la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), el área superficial metálica A que ha sido polarizada se introduce en la Ecuación 10:

$$i_{corr} = I_{corr} / A \dots\dots\dots(10)$$

En resumen, para las presentes condiciones experimentales y siguiendo las recomendaciones de ASTM G 59: el potencial de circuito abierto ( $E_{corr}$ ) del refuerzo se midió frente a un electrodo de referencia ECS. A partir de dicho potencial, el acero de refuerzo fue polarizado a  $\pm 20$  mV (con la finalidad de que la corriente y el potencial aplicado mantuvieran la relación lineal, evitando la polarización excesiva e irreversible del electrodo de trabajo en el sistema) y a una frecuencia de 5-10mV/min, para finalmente construir una gráfica  $\Delta E$  vs  $\Delta I$ , mediante la cual se obtuvo la densidad de corriente. La Red DURAR [Manual DURAR, 1997], haciendo uso de la técnica de resistencia a la polarización lineal propone una serie de valores de densidad de corriente para el acero al carbono utilizado como refuerzo embebido en concreto a partir de los cuales se puede definir la condición pasiva o activa de dicho metal, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Criterio de evaluación para la densidad de corriente en el campo y en el laboratorio.

$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Condición del Acero
$\leq 0.1$	Pasivo
0.1 – 0.5	Corrosión Baja
0.5 – 1.0	Corrosión Moderada
$\geq 1.0$	Corrosión Alta

### 1.12.3. Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

La técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, en el que se usa una señal de corriente alterna (CA). Esta señal se aplica sobre un electrodo (metal en corrosión) y se mide su respuesta. Generalmente se opta por aplicar una pequeña señal de voltaje (E) y medir la respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. El equipo electrónico utilizado procesa el voltaje y la corriente en función del tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancias” [Cottis R. et. al., 1999].

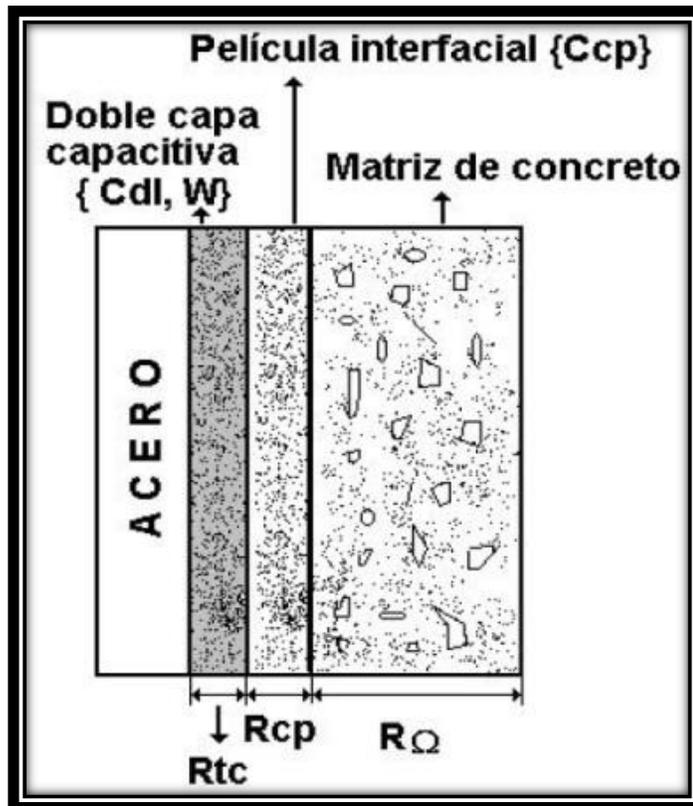
Los espectros de impedancia obtenidos suelen ser analizados mediante “circuitos eléctricos equivalentes”, compuestos por resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etc.; combinados de tal manera que reproduzcan los espectros de impedancia medidos y el fenómeno real que ocurre en el sistema.

Sin embargo, cuando se aplica una señal de corriente alterna, incluso los sistemas de corrosión simples se comportan de una manera más complicada que una simple resistencia, ya que se presenta el fenómeno de la capacitancia de doble capa debido a la separación de cargas cerca de la superficie y la resistencia de la solución. De cualquier manera, el espectro de impedancias puede usarse para identificar y cuantificar capacitancias en el sistema y para separar las diferentes resistencias: la resistencia de la solución y la resistencia a la polarización.

La técnica de EIS ha demostrado excelentes resultados en estudios de corrosión sobre concreto reforzado (Figura 12), ya que puede separar los fenómenos elementales que tienen lugar sobre el metal que se corroe, como son las reacciones electroquímicas, la adsorción de productos y el transporte de materia por difusión, entre otros; lo que permite estimar el grado de corrosión, así como proponer modelos y mecanismos de reacción del proceso de corrosión, prácticamente sin alterar las condiciones del sistema [Genescá et. al., 2003]. Los parámetros generales de aplicación se describen a continuación:

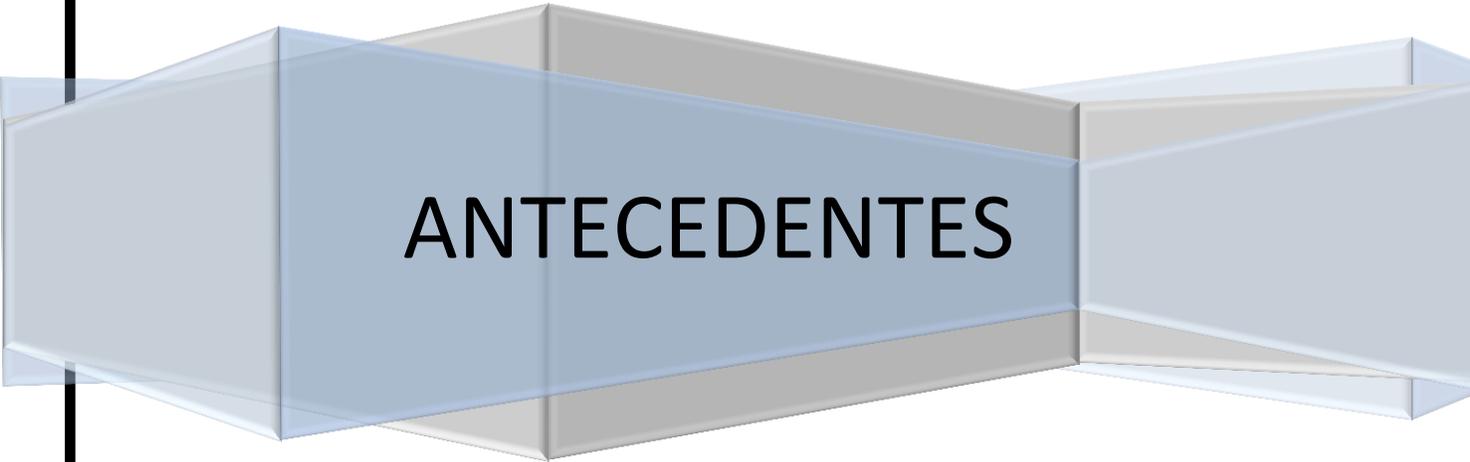
- a) A frecuencias mayores de 10 kHz, la respuesta del sistema se le atribuye a las propiedades dieléctricas del concreto.

- b) De 10 kHz a 10 Hz, la respuesta del sistema se le atribuye a las propiedades de la capa porosa.
- c) La zona de bajas frecuencias atañe a los procesos de transferencia de carga y de difusión la interfase acero – productos de corrosión del acero embebido. De 10 Hz a 0.1mHz.



**Figura 12.** Componentes equivalentes del concreto reforzado utilizando EIS.

# **CAPÍTULO 2**



**ANTECEDENTES**

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

#### 2.1. Antecedentes.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el concepto de umbral de cloruros, también conocido como contenido crítico de cloruros o concentración crítica de cloruros (CCC), se define como la cantidad necesaria de iones-cloruro en la interfase acero-concreto, para romper la capa pasiva e iniciar el proceso de corrosión. Dicha cantidad puede expresarse como la relación  $[Cl^-]/[OH^-]$  presente en la solución poro y como porcentaje de cloruros por masa de concreto; pero es más práctico expresarla como porcentaje de cloruros por masa de cemento.

No obstante, el valor de CCC se encuentra en función de distintos parámetros (sección 1.10.), así como de variaciones de cuantificación que se pueden atribuir a las técnicas electroquímicas de monitoreo o de análisis químico de las muestra. Este valor no es constante, y representará un intervalo de valores obtenidos bajo ciertas condiciones específicas de una investigación en particular.

Por otra parte, existen 2 formas en las que los cloruros se pueden encontrar al interior de la matriz cementante del concreto reforzado: libres y enlazados. Por lo general, los cloruros enlazados no representan una amenaza real a la armadura, ya que se encuentran formando compuestos estables; sin embargo, existe la posibilidad de que logren liberarse en alguna etapa del proceso de deterioro, aumentando la cantidad de cloruros libres, los cuales sí representan un riesgo severo a la armadura, al ser los iniciadores del proceso autocatalítico de corrosión electroquímica ya descrito [Castro, 2001].

El objetivo de esta investigación es obtener los perfiles de concentración de cloruros hacia la armadura a través de un recubrimiento de concreto y estimar la concentración crítica de cloruros en la interfase del refuerzo y el concreto, por titulación potenciométrica para cloruros totales respecto a la masa de cemento y por espectroscopia de energía

dispersiva de rayos – X (EDS) para cloruros presentes en la pasta de cemento a través del microscopio electrónico de barrido (SEM). Este último es un procedimiento novedoso en la cuantificación de cloruros en el concreto, por lo que se espera obtener resultados no comparables a las técnicas tradicionales. Esto representa una oportunidad de desarrollo para buscar una correlación entre los valores obtenidos. Además, con el avance tecnológico, el acero de refuerzo ha sufrido cambios en sus propiedades, principalmente en su recubrimiento superficial; por lo que resulta conveniente realizar estudios acerca del contenido crítico de cloruros en donde se involucre a la varilla de acero tradicional como referencia respecto a las varillas de nueva manufactura.

Algunos estudios relevantes para esta investigación, con respecto al contenido crítico de cloruros (CCC) y ataque por cloruros, se citan a continuación:

#### 2.1.1. Varilla de acero al carbono (AC).

La varilla de acero al carbono de manufactura normalizada debe cumplir la norma ASTM A 615. Este tipo de refuerzo ha sido ampliamente estudiado bajo la acción de ataque por cloruros, por diversos autores, bajo diferentes condiciones de experimentación:

- 1) [Hausmann, 1967] fue el primero en identificar el valor medio de la relación  $[Cl^-]/[OH^-] \approx 0.6$  en disoluciones que simulan la solución de poro del concreto contaminadas con cloruros, cuando se da un cambio electroquímico en el monitoreo del potencial de corrosión. Sin embargo, debido a la dificultad en la medición de  $(OH)^-$  en el concreto, el contenido de cloruros totales o libres por peso de cemento o concreto, son los parámetros que han sido más utilizados para indicar el riesgo de corrosión.
- 2) [Gouda et. al., 1970] realizaron estudios con varillas de acero al carbono, no decapadas y embebidas en concreto con base en cemento portland ordinario (CPO), encontrando una concentración crítica de cloruros totales por masa de cemento de 0.60%, utilizando polarización anódica.
- 3) [Hansson et. al., 1988] realizaron estudios con varillas de acero al carbono, embebidas en morteros, utilizando tres tipos de cemento portland ordinario (CPO)

contaminado externamente con cloruros, encontrando una concentración crítica de cloruros totales por masa de cemento, de 0.60% a 1.40%, bajo condiciones de 100% y 50% de humedad relativa; utilizando incrementos en la densidad de corriente y pruebas potencioestáticas.

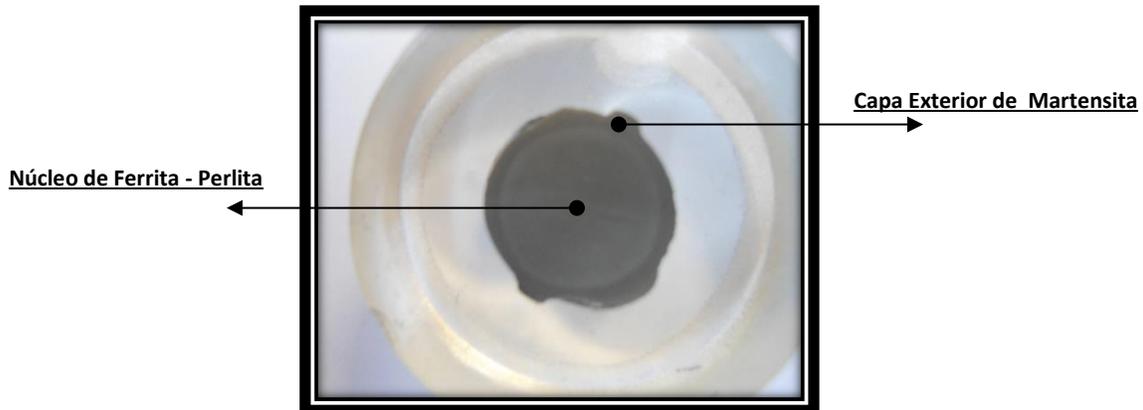
- 4) [Pettersson, 1992-1994] realizó estudios con varillas de acero al carbono, embebidas en morteros utilizando cementos de bajo y alto contenido de álcalis, encontrando una concentración crítica de cloruros totales por masa de cemento, de 0.60% a 1.80%, bajo condiciones de 100% y 80% de humedad relativa; utilizando la velocidad de corrosión.
- 5) [Hussain et. al., 1995] realizaron estudios con varillas de acero al carbono, embebidas en concreto utilizando cementos de bajo y alto contenido de  $C_3A$ , encontrando una concentración crítica de cloruros totales por masa de cemento, de 0.62%, para un contenido promedio de  $C_3A$ .
- 6) [Thomas et. al., 1990-1996] realizaron estudios con varillas de acero al carbono, embebidas en concreto, utilizando CPO con y sin ceniza volante, mediante especímenes prismáticos expuestos en ambiente marino; encontrando una concentración crítica de cloruros totales por masa de cemento, de 0.50% a 0.70%, utilizando la técnica de pérdida de masa e inspección visual.
- 7) [Schiessl et. al., 1996] realizaron estudios con varillas de acero al carbono, embebidas en concreto expuesto a cloruros y añadiéndolos durante el mezclado; encontrando una concentración crítica de cloruros totales por masa de cemento, de 0.50% a 1.00%, utilizando la técnica de corriente de macroceldas.
- 8) [Alonso et. al., 2000] realizaron estudios con varillas de acero al carbono, lisas y corrugadas, embebidas en morteros con base en cemento portland ordinario (CPO), añadiendo porcentajes definidos de cloruros durante el mezclado; encontrando una concentración crítica de cloruros totales por masa de cemento, de 1.24% a 3.08%, considerando corrosión activa al alcanzar un valor de densidad de corriente igual o superior a  $0.1 \mu A/cm^2$ .

- 9) [Pacheco et. al., 2013] realizó estudios sobre el análisis de cuantificación de cloruros totales en materiales cementantes, mediante la técnica de Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos-X, utilizando muestras estándar (comerciales y fabricadas en el laboratorio) para su calibración. Se cuantificaron cloruros en especímenes con concentraciones del 1% y 2% de cloruros por peso de cemento; obteniendo resultados del 0.8% y 1.6%, respectivamente, utilizando diferentes muestras minerales. Los resultados demuestran que la precisión de las referencias comerciales y fabricadas en el laboratorio utilizadas resultaron adecuadas para el análisis de materiales cementantes.

#### 2.1.2. Varilla de acero termotratado (ATT).

Las materias primas para producir acero al carbono bajo la normatividad ASTM A 615 se han vuelto cada vez más costosas, por lo que la mayor parte de la producción de este tipo de acero de refuerzo se fabrica a partir de material de desperdicio metálico ferroso (chatarra). Sin embargo, sus propiedades físico-mecánicas son apenas suficientes para los requerimientos que sus aplicaciones demandan y el hecho de utilizar materias primas de una composición estequiométrica conocida para mejorarlas puede resultar en un gran costo de producción, por lo que la implementación de tratamientos térmicos ha resultado la alternativa económica más viable para alcanzar los controles de calidad exigidos, a precios razonables.

Existen diferentes procesos de tratamiento térmico. El más común es el utilizado para la fabricación de varillas de alta resistencia, conocido como Tempcore®, que consta de 3 etapas [Simon et. al., 1984]. El primer paso consiste en llevar a cabo un temple sobre la superficie del acero a 900 °C; después se hace un autorevenido de la martensita formada durante el temple (siendo un factor determinante en la calidad de la martensita la temperatura del revenido) y, finalmente, se lleva a cabo la transformación isotérmica de la austenita remanente en el núcleo, para convertirla en perlita y ferrita, como se muestra en la Figura 13 [Aguilar et. al., 2001]. Este proceso genera un incremento considerable en la resistencia a la cedencia y resistencia máxima, lo que se debe al incremento de la dureza, como resultado del alto contenido de carbono en la martensita, manteniendo una adecuada ductilidad [Menezes et. al., 1991].



**Figura 13.** Acero termotratado: núcleo de perlita y ferrita con una capa exterior de martensita.

El procedimiento de termotratado no está normalizado, pero la varilla de acero fabricada debe cumplir los requerimientos de ASTM A 615. Este tipo de refuerzo ha sido recientemente estudiado bajo diferentes condiciones de experimentación:

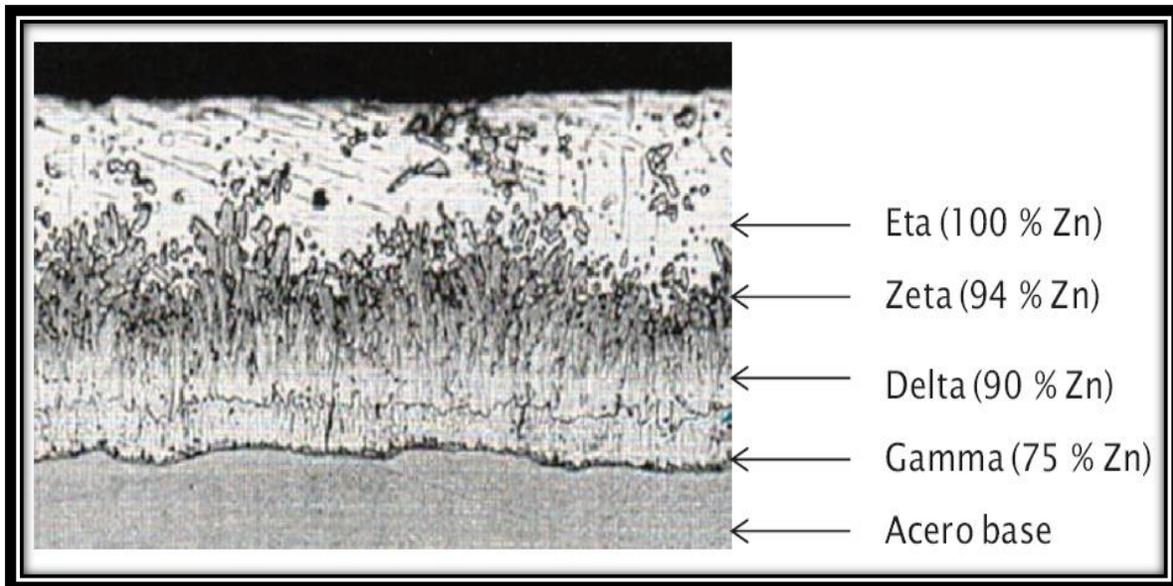
- 1) [Mehmood et. al., 2001] compararon el comportamiento a la corrosión por cloruros de aceros termotratados contra aceros al carbono embebidos en concreto. Se evaluó la pérdida de masa de los aceros expuestos al ambiente natural, siendo el acero termotratado el que presentó menor pérdida de masa; así mismo se observó que los aceros termotratados presentaron mayor tiempo de iniciación de la corrosión y menores tasas de corrosión.
- 2) [Arellano et. al., 2006] compararon acero termotratado (G40) y acero al carbono, sometidos a una condición de oxidación simulando la pre-exposición ambiental, para posteriormente realizar medidas del potencial de corrosión y velocidad de corrosión de estos aceros embebidos en concreto expuesto a ciclos de inmersión, en una solución de 35 g/L de NaCl y secado a 40°C, para acelerar el mecanismo de corrosión. Como resultado, el acero termotratado mostró una corrosión generalizada, en tanto que el acero al carbono mostró indicios de picaduras, lo que se traduce en una corrosión localizada, estimando el doble de tiempo de vida útil para las probetas fabricadas con acero termotratado.

- 3) [Hernández D., 2013] realizó estudios de durabilidad utilizando aceros de diferente manufactura (AC, ATT, AG, AD), inmersos en solución sintética de poro de concreto, observando potenciales de comportamiento electroquímico similares entre AC – ATT, pero con una mayor resistencia a la polarización por parte del acero termotratado en soluciones contaminadas al 0.1 y 0.3% de iones cloruro. Atribuyó esta diferencia de comportamiento electroquímico a la capa de martensita que rodea el núcleo y la que pudo impedir la formación de zonas anódicas y celdas galvánicas en forma de picaduras.

### 2.1.3. Varilla de acero galvanizado (AG).

En algunas ocasiones el acero al carbono producido bajo la normatividad ASTM A 615 es revestido con una capa de zinc, dando lugar a lo que se conoce como acero galvanizado. Dicho proceso industrial se fundamenta en los principios de protección catódica. Las varillas de acero galvanizado se producen por inmersión en caliente, sumergiéndose en un baño de zinc fundido a 450 °C, para producir un recubrimiento metálico compuesto de varias capas de aleaciones hierro-zinc, que tienen una adhesión metalúrgica al acero del sustrato. El espesor total del recubrimiento debería ser al menos de 100  $\mu\text{m}$  y no debería exceder las 150  $\mu\text{m}$ , siendo necesario asegurar un grosor mínimo de unos 50  $\mu\text{m}$  de la capa de zinc puro, en presencia de cloruros [Garcés et. al., 2004].

Por lo general, las cuatro subcapas que se forman como producto de este proceso son: gamma, delta, zeta y una capa exterior eta de zinc puro en la superficie. El número de capas y su espesor estarán en función de diversos factores, tales como: la composición química del acero al carbono del sustrato base, la textura superficial, así como el periodo de tiempo que la varilla permanece sumergida en el baño de zinc y la velocidad en que se retira del mismo. Las capas se pueden observar en la Figura 14, mientras que sus características se enlistan en la Tabla 4, a medida que las capas se aproximan al acero es mayor su contenido de hierro en la aleación. La duración de la protección contra la corrosión normalmente es dependiente del grosor del recubrimiento de zinc y no de la estructura cristalina de las capas de la aleación [Yeomans, 2004].

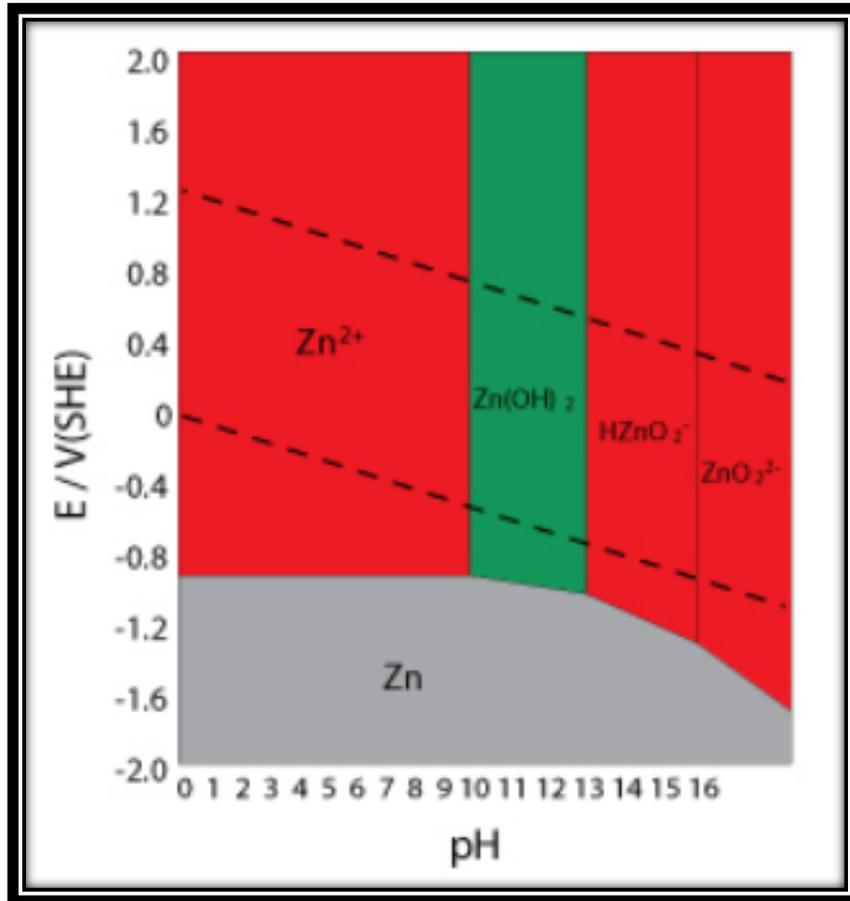


**Figura 14.** Perfil estratigráfico de las capas de la aleación metalúrgica acero-zinc [Yeomans, 2004].

**Tabla 4.** Descripción de las capas de la aleación metalúrgica acero-zinc.

Capa	Aleación	Composición (% Fe)	Punto de Fusión	Características
Eta	Zinc	0.03	419	Blando, dúctil
Zeta	$\text{FeZn}_{13}$	5.7 - 6.3	530	Duro, frágil
Delta	$\text{FeZn}_7$	7.0 – 11.0	530 - 670	Dúctil
Gamma	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	20.0 – 27.0	670 - 780	Duro, frágil
Base	Acero al carbono	98.0 – 99.0	1530	Dúctil

El zinc actúa como un ánodo de sacrificio en un sistema de protección catódica, además de actuar como barrera física, y se corroe a una velocidad que depende de su entorno, sobre todo del pH que lo rodea. Aunque el zinc puede crear una capa pasiva en el intervalo de un pH entre 10 y 13, si el pH es aún más básico que 13, el zinc tenderá a desarrollar cristales más grandes que no forman una capa pasiva cohesiva, permitiendo la corrosión fácilmente, como lo demuestra el diagrama de Pourbaix de la Figura 15.

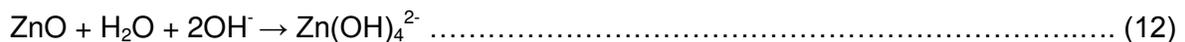


**Figura 15.** Diagrama pH-Potencial simplificado del zinc, en contacto con el agua, mostrando regiones termodinámicamente estables. (Gris: Estado metálico, Verde: Estado pasivo, Rojo: Estado activo) [Pourbaix, 1987].

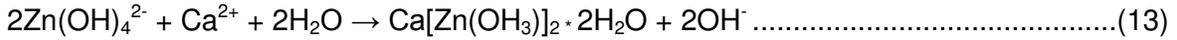
Cuando el acero galvanizado entra en contacto con el ambiente alcalino del concreto fresco, típicamente menos que 10  $\mu\text{m}$  del extremo inmediato de la capa eta se corroe, posteriormente este proceso se detiene debido al producto de óxido de zinc que se forma, según la Ecuación 11:



Convirtiéndose posteriormente en hidróxido de zinc, como se muestra en la Ecuación 12:



Tanto el óxido de zinc como el hidróxido de zinc son productos de corrosión en polvo blanco y no brindan protección alguna. Sin embargo, en un ambiente alcalino fuerte donde el calcio está presente, tal como la solución de poro del concreto, el hidróxido de zinc se oxida aún más, formando hidroxizincato de calcio, como se muestra en la Ecuación 13:



Este producto forma una capa de óxido pasivo sobre la superficie del zinc, Ecuación 14:



Por lo anterior, el acero galvanizado ofrece un incremento en el tiempo de iniciación de la corrosión. Este tipo de protección se fundamenta en que el zinc forma productos de corrosión insolubles, compactos y adherentes que constituyen una barrera aislante natural, que posee una alta resistencia a la corrosión. Los óxidos de zinc que se forman entonces tienden a ser menos voluminosos que los óxidos de hierro y por lo tanto, generan menos esfuerzos internos que agrietarían al concreto. De esta manera se espera que las primeras etapas de corrosión activa en el zinc sean menos perjudiciales para las estructuras de concreto reforzado [Accardi et. al., 2004].

La resistencia al ataque de los cloruros se debe al valor más electronegativo del potencial de corrosión del recubrimiento de zinc. Incluso si las picaduras han iniciado, la velocidad de corrosión será inferior, ya que el recubrimiento que rodea la picadura es un cátodo pobre, que reduce la efectividad del mecanismo autocatalítico que tiene lugar en el acero al carbono. Sin embargo, mientras que el recubrimiento de zinc permanezca pasivo, éste no es capaz de ofrecer protección activa al acero y, por tanto, no puede reducir la velocidad de corrosión en las áreas de acero que no están protegidas [Yeomans, 2004]. En general, se asume un contenido crítico de cloruros en el intervalo de 1.0 - 1.5 %, por el peso del cemento para el acero galvanizado, que es alto, comparado con el valor normalmente considerado para el acero al carbono, que es de 0.4 - 1.0 % [Garcés et. al., 2004].

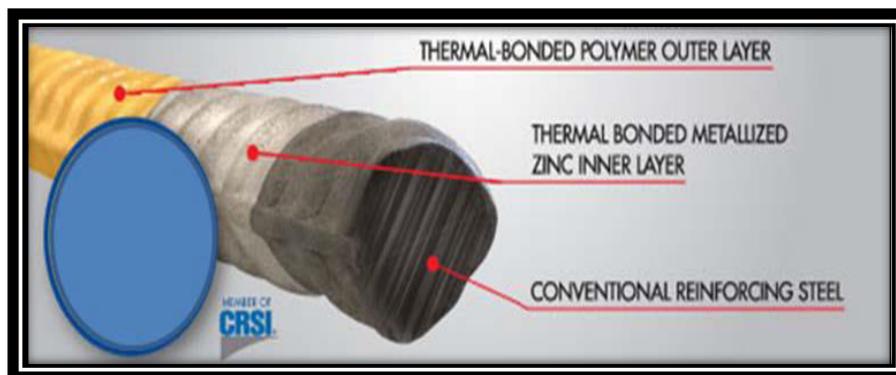
Algunos estudios relevantes para esta investigación, en los que se hace mención de los intervalos ( $E_{corr}$ ,  $i_{corr}$ ) recomendados para considerar activo o pasivo el recubrimiento de zinc se citan a continuación:

- 1) [Yadav et. al., 2007] realizaron estudios de polarización en aleaciones Fe-Zn que componen las capas intermetálicas entre el recubrimiento de zinc y un acero base, observando su resistencia a la corrosión en medios ricos en cloruros. Encontraron que la corrosión del zinc es factible para valores menores que -1000 mV, la corrosión de las capas intermetálicas Fe-Zn para valores de -900 a -500 mV y, finalmente, para valores de -500 a -300 mV, la corrosión del acero al carbono utilizando un electrodo SCE.
- 2) [Maldonado, 2009] realizó estudios de durabilidad con varillas de acero al carbono (AC) y acero galvanizado (AG) embebidas en concretos con relaciones a/c de 0.4, 0.5 y 0.6, expuesto a un ambiente marino natural en la costa de la península de Yucatán, México. Descubrió que el acero galvanizado puede resistir un contenido crítico de cloruros de 2.6 a 3 veces mayor que el del acero al carbono, inclusive en concretos de baja calidad, considerando que la corrosión comienza cuando se alcanza una densidad de corriente de  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (utilizando constantes teóricas). Reportó, además, valores de potenciales para el acero galvanizado entre -100 a -300 mV en concreto húmedo y de -300 a -500 mV en concreto mojado para el estado pasivo del acero galvanizado, utilizando un electrodo SCE.
- 3) [Hernández, 2013] realizó estudios de durabilidad utilizando aceros de diferente manufactura (AC, ATT, AG, AD), inmersos en solución sintética de poro de concreto, observando potenciales de -1400 a -1450 mV para el acero galvanizado cuando éste se encuentra en soluciones con un valor de  $\text{pH} \approx 13.5$ , mientras que su potencial aumentó a -1000 mV en condiciones de  $\text{pH} \approx 9.0$  y cercanos a la neutralidad. Por lo que es importante hacer distinción entre una activación debida a la reacción del zinc en un medio básico y la activación del zinc por ataque de cloruros.

#### 2.1.4. Varilla con recubrimiento dual metal-polímero (AD).

El acero revestido con resina epóxica proporciona una barrera física contra los cloruros en la interfase concreto-armadura; sin embargo, la presencia de cualquier defecto sobre la superficie deja expuesto al acero desnudo, siendo susceptible a problemas de corrosión [Menezes et. al., 1991]. Por ello, para fines de aceptación de este recubrimiento ASTM A 775 recomienda que al menos el 90% de las mediciones del espesor del recubrimiento después del curado deberán ser entre 175 a 300  $\mu\text{m}$ , no presentar agrietamiento en las pruebas de flexión, que el número de defectos por pequeñas perforaciones no deba exceder de 6 por metro lineal y el área dañada sobre la barra no deberá ser mayor que el 2%.

Sin embargo, la durabilidad de las varillas de acero de refuerzo protegidas mediante este método ha quedado comprometida, debido a la existencia de diversos factores que pueden afectar la adherencia del recubrimiento, tales como: la variabilidad en la formulación del epóxico, las deficiencias en el proceso de aplicación del epóxico, la humedad, la temperatura y los daños sobre el recubrimiento. Por eso se ha creado un material compuesto con un doble sistema de protección, como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16.** Varilla con recubrimiento dual metal-polimérico (AD) [Concrete Reinforcing Steel Institute, CRSI].

La primera capa expuesta al medio electrolítico actúa como una barrera física o aislante, que en caso de dañarse promoverá una protección anódica, por el zinc que protegerá al

acero de refuerzo. Debido a su reciente incorporación al mercado, aún se están realizando investigaciones con la finalidad de conocer las ventajas y las desventajas frente al fenómeno de la corrosión. En la norma ASTM A 1055 se describen las diferentes pruebas, tanto mecánicas como electroquímicas, que se utilizan para la evaluación de la calidad.

El proceso de manufactura está regido por la misma normatividad y consiste en un núcleo de acero al carbono, seguido de una capa de aleación de zinc (mayor que 35  $\mu\text{m}$ ) aplicada por el método de pulverización térmica o metalización [ASTM B 833], incluyendo sobre el recubrimiento de zinc una capa de epóxico aplicada por el método de pulverización electrostática. El espesor total del recubrimiento (zinc + epóxico) deberá ser entre 175 y 400  $\mu\text{m}$ . La varilla de recubrimiento dual metal-polímero es un tipo de refuerzo de relativamente reciente fabricación, por lo que ha sido estudiada de manera limitada en ambientes de cloruros:

- 1) [Clemeña et. al., 2003] evaluaron la resistencia a la corrosión inducida por cloruros en barras de acero de diferente manufactura, empleando barras de acero al carbón recubiertas con acero inoxidable - CLAD, barras con base en aceros microcompuestos denominados MMFX2, barras dúplex de acero inoxidable llamado 2101 LDX y barras de acero al carbón cubiertas con una adherencia térmica metálica de zinc y una adherencia térmica polimérica (RMP).

Estas barras fueron embebidas en especímenes de concreto, sometidas a ciclos de inmersión-secado en una solución rica en NaCl. Para comparar los resultados, se emplearon 2 tipos de barras de acero inoxidable: 304 y 316 LN, así como una barra de acero al carbón convencional - ASTM A 615. Los resultados indican que, de acuerdo a la resistencia con la corrosión inducida por cloruros, el orden de menor a mayor fue: ASTM A615 < 2101 LDX < MMFX2 < RMP ? CLAD ? 304 ? 316LN (el signo de interrogación indica que al momento de reportar los resultados no había una clara diferencia, debido a que estos aceros aún no indicaban un estado activo por corrosión). Puede observarse, entonces, que el sistema que mejor comportamiento tuvo (sin considerar los aceros inoxidables) fue el acero fabricado con el proceso dual de recubrimiento.

- 2) [Hernández, 2013] realizó estudios de durabilidad utilizando aceros de diferente manufactura (AC, ATT, AG, AD), inmersos en solución sintética de poro de concreto, observando que para especímenes AD intencionalmente dañados en el recubrimiento polimérico se formó una pequeña escama de herrumbre en la periferia de la incisión para soluciones que contenían 0.3% de NaCl, lo que se atribuye a un proceso de corrosión bajo la película de epóxico, que resulta en un desprendimiento del recubrimiento.

#### 2.1.5 Aportación.

Para fines propios de este trabajo de investigación, se busca determinar la concentración crítica de cloruros (CCC), utilizando la varilla de acero al carbono (ASTM A 615), directamente como refuerzo en el concreto durante el periodo experimental. Para esto se fabricaron especímenes que se sometieron a ciclos de inmersión-secado, en una solución de NaCl (35 g/L) y un horno con ventilación forzada a 40 °C, respectivamente.

La finalidad fue inducir el progreso de los Cl<sup>-</sup> a través de la matriz cementante para iniciar el proceso de corrosión en el refuerzo. La evolución electroquímica de la armadura fue monitoreada a través de las técnicas OPC, LRP y EIS (sección 1.12), utilizando un electrodo de calomel saturado (SCE). Finalmente, el contenido de cloruros se determinó por titulación potenciométrica (ASTM C 1152) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS – SEM).

Las lecturas electroquímicas obtenidas, así como el CCC correspondiente a la varilla de acero al carbono ASTM A 615, no sólo tienen como objetivo validar la información ya ampliamente reportada en otras publicaciones, sino que funcionarán como los parámetros de comparación inicial para otras varillas de diferente manufactura, como las de acero termotratado (ATT), acero galvanizado (AG) y acero dual (AD).

## 2.2. Justificación de estudio.

La durabilidad del concreto reforzado ha cobrado un gran interés entre los investigadores y especialistas de la industria de la construcción, ya que este tipo de estructuras constituyen la base fundamental de las obras de infraestructura [Shi et. al., 2012]: vivienda, transporte, comunicaciones y servicios. Su causa principal de deterioro es la corrosión electroquímica del acero de refuerzo, que acorta considerablemente el periodo de vida útil del diseño original, de no tomar las precauciones necesarias; lo que genera costos directos e indirectos por la reparación o sustitución de los elementos estructurales, o bien, por el cierre temporal o permanente de la estructura.

El problema principal reside en que el concreto es por naturaleza un material poroso, que permite mecanismos de transporte al interior de la matriz cementante desde el ambiente exterior que lo rodea, hasta el acero de refuerzo. Por eso la durabilidad de este tipo de estructuras expuestas en ambientes con altas concentraciones de agentes agresivos, como los cloruros, presentan una tasa de deterioro muy elevada, debido a la despasivación del acero de refuerzo a causa de un ataque localizado de estos aniones. Diversos autores han planteado en la bibliografía distintas soluciones a estos problemas:

1. Prevención: este enfoque se basa en la modificación de las propiedades y características químicas, microestructurales y superficiales del concreto y el acero de refuerzo. [Belaïd et. al., 2001].
2. Mantenimiento: este enfoque se basa en la aplicación de programas periódicos de técnicas electroquímicas, tales como la protección catódica y la extracción de cloruros [Garcés et. al., 2004].

Por esta razón, hoy en día existen varillas de refuerzo de diferente manufactura, tales como la varilla de acero termotratado - ATT y la varilla de acero con recubrimiento dual metal polimérico - AD, de las que no se tienen intervalos de valores específicos para el contenido crítico de cloruros que causan su despasivación. Debido a ello, se considera de suma importancia caracterizar el comportamiento de dichas varillas, que actúan como refuerzo embebidas en concretos expuestos en ambientes con altas concentraciones de cloruros.

De esta manera se pretende aportar argumentos técnico-científicos que permitan validar, revalorar, o en su caso establecer los valores obtenidos para el contenido crítico de cloruros de la varilla de acero al carbono - AC, así como de las modificadas ATT, AG, AD; contribuyendo a los conocimientos de la evaluación y diagnóstico de la corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto.

### **2.3. Hipótesis.**

El contenido crítico de cloruros necesario para lograr la despasivación de la varilla de acero al carbono - AC o modificadas (ATT, AG, AD) en el concreto reforzado, será función de su recubrimiento superficial. Por lo que la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado en ambientes ricos en cloruros dependerá entonces, en gran medida, de lo compacto y estable que sea dicho recubrimiento, ante las acciones del medio que rodea a la varilla.

### **2.4. Objetivos.**

#### 2.4.1. Objetivo general.

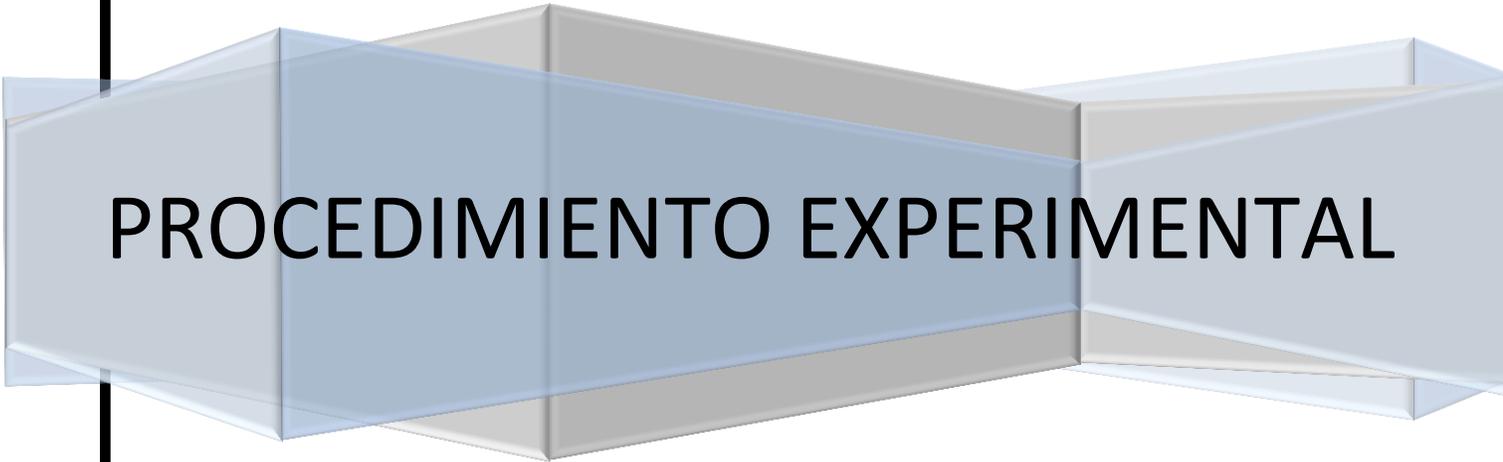
Determinar el contenido crítico de cloruros para la varilla de acero al carbono (AC) y las varillas modificadas (ATT, AG, AD) embebidas en concretos expuestos en ambientes ricos en cloruros, aportando argumentos técnico-científicos para validar, revalorar, o en su caso, establecer los valores obtenidos en la bibliografía científica.

#### 2.4.2. Objetivos particulares.

1. Caracterización metalográfica de la sección transversal de las varillas de acero de diferente manufactura; incluyendo micrografías, medida del espesor de la capa del recubrimiento superficial y resistencia al esfuerzo de tensión, mediante la normatividad correspondiente.

2. Caracterización físico-química de los materiales utilizados para la elaboración de las mezclas de concreto, incluyendo el cemento, los agregados y los aditivos; según la normatividad correspondiente; además del diseño de mezclas de concreto, según las recomendaciones de la Portland Cement Association (PCA).
3. Monitoreo, diagnóstico y evaluación de las probetas bajo exposición, mediante diferentes pruebas electroquímicas; como el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), resistencia a la polarización lineal (LRP) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), hasta detectar la despasivación, según la normatividad y/o recomendaciones correspondientes.
4. Determinación del perfil y del contenido crítico de cloruros para las varillas de diferente manufactura, mediante el método de titulación potenciométrica automática, según la normatividad ASTM correspondiente.
5. Determinación del perfil y del contenido crítico de cloruros mediante un análisis semicuantitativo en el microscopio electrónico de barrido (SEM), utilizando la técnica de espectroscopia de energía dispersiva de rayos-X (EDS), atendiendo las recomendaciones pertinentes.
6. Establecer correlaciones entre los valores para el contenido crítico de cloruros obtenidos a partir de las técnicas de titulación potenciométrica (ASTM) y la espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (EDS).

# **CAPÍTULO 3**



**PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

## CAPÍTULO 3

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Descripción y caracterización de los materiales para concreto.

##### 3.1.1. Cemento.

Se utilizó un cemento portland ordinario – CPO40, que cumple la normatividad NMX C 414 y ASTM C 150; que se caracterizó por análisis químico, pérdida por ignición, distribución de tamaños de partícula y análisis de difracción de rayos X.

- Análisis químico.

La composición química se determinó analizando el cemento como una pastilla prensada (mezclando la muestra con celulosa micronizada), mediante un espectrómetro de energía de fluorescencia de rayos X modelo Epsilon-3XL Panalytical-México, utilizando la técnica de energía dispersiva de mesa.

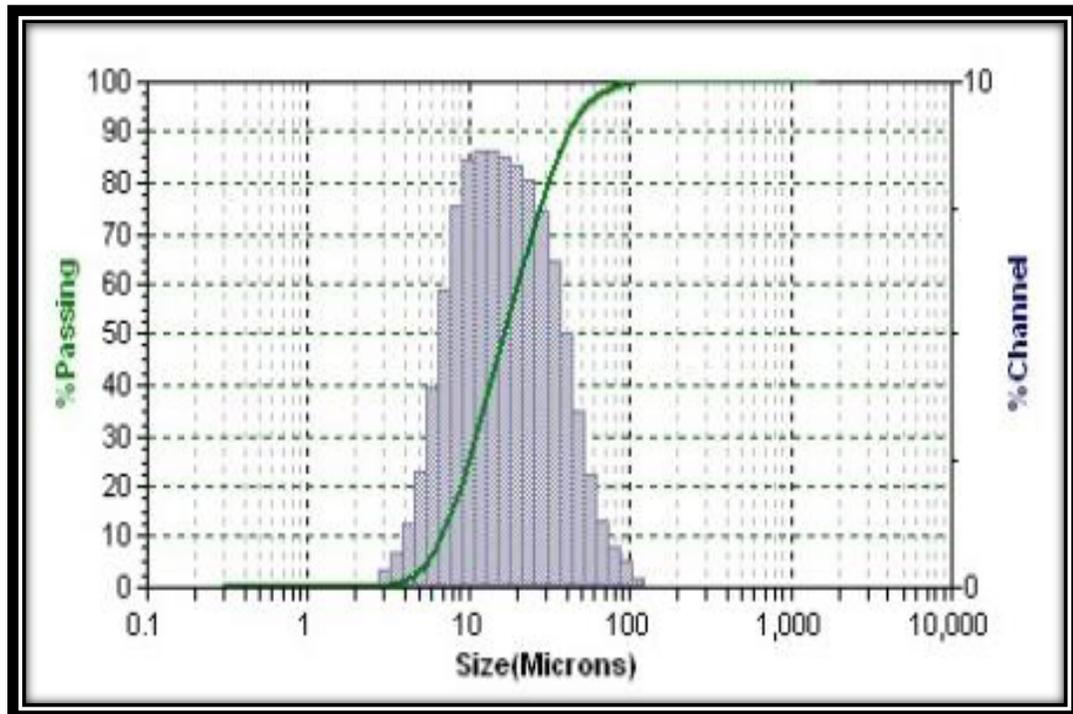
Las pruebas se llevaron a cabo en una atmósfera de helio, la que se requiere para el análisis de elementos de bajo número atómico, interpretando los resultados con el software Standardless Omnian®. La composición química expresada en porcentaje de óxidos se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Composición química expresada en porcentaje de óxidos.

<b>Composición Química (%)</b>	
CaO	66.4
SiO <sub>2</sub>	16.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5
SO <sub>3</sub>	5.5
Óxidos	4.9
Complementarios	
Pérdida por Ignición (LOI)	4.12

○ Análisis de distribución de tamaños de partícula.

Se analizó la distribución de tamaños de partículas de una muestra de cemento por medio de la técnica de difracción de rayo láser, empleando un analizador de partículas Tri-laser MICROTAC modelo S3500. La prueba se realizó por vía húmeda, depositando aproximadamente 1 g. de cemento en el interior del analizador, donde se mezcló con alcohol isopropílico. Este equipo mide ángulos de dispersión de 0° a 172° y los resultados se analizan por medio del software Microtac Flex®. La distribución de partículas obtenida se puede observar en la Figura 17. Los resultados arrojaron un tamaño promedio de partícula de 21.5  $\mu\text{m}$ , con una desviación estándar de 13.5  $\mu\text{m}$ , que cumple normativamente.



**Figura 17.** Distribución de tamaños de partícula por vía húmeda.

○ Análisis de difracción de rayos X (DRX).

Se analizaron las fases minerales por medio de DRX, utilizando un difractómetro marca Bruker-AXS-D8-Advance con radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda_{\text{RX}} = 1.5418 \text{ \AA}$ ). Los

análisis se realizaron a intervalos  $2\theta$  de  $10^\circ$  a  $70^\circ$ , con un paso de 0.5 segundos en incrementos de  $0.05^\circ$ . Se obtuvo el difractograma de la Figura 18, por medio del cual se identificaron cualitativamente sus principales fases minerales, mediante el software EVA®.

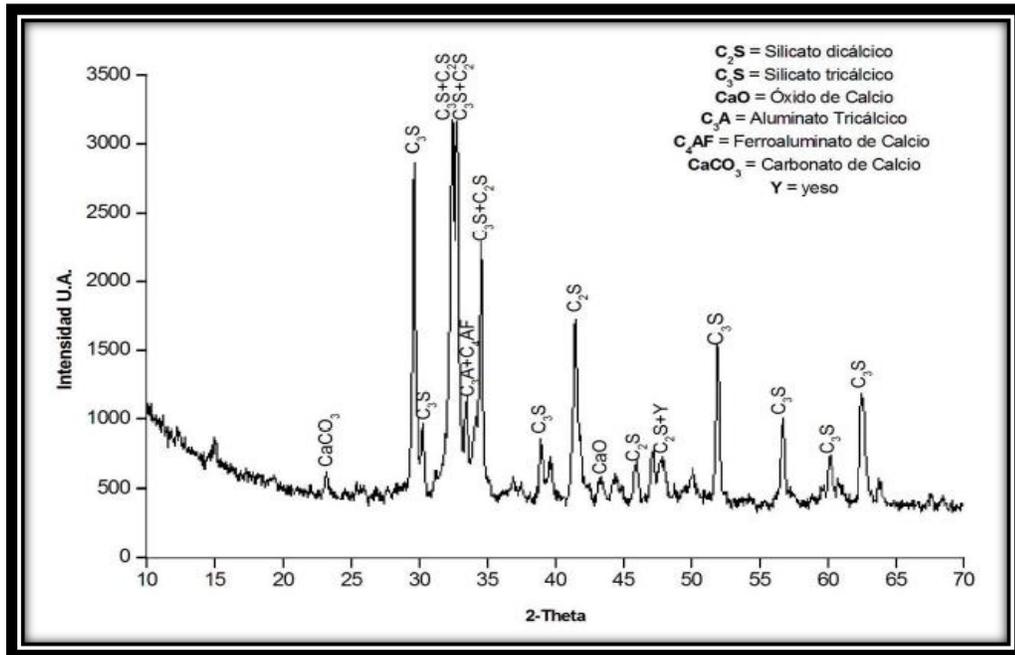


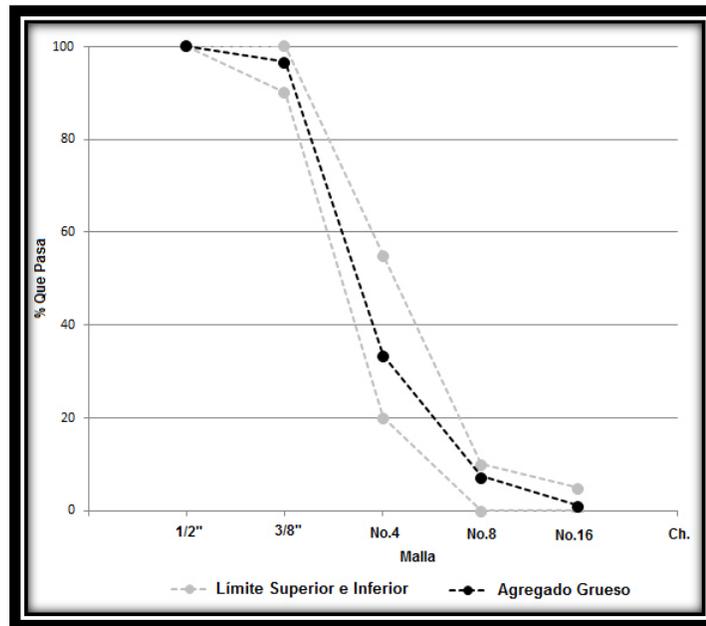
Figura 18. Difractograma cualitativo de fases.

### 3.1.2. Agregados.

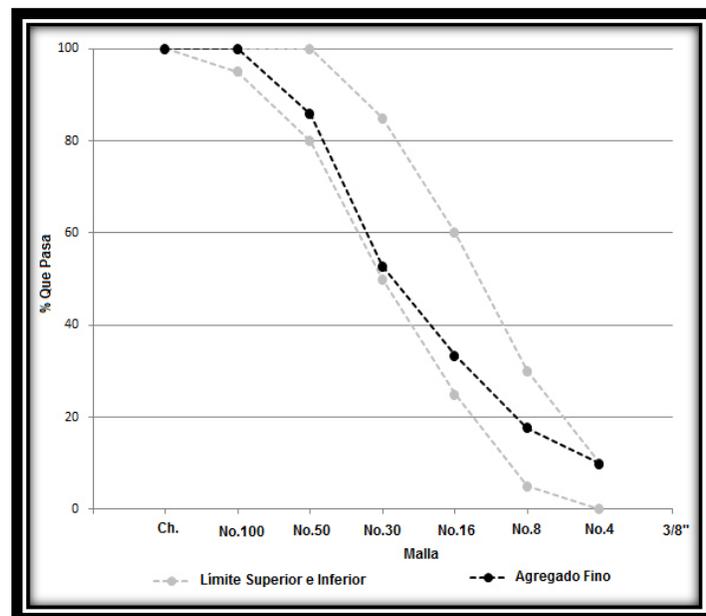
Como se hace mención en la sección 3.2.1, el recubrimiento empleado para la elaboración de los especímenes de concreto fue de 40 mm, por lo cual se optó por utilizar agregados calizos regionales, con un Tamaño Máximo de 10 mm (3/8”), según las recomendaciones de la Portland Cement Association (PCA).

- Análisis granulométrico.

Se obtuvo una muestra representativa de cada lote de agregados, tanto grueso como fino, según la ASTM D 75, que posteriormente fueron reducidos de manera sistemática según las recomendaciones de ASTM C 702 y, por último, se verificó la granulometría de cada uno de los agregados por ASTM C 33. Las curvas granulométricas obtenidas, se muestran en la Figura 19.



a)



b)

**Figura 19.** Curvas granulométricas para a) agregado grueso y b) agregado fino.

- Finalmente, se caracterizaron los agregados, obteniendo su masa específica y su porcentaje de absorción, según ASTM C 127 y ASTM C 128. Mientras que su peso volumétrico suelto seco (PVSS) y peso volumétrico varillado seco (PVVS) se obtuvieron por ASTM C 29. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

### 3.2. Diseño de las mezclas de concreto.

#### 3.2.1. Parámetros de diseño.

- Relación agua/cemento (a/c) y resistencia (f'c): se optó por utilizar una relación  $a/c=0.65$ , con su  $f'c$  resultante para facilitar la entrada a agentes agresivos y una relación  $a/c=0.45$  con su  $f'c$  resultante, para correlacionar los comportamientos obtenidos. El contenido de aire para las mezclas de concreto será el resultante para cada diseño de mezclas, por lo cual se considera como aire atrapado.
- Revenimiento: para la fabricación de los especímenes se utilizó un concreto con alta trabajabilidad, para efectuar el colado de una manera homogénea y eficiente, por lo cual se buscó un revenimiento promedio de  $20 \pm 2$  cm, en ambos diseños de mezcla.
- Contenido de cemento, agua, agregado grueso y agregado fino: con la finalidad de eliminar distintas variables, se utilizó un contenido de cemento de  $356 \text{ kg/m}^3$  de concreto producido para ambas relaciones ( $a/c=0.45$  y  $a/c=0.65$ ). Se utilizó una composición de agregados de 70% agregado grueso y 30% agregado fino en ambos diseños de mezcla. Finalmente, el contenido de agua se obtuvo siguiendo las recomendaciones del diseño de mezclas de la Portland Cement Association en su Capítulo 9 [PCA, 2006].
- Aditivo: para lograr la trabajabilidad requerida en el diseño de mezclas, se empleó un aditivo "BASF - Glenium® - 3400 – NV", que cumple la normatividad ASTM-C-494 para los aditivos reductores de agua tipo A y los reductores de agua de alto rango tipo F. Este aditivo superfluidificante con base en policarboxilatos tiene un contenido de sólidos del 22.0% en masa y únicamente

se utilizó en las mezclas con una relación  $a/c = 0.45$ , dosificando en promedio 8 mL/kg de cemento, partiendo de un revenimiento 0 cm para llegar a un revenimiento aproximado de  $20 \pm 2$  cm. El aditivo Glenium® - 3400 – NV es compatible con aditivos reductores de bajo, medio y alto rango, aditivos inclusores de aire, aditivos controladores del tiempo de fraguado, aditivos inhibidores de la corrosión, aditivos reductores de la contracción y complementos cementantes. No contiene cloruros y no es corrosivo.

### 3.2.2. Mezclas de concreto.

- Se determinaron las propiedades físicas de los componentes de las mezclas:

**Tabla 6.** Resumen de las propiedades para los componentes de las mezclas de concreto.

Material (Unidades)	Absorción (%)	Humedad de Obra (%)	Ds (Kg/m <sup>3</sup> )	PVSS (kg/m <sup>3</sup> )	PVVS (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Sólidos (%)
Agua	-	-	1000	-	-	-
Cemento	-	-	3060	1250	-	-
A.G.	0.5	0.2	2680	1494	1531	-
A.F.	1.2	0.4	2640	1819	-	-
Aditivo	-	-	1120	-	-	22

- Y posteriormente se determinaron las proporciones del diseño de las mezclas:

**Tabla 7.** Proporciones para la mezcla de concreto  $a/c = 0.45$

$a/c = 0.45$	
Agua reacción (kg/m <sup>3</sup> )	160
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	356
Aditivo (mL/kg)	8.0
% A.G.	30
% A.F.	70

**Tabla 8.** Proporciones para la mezcla de concreto  $a/c = 0.65$

$a/c = 0.65$	
Agua reacción ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	231
Cemento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	356
% A.G.	30
% A.F.	70

### 3.3. Caracterización de las mezclas de concreto.

#### 3.3.1. Determinación de las propiedades en estado fresco.

- Revenimiento.

Los ensayos de revenimiento se llevaron a cabo, según la normatividad ASTM C 143, en la cual el “Cono de Abrams” previamente humedecido se coloca sobre una superficie plana, rígida y no absorbente, llenándolo en 3 capas de volúmenes aproximadamente iguales, aplicando 25 golpes por capa con una varilla de punta hemisférica de 24 pulgadas de longitud y 5/8 de pulgada de diámetro. Después de los golpes, se enrasa la última capa y se levanta el cono lentamente aproximadamente 12 pulgadas en  $5 \pm 2$  segundos, para finalmente comparar la altura del cono original contra la altura del centro original desplazado del concreto, la diferencia es una medida lineal que hace referencia a la trabajabilidad.

- Temperatura.

Los ensayos de medida de la temperatura se llevaron a cabo según la normatividad ASTM C 1064, utilizando un termómetro con una precisión de  $\pm 0.05$  °C, debiendo permanecer en una muestra representativa de concreto durante 2 minutos, donde un mínimo de 75 mm de concreto debe rodear la porción sensitiva del termómetro.

- Masa unitaria.

Los ensayos de masa unitaria se llevaron a cabo según la normatividad ASTM C 138. El procedimiento consiste en llenar un recipiente prismático circular, con peso y volumen conocidos, en 3 capas de concreto de aproximadamente igual volumen, para finalmente enrasar con una placa plana y obtener el nuevo peso del recipiente. Con el peso inicial y el peso final del recipiente, y con base en su volumen constante, se determina el peso volumétrico del concreto ( $\text{kg/m}^3$ ).

- Contenido de aire.

Los ensayos de contenido de aire se llevaron a cabo por el “Método de Presión”, según la normatividad ASTM C 231, cuyo principio se basa en la ley de Boyle, relacionando la presión y el volumen. La presión aplicada comprime el aire dentro de la muestra de concreto, incluyendo el aire en los poros de los agregados, por lo que se debe aplicar un factor de corrección, dependiendo del tipo de agregado utilizado. Este método no es recomendable para mezclas de concreto con agregados ligeros o porosos.

### 3.3.2 Determinación de las propiedades físico-mecánicas.

Para los ensayos de calidad en el concreto endurecido se elaboraron 24 especímenes cilíndricos de 10 cm de base por 20 cm de altura para cada diseño de mezcla, los que permanecieron durante 24 horas en reposo previo a su desmolde, para en seguida someterse a un proceso estándar de curado durante 28 días.

Los especímenes para el diseño de mezcla con una relación  $a/c = 0.65$  se elaboraron y curaron de forma estándar, de acuerdo con el procedimiento descrito por ASTM C 31. Mientras que los especímenes para el diseño de mezcla con una relación  $a/c = 0.45$ , al poseer una consistencia muy firme, se compactaron mediante un vibrador durante un lapso de 5 segundos, para asegurar la adecuada colocación del concreto dentro de los moldes; reproduciendo, a su vez, las condiciones de fabricación de los especímenes prismáticos utilizados para las pruebas de durabilidad.

- Resistencia a la compresión.

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión de acuerdo con la normatividad ASTM C 39; determinando la carga máxima como el promedio de un total de 3 especímenes ensayados después de 3, 7, 14, 21 y 28 días de curado, utilizando una máquina de pruebas marca ELE, modelo AUTO TEST 2000, con un intervalo de carga de hasta 20 toneladas.

- Módulo de elasticidad.

Se realizaron ensayos de módulo de elasticidad (E), de acuerdo con la normatividad ASTM C 469; determinando el módulo de elasticidad como el promedio de un total de 3 especímenes ensayados después de un periodo de curado de 28 días, mediante una máquina universal de pruebas marca Tinius Olsen, con un intervalo de carga de hasta 20 toneladas.

El módulo de elasticidad para cada espécimen fue obtenido calculando la pendiente esfuerzo-deformación dentro del intervalo elástico. La pendiente para concreto se calcula entre los puntos donde la ordenada corresponde a la deformación de  $50 \mu\text{m}$  y el punto donde el valor de la abscisa corresponde al 40% de la resistencia a la compresión última del espécimen. Las deformaciones de los ensayos se obtuvieron mediante un dispositivo de anillos con el micrómetro horizontal y vertical, que se muestra en la Figura 20.



**Figura 20.-** Compresómetro ASTM C 469.

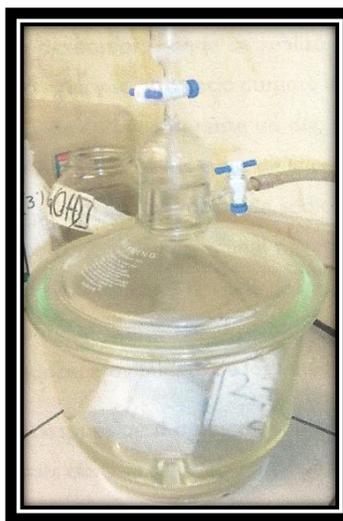
- Porosidad accesible al agua.

La porosidad accesible al agua (Pa) se define como la relación entre el volumen de poros comunicados al exterior y el volumen total de la probeta, expresándolo

en porcentaje respecto al volumen total de la misma, bajo la normatividad UNE-61-033-75. La prueba consiste básicamente en introducir un fluido (agua destilada) de densidad conocida dentro de los poros de una probeta de concreto, para cuantificar su volumen.

Se obtuvieron 2 probetas de 10 cm de base por 5 cm de altura, de un espécimen cilíndrico de concreto de 10 cm de base por 20 cm de altura (haciéndolo por triplicado para cada diseño de mezcla). Las probetas obtenidas se lavaron con agua destilada, removiendo el polvo producto del corte, para posteriormente someterlas a un secado en horno con una temperatura controlada ( $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), hasta obtener un peso constante (peso seco). Las probetas se colocaron en un desecador, tal como se muestra en la Figura 21, para aplicarles vacío durante un periodo de 3 horas, al término de las cuales se les adicionó agua hasta quedar totalmente sumergidas, aplicando vacío durante 1 hora más, para finalmente ser retiradas. Una vez fuera del desecador, se secaron superficialmente con un trozo de franela húmeda, para obtener el peso saturado. Finalmente, la muestra se sumergió en un contenedor con agua destilada, estando suspendida mediante una báscula, para obtener el peso sumergido. El porcentaje de porosidad se determinó como como lo indica la Ecuación 15.

$$Pa = [(Peso\ saturado - Peso\ seco) / (Peso\ saturado - Peso\ sumergido)] * 100 \dots \dots \dots (15)$$



**Figura 21.-** Desecador – UNE 61 033 75.

- Resistencia a la penetración de cloruros.

El principal mecanismo de transporte de cloruros a través de la matriz cementante del concreto sin agrietamientos es por difusión. Sin embargo, la velocidad de penetración de los cloruros debido a la difusión es lenta [Stanish et. al. 2004], por lo que el proceso se acelera mediante la aplicación de un campo eléctrico [Dhir et. al. 2004]. Esta prueba se realizó de acuerdo con la normatividad ASTM C 1202, utilizando un equipo PROVEE it – German Instruments Inc.

El procedimiento consiste en obtener 2 probetas de 10 cm de base por 5 cm de altura, de un espécimen cilíndrico de concreto de 10 cm de base por 20 cm de altura (haciéndolo por triplicado para cada diseño de mezcla). Las probetas obtenidas se lavaron con agua destilada, removiendo el polvo producto del corte. Una vez completamente secas, se procedió a aplicar una capa de pintura impermeable, para evitar que la solución del ensayo se fugara a través del área de la sección perimetral. Solidificado el recubrimiento, las probetas se colocaron en un desecador para aplicarles vacío durante 3 horas; al término de las cuales se les adicionó agua, hasta quedar totalmente sumergidas, aplicando vacío durante 1 hora más. Finalmente, las probetas saturadas se dejan sumergidas, en reposo, durante 24 horas, para posteriormente ser montadas en el dispositivo que muestra la Figura 22.



**Figura 22.** Celda de transferencia – ASTM C 1202.

El dispositivo mostrado se compone de 2 semi-celdas. A una de las parcialidades de la celda se le coloca cloruro de sodio (NaCl) al 3%, en masa, mientras que a la celda complementaria se le coloca hidróxido de sodio al 0.3 N (NaOH), conectando sus compartimientos a la terminal negativa y positiva de la fuente de poder, respectivamente. El proceso de difusión se acelera mediante la aplicación de 60 V, creando un campo eléctrico donde el movimiento de los iones se debe principalmente a la migración. Después de 6 horas de la aplicación del campo eléctrico, la permeabilidad del concreto a los cloruros se calcula a partir de los resultados de corriente y tiempo, expresando el resultado en términos de coulombs.

### **3.4. Descripción y caracterización de las varillas de refuerzo utilizadas.**

#### **3.4.1. Acero al carbono, acero termotratado, acero galvanizado y acero dual.**

- Micrografías.

Para llevar a cabo la toma de micrografías sobre la sección transversal de las varillas de diferente manufactura (AC, ATT, AG y AD) se cortó una pequeña muestra de cada tipo, con una longitud aproximada de 1 cm. Posteriormente, haciendo uso de un molde cilíndrico, las muestras se embebieron en una resina epóxica de baja viscosidad y curado a baja temperatura (SpeciFix 40 Struers), con un colorante fluorescente.

Las muestras se curaron durante 24 horas y se procedió a su pulido grueso haciendo uso de hojas abrasivas de carburo de silicio (SiC), en grados 120 y 240, aplicando una presión de 22.50 libras. Se recomienda un periodo de 2 minutos de pulido para cada hoja aplicada sobre una placa plana rotativa a 300 rpm, además de utilizar agua para enfriar y lubricar la muestra.

Posteriormente se procedió al pulido fino de las muestras sobre paños de 9, 3 y 1  $\mu\text{m}$ , aplicando una presión de 22.50 libras. Se recomienda un período de 3 minutos de pulido para cada paño, aplicado sobre una placa plana rotativa a 150

rpm, además de utilizar la pasta de diamante correspondiente y alcohol como lubricante; para finalmente, atacar la muestra con una solución de nitroxilo (HNO) diluida al 2% en alcohol.

Por último, se hace un pulido muy fino utilizando un paño de 1  $\mu\text{m}$ , aplicando una presión de 22.50 libras. Se recomienda un período de 2 minutos sobre una placa plana rotativa a 150 rpm, utilizando una suspensión de alúmina. Una vez que la muestra terminó de ser preparada, se realizaron las micrografías con un microscopio Carl Zeiss AxioVision SE64 y se analizaron mediante el programa AxioVision 4.6.2 SP1.

○ Análisis químico y microdureza.

- Se realizaron análisis químicos sobre la sección transversal del acero al carbono (AC) y el acero termotratado (ATT), con la finalidad de comparar los resultados, utilizando técnicas de espectroscopía de combustión recomendadas por ASTM E 415 y ASTM E 1019.
- Se realizaron análisis de microdureza sobre la sección transversal del acero al carbono (AC) y el acero termotratado (ATT), con la finalidad de comparar los resultados, utilizando la técnica de Vickers, según la recomendación ASTM E 384.

○ Resistencia al esfuerzo de tensión.

- Se realizaron ensayos de resistencia a la tensión sobre las varillas de diferente manufactura (AC, ATT, AG y AD), bajo la recomendación ASTM E 8.

### 3.5. Fabricación de los especímenes.

Con el propósito de simular las condiciones a las que se encuentra expuesta una estructura de concreto reforzado en un ambiente marino de manera experimental, se fabricaron especímenes utilizando relaciones agua-cemento de 0.45 y 0.65, con características físico-mecánicas comunes para cada diseño de mezcla.

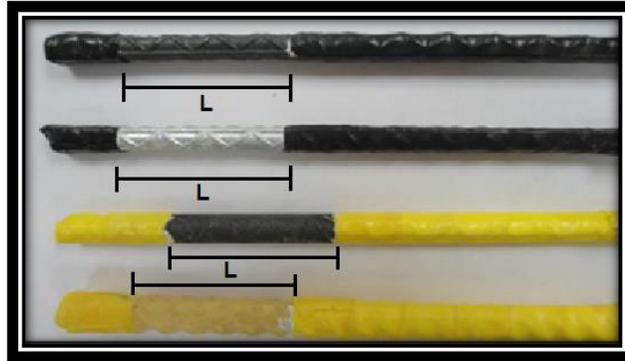
Dichos especímenes fueron reforzados empleando varillas de acero al carbón de diferente manufactura (Tabla 9) con un diámetro nominal de 0.95 cm (3/8 de pulgada) y una longitud de 18 cm, cuyas especificaciones se verificaron según la sección 3.4.1.

**Tabla 9.** Varillas de diferente manufactura, utilizadas como refuerzo para los especímenes de durabilidad.

Aceros de diferente manufactura		Verificación requerida
Acero al carbono	(AC)	ASTM A 615
Acero termotratado	(ATT)	ASTM A 615
Acero galvanizado	(AG)	ASTM A 615 - ASTM A 123
Acero dual metal-polímero	(AD)	ASTM A 1055

Las varillas AC, ATT y AG se decaparon siguiendo las recomendaciones de ASTM G1, teniendo la precaución de no reducir el espesor de la capa superficial, para el caso del acero termotratado y el acero galvanizado. Mientras que las varillas con recubrimiento dual metal-polímero sólo se limpiaron, haciendo uso agua destilada. En todos los casos se delimitó un área de estudio con una longitud de 5 cm, tal como se muestra en la Figura 23.

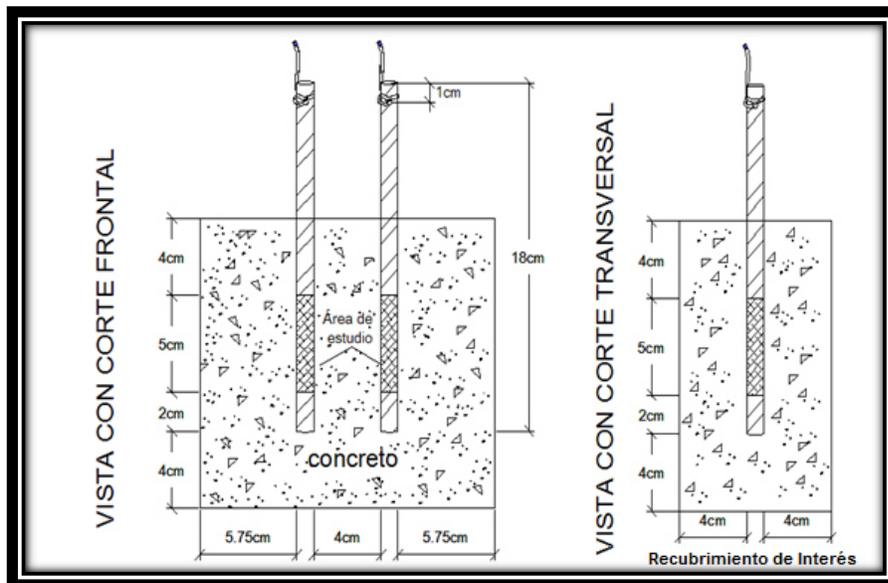
El resto de la superficie de la varilla fue cubierto con pintura epóxica y cinta de aislamiento eléctrico, tratando de inducir a los agentes agresivos a la zona delimitada. Además, se realizó una conexión eléctrica en cada una de las varillas, haciendo uso de un conductor eléctrico de cobre, con la finalidad de realizar las lecturas electroquímicas a través del mismo.



**Figura 23.** Región delimitada para el seguimiento electroquímico ( $L = \text{Longitud} = 5 \text{ cm}$ ).

Se optó por fabricar especímenes prismáticos de concreto con dimensiones de 17.5 x 9.0 x 15.0 cm, aumentando el ancho de 9.0 a 9.5 cm en el caso de utilizar acero dual metal-polímero, para asegurar un recubrimiento de 40 mm en las caras de exposición. A dichos especímenes se les embebieron 2 varillas de un mismo tipo de acero, tal como se muestra en el esquema del diseño geométrico que se muestra en la Figura 24.

En la Figura 25 se observa una de las probetas utilizadas, a las que, además, se les delimitó un área de estudio mediante un sellador vinílico en la cara de exposición del concreto, protegiendo aquellas zonas en la que la acción de los agentes agresivos era indeseable.



**Figura 24.** Esquema de especímenes monitoreados durante la experimentación.

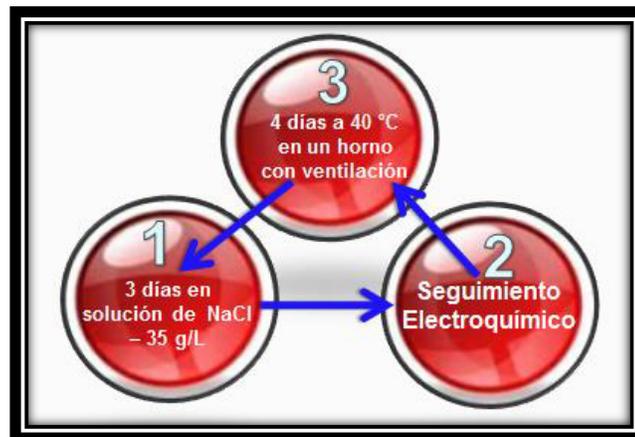


**Figura 25.** Especímenes para pruebas de durabilidad.

### 3.6. Exposición de los especímenes.

#### 3.6.1. Medio acelerado.

Debido a que los agentes agresivos deben ser transportados a través de la matriz porosa del concreto para iniciar el proceso de corrosión del acero, se requiere un amplio periodo de tiempo de exposición para alcanzar una densidad de corriente significativa en el refuerzo. Por eso se decidió propiciar o inducir la corrosión sometiendo los especímenes a una exposición acelerada, promoviendo la difusión de los cloruros a través de la matriz cementante. Ésta consistió en 3 días de inmersión en una solución de cloruro de sodio en agua destilada, al 3.5% en masa (35 g/L) y 4 días de secado en una cámara ambiental a 40 °C, con una humedad relativa del 60% y ventilación constante.



**Figura 26.** Esquema del ciclo de exposición acelerada inmersión-secado.



**Figura 27.** Especímenes expuestos a inmersión-secado.

### 3.7. Seguimiento electroquímico.

Los especímenes sometidos al medio de exposición acelerada fueron monitoreados a través de diferentes técnicas electroquímicas en el mismo electrolito de exposición, utilizando una configuración de 3 electrodos: un electrodo de trabajo (varilla), un electrodo de referencia (SCE) y un electrodo auxiliar o contra-electrodo (placa de acero inoxidable). Todas las mediciones se llevaron a cabo utilizando un sistema VoltaLab PGZ-301, que consiste en un potenciostato-galvanostato, con un analizador de frecuencias integrado y un software de procesamiento de datos VoltaMaster 4.0, utilizando siempre el equipo en modo potencioestático. En la Figura 28 se muestra el equipo utilizado y la configuración para las medidas electroquímicas.

#### 3.7.1. Potencial de media celda (E).

- El potencial de media celda se utilizó para obtener el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero embebido en concreto, utilizando un Electrodo de Calomel Saturado (SCE) como electrodo de referencia. Finalmente, el criterio de activación se obtuvo de las recomendaciones de la normatividad ASTM C 806.

### 3.7.2. Resistencia a la polarización lineal (LRP).

- La resistencia a la polarización lineal se utilizó para obtener la densidad de corriente asociada a la velocidad de corrosión ( $i_{corr}$ ) del acero embebido en concreto, utilizando un Electrodo de Calomel Saturado (SCE) como electrodo de referencia y aplicando 40 mV de polarización en un intervalo de 20mV catódicamente a 20 mV anódicamente, partiendo del potencial de reposo, a una velocidad de 0.16 mV/s. Finalmente, el criterio de activación se consideró como una densidad de corriente igual o mayor a  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

### 3.7.3. Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

- La espectroscopía de impedancia electroquímica se utilizó para interpretar el comportamiento del acero embebido en concreto y verificar los valores obtenidos por las técnicas de corriente directa (E – LRP). Esta técnica se aplicó en un intervalo de frecuencia de 10 mHz a 100 kHz, con una perturbación de 10 mV de pico a pico.



**Figura 28.** Equipo y configuración para la aplicación de las técnicas electroquímicas.

### 3.8. Inspección y cuantificación de cloruros en el concreto.

#### 3.8.1. Titulación potenciométrica.

Se determinó el porcentaje de cloruros totales por peso de cemento respecto a la norma ASTM C 1152, cortando muestras con un espesor de 8 mm, desde el exterior del recubrimiento hasta la armadura; que fueron trituradas para obtener polvos cribados por el tamiz #100, realizando una corrección de equivalencias de 10g a 4g para cada muestra y la cantidad correspondiente al reactivo utilizado; en este caso, nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ). Todas las medidas para porcentajes de cloruros totales se realizaron en un titulador marca Metro-Ohm, compuesto de un dosificador modelo 848 Titrino plus y un intercambiador automático de muestras 869 Compac Sample Changer, Figura 29.



**Figura 29.** Muestras de concreto pulverizadas, correspondientes a diferentes profundidades, tituladas según ASTM C 1152.

#### 3.8.2. Espectroscopía de energía dispersiva (EDS – SEM).

La espectroscopía de energía de rayos-X (EDS), llevada a cabo en el microscopio electrónico de barrido (SEM), es una técnica utilizada para identificar los elementos y/o las fases presentes en un material de forma cualitativa. Además, de ser requerido, se pueden realizar análisis cuantitativos midiendo las intensidades de las líneas de rayos X emitidas desde el espécimen, lo que se logra calculando las concentraciones elementales a partir de la relación entre dichas intensidades y las emitidas por muestras estándar de composición estequiométrica conocida. Es importante mencionar que la preparación de la muestra tiene una importancia significativa, ya que de ésta depende la

calidad de los resultados obtenidos durante el análisis. Así que, asumiendo una muestra de concreto sólido [Winter, 2012], la preparación adecuada se describe a continuación:

1. Se obtuvieron muestras sólidas de concreto a partir de los especímenes sometidos a exposición acelerada, utilizando una sierra de corte fino y etanol como lubricante. Dichas muestras se cortaron con una longitud de 40 mm, desde la cara de exposición hasta la armadura, procurando que el perfil difusional quedara intacto; un ancho de 25 mm paralelo a la cara de exposición, con la varilla centrada al corte; y una altura de 8 mm, para no tener problemas al introducir la muestra en la cámara del SEM.

**Nota:** Toda muestra debe ser cortada en el tamaño apropiado para ser colocada en el porta-muestras y posteriormente en la cámara del SEM, pero las técnicas de corte empleadas no deben contaminar, dañar ni modificar la superficie o la composición química del material. Además la muestra se debe lubricar y limpiar con el fluido no reactivo apropiado, utilizando un baño ultrasónico para eliminar las partículas de polvo impregnadas sobre la superficie.

2. La muestra debe estar totalmente seca antes de ser preparada, para posteriormente ser almacenada en un desecador; por lo que las muestras se sometieron a un periodo de secado de 24 horas, a 37 °C, en un ambiente libre de humedad. Identificando previamente las caras de exposición, para su posterior análisis.

**Nota:** Todo material cementicio requiere un secado riguroso, debido a que contiene una porción significativa de agua libre entre sus poros. Una vez que el agua es eliminada, la muestra está disponible para ser cubierta por resina epóxica. Sin embargo, se debe tener precaución, ya que cualquier técnica de secado puede alterar la microestructura y/o composición química de la muestra, por lo que es necesario considerar los efectos negativos del secado y sus resultados posteriores.

3. Posteriormente se aplicó la resina epóxica, que tiene como finalidad sellar los poros del concreto. Para llevar a cabo esta etapa, las muestras se colocan en una cámara hermética y se les aplica vacío durante 2 horas, al término de las cuales se preparó la resina epóxica y se inyectó a través del recipiente, a una velocidad adecuada para permitir la correcta impregnación de cada muestra. Se

cierra la válvula de inyección de la resina epóxica y se deja reposar la muestra durante 10 minutos, para finalmente someterla a secado durante 24 horas, a 37 °C, en un ambiente libre de humedad, como se muestra en la Figura 30.

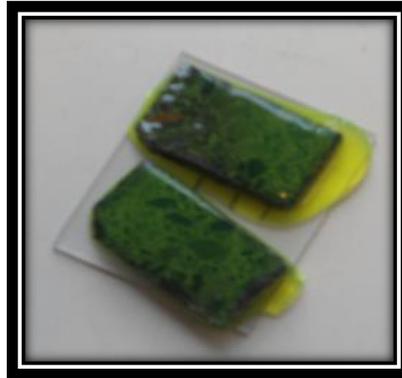


**Figura 30.** Muestra de concreto cubierta con resina epóxica.

**Nota:** La resina epóxica debe cubrir en su totalidad los poros de la muestra de concreto, para obtener una buena sección de análisis, por lo que se recomienda utilizar una resina de baja viscosidad y curado a bajas temperaturas, preferiblemente de 35°C a 40°C. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando una resina SpeciFix 40 marca Struers, con un colorante fluorescente.

4. Una vez que la resina se curó completamente, las muestras se identificaron y se montaron sobre una superficie de acrílico, haciendo uso de un pegamento epóxico de 2 componentes, Figura 31.

**Nota:** Se retiran los excesos de pegamento para evitar la contaminación de las muestras y se somete a un baño ultrasónico con etanol durante 30 segundos para eliminar las partículas adheridas a la superficie. Finalmente se someten a secado durante un periodo de 4 horas, a 40 °C, en un ambiente libre de humedad. El acrílico tiene la función de facilitar la manipulación de las muestras para su posterior pulido.



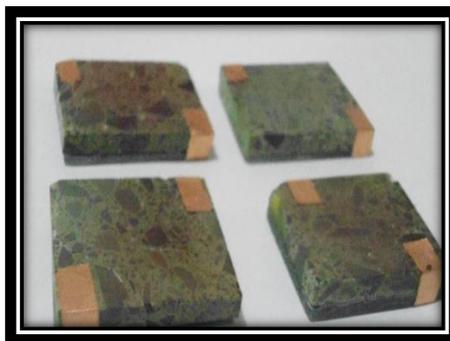
**Figura 31.** Muestra de concreto cubierta con resina epóxica, sobre superficie de material acrílico.

5. Una vez que las muestras están montadas sobre el acrílico, se procede a su rectificado, esmerilado y pulido grueso, haciendo uso de hojas abrasivas o lijas, aumentando su grado de fineza paulatinamente, hasta obtener una superficie plana y parcialmente pulida. Dicho procedimiento se llevó a cabo utilizando lijas de grados: 320, 500, 800 y 1200 durante un periodo de 10 minutos para cada una, utilizando etanol como lubricante y haciendo limpieza de la muestra en un baño ultrasónico, con etanol entre cada hoja. Se recomienda una velocidad de pulido entre 300-1000 rpm sobre una placa plana, utilizando hojas abrasivas ( $< 50 \mu\text{m}$ ) unidas al sustrato.
6. Posteriormente, las muestras se pulieron en paños de 6, 3, 1 y  $\frac{1}{4}$  micrómetros, utilizando un spray de diamante durante periodos de 15 minutos para cada uno. Se recomienda una velocidad de pulido de 100 rpm sobre una placa plana, utilizando spray o pasta de diamante, para los paños de  $25 \mu\text{m}$  hasta  $0.25 \mu\text{m}$  unidos al sustrato.
7. Ya que las muestras son un material cerámico no conductor, se procedió a su metalización mediante la aplicación de una capa fina de carbono en vacío, haciendo uso de un vaporizador de carbón marca Denton Vacuum - Desk. Por lo general se usan barras puntiagudas de carbono de 3 a 6 mm de diámetro y 3 cm de largo, las que están en contacto y se les hace pasar una corriente de 100 A

durante pocos segundos, para vaporizar el carbón y depositarlo uniformemente sobre la muestra.

**Nota:** Es recomendable que la presión de vacío sea igual o menor que  $10^{-4}$  Torr y, dado que los átomos de carbono evaporados viajan sólo en líneas rectas, este método de recubrimiento es adecuado únicamente para especímenes planos. Se considera un espesor óptimo de carbono de aproximadamente 20 nm, que se puede controlar mediante la distancia y la duración de la exposición. Sin embargo, las muestras deben ser siempre equidistantes de la fuente de carbono, con el fin de garantizar la uniformidad del espesor del recubrimiento. Finalmente, las muestras y los estándares metalizados deben mantenerse en un ambiente libre de polvo; preferentemente, en un desecador hasta su análisis en el SEM.

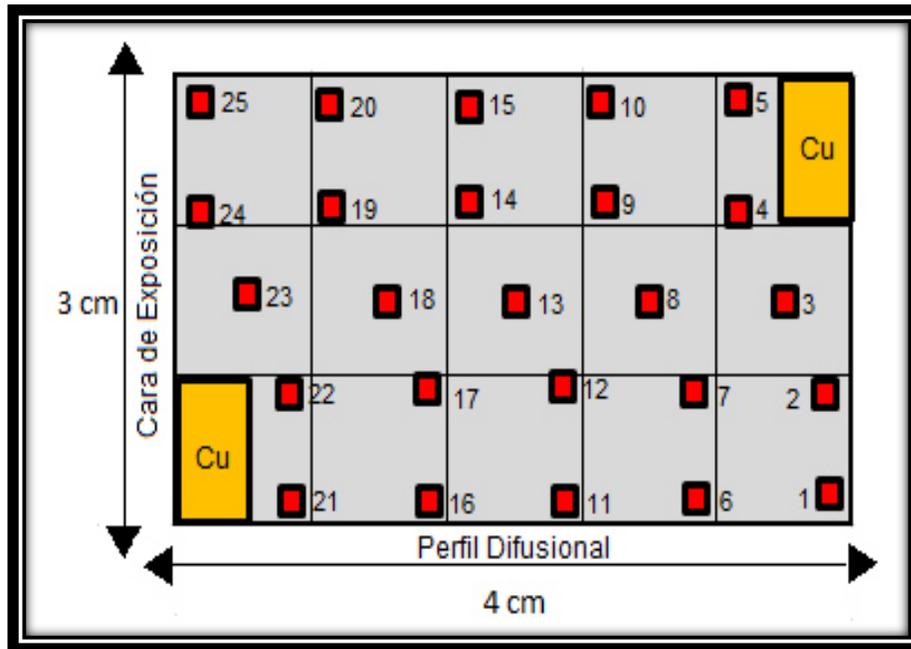
8. Una vez preparada la muestra para su análisis, se coloca en el porta-muestras para el microscopio electrónico de barrido (SEM), donde se procede a utilizar la técnica de espectroscopía de energía dispersiva de Rayos-X. Sin embargo, debido a que el espécimen no es conductor, se debe realizar una conexión eléctrica de la muestra al porta-muestras y de éste a la platina del microscopio. En la Figura 32 se puede apreciar el uso de una cinta de cobre, que proporciona una ruta conductora de electricidad a tierra y evita la carga eléctrica de la muestra.



**Figura 32.** Muestras de concreto para el análisis de concentración de cloruros, EDS-SEM.

9. Finalmente, se ventila y se abre la cámara del SEM para introducir la muestra; una vez colocada, la cámara se cierra (verificando el correcto tamaño del espécimen) y se aplica alto vacío. Por último, el SEM se carga y se activa el alto voltaje y el detector para comenzar a analizar sobre las diferentes fases de la

pasta de cemento hidratado, donde el promedio de 5 análisis sobre una sección de 8 x 30mm de la muestra de concreto representará la concentración de cloruros, siendo la Concentración Crítica de Cloruros para cada muestra, el promedio de los primeros 5 análisis (1 - 5), tal como se muestra en la Figura 33.



**Figura 33.** Esquema de puntos analizados en una muestra de concreto utilizando EDS-SEM.

10. Algunos autores [Pacheco et. al., 2012] han elaborado recomendaciones de condiciones bajo las que se pueden obtener análisis cuantitativos por medio de la técnica de EDS-SEM; sin embargo, dichas condiciones pueden variar de un equipo a otro. En nuestro caso particular y con la finalidad de hacer un análisis sólo semicuantitativo de todas las muestras para comparar cualquier valor de contenido de cloruros obtenido, se optó por utilizar condiciones de análisis fijas y normalizar los resultados. Esto se logró haciendo uso de un microscopio JEOL JSM – 6510 LV, bajo los siguientes requerimientos:

- Utilizar la primera apertura del microscopio electrónico de barrido en modo de electrones secundarios, con un tamaño de apertura (spot-size) de 40 y 120 segundos de adquisición (live seconds).

- Utilizar un voltaje de aceleración de 15 KV, con una intensidad de corriente de 80  $\mu\text{A}$ ; además de una distancia de trabajo de 15 mm, a 2500 aumentos.
- Para todo análisis se verificó que las cuentas por segundo (CPS) en los agregados fueran  $\geq 2000$ , analizando sólo el contenido de los siguientes elementos en la pasta del concreto: Na, Mg, K, Ca, O, Al, Si, S y Cl.

# **CAPÍTULO 4**



**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Caracterización de las mezclas de concreto.

##### 4.1.1. Propiedades en estado fresco.

Se realizaron ensayos de control de calidad para verificar las propiedades del concreto en estado fresco en cada una de las bachadas fabricadas para las distintas relaciones agua/cemento (a/c) utilizadas en la elaboración de los especímenes. El resumen de resultados se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Resumen de propiedades en el concreto fresco.

Relación a/c (Unidad)	Revenimiento (cm)	Temperatura (°C)	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de Aire (%)
0.45	20	25	2396	2.9
0.65	20	23	2329	1.7

Las propiedades obtenidas para ambos diseños de mezcla resultaron semejantes. Por lo que, se puede considerar que las proporciones propuestas en la sección 3.2.2. son apropiadas para fabricar concretos de la misma trabajabilidad, con diferente microestructura, manteniendo como únicas variables el contenido del agua de reacción y la dosificación del aditivo superfluidificante.

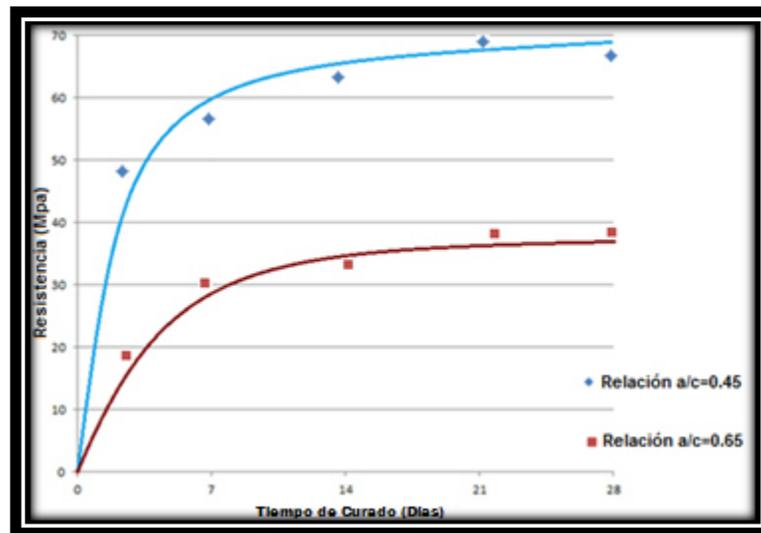
##### 4.1.2. Propiedades físico-mecánicas.

El resumen de resultados para cada una de las pruebas a 28 días de curado estándar se muestra a continuación:

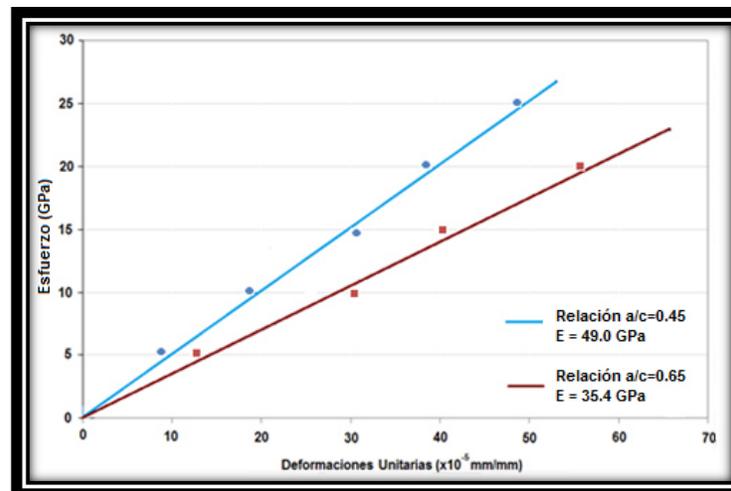
- Resistencia a la compresión. En la Figura 34 se pueden observar los resultados de resistencia a la compresión obtenidas para ambos diseños de mezcla. Las

mezclas  $a/c = 0.45$  y  $a/c = 0.65$  desarrollaron a 28 días de curado, una resistencia de 69 MPa ( $710 \text{ kg/cm}^2$ ) y 37 MPa ( $374 \text{ kg/cm}^2$ ) respectivamente.

- Módulo de elasticidad. En la Figura 35 se pueden observar las curvas de módulo de elasticidad obtenidas para ambos diseños de mezcla. Las mezclas  $a/c = 0.45$  y  $a/c = 0.65$  desarrollaron un módulo elástico de 49 GPa ( $500,050 \text{ kg/cm}^2$ ) y 33.4 GPa ( $361,123 \text{ kg/cm}^2$ ) respectivamente.

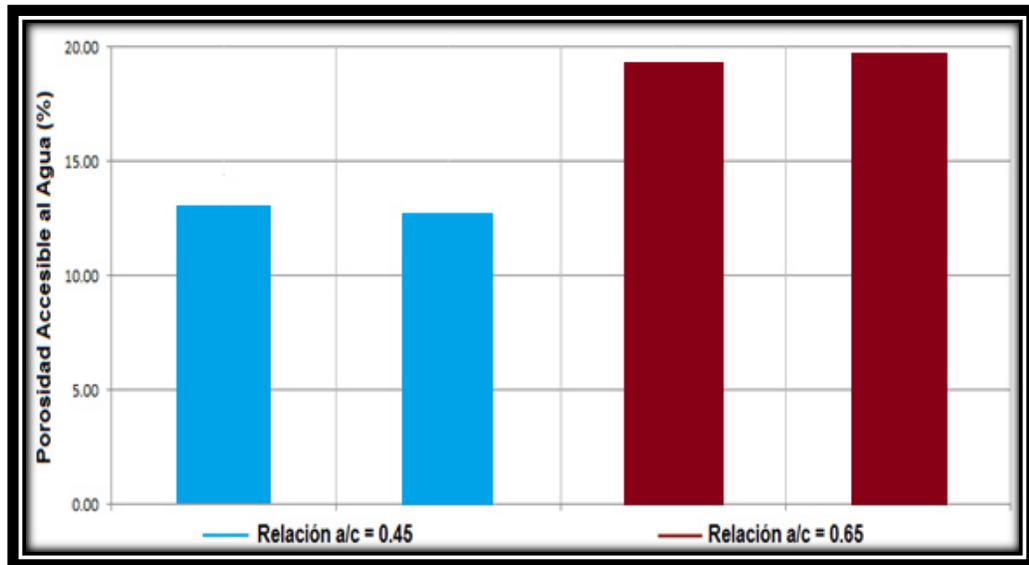


**Figura 34.** Resistencia a la compresión (MPa) vs. Tiempo de curado (Días).



**Figura 35.** Esfuerzo ( $\sigma$ ) vs. Deformación ( $\epsilon$ ) para Módulo de Elasticidad (E).

- Porosidad accesible al agua. La Figura 36 muestra los resultados obtenidos para ambos diseños de mezcla por duplicado. Las mezclas con una relación  $a/c = 0.65$  presentaron una porosidad abierta promedio de 19.4%, el que se puede considerar como un valor de porosidad esperado para un concreto convencional. Las mezclas con una relación  $a/c = 0.45$  presentaron un 12.9%.



**Figura 36.** Porosidad accesible al agua en probetas de concreto.

- Resistencia a la penetración de cloruros. En la Tabla 11 se pueden observar los resultados de la prueba rápida a la penetración de cloruros para ambos diseños de mezcla. Las mezclas con una relación  $a/c = 0.65$  y  $a/c = 0.45$  presentaron una transferencia de carga promedio de 8498 C (alta permeabilidad) y 2655 C (moderada permeabilidad), respectivamente.

Dichos valores son congruentes con los resultados obtenidos mediante la prueba de porosidad accesible al agua, por lo que el concreto diseñado con una relación  $a/c = 0.45$  es un material asociado con una microestructura más compacta, del que se estima una mayor durabilidad, producto de su aumento de resistencia a la penetración de agentes agresivos, comparado con el concreto diseñado con una relación  $a/c = 0.65$ .

**Tabla 11.** Resultados de permeabilidad rápida a cloruros.

Parámetros de Celda	a/c = 0.45			a/c = 0.65		
	1	2	3	1	2	3
<b>Carga (C)</b>	2753	2530	2681	9195	8045	8254
<b>Clasificación</b>	Moderada - Permeabilidad			Alta - Permeabilidad		

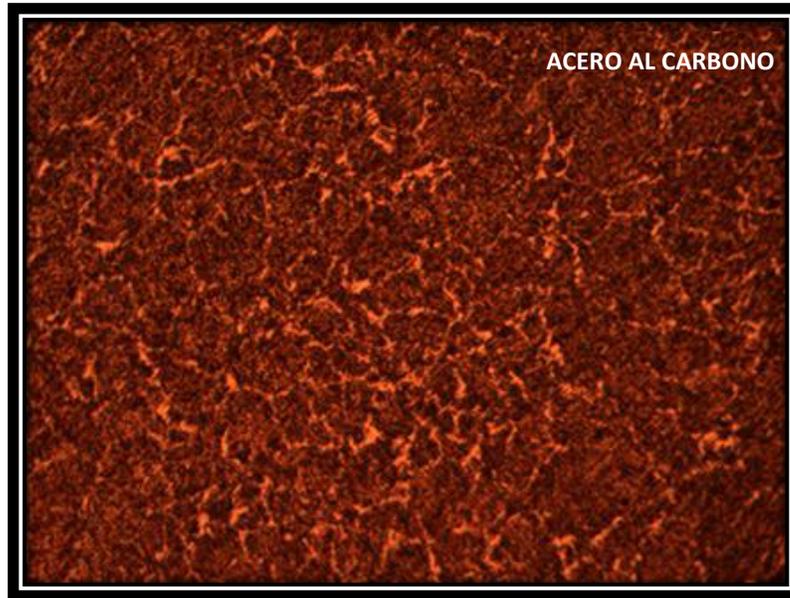
Es de notar que el aumento de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad, así como la disminución de la porosidad abierta y el incremento de la resistencia a la penetración de cloruros en la mezcla a/c = 0.45, es totalmente atribuible al uso de una menor cantidad de agua de reacción y a la acción dispersiva polar del aditivo superfluidificante. Este fenómeno permite distribuir las moléculas agua de manera más homogénea entre los granos de cemento para formar una pasta con una microestructura más compacta y estable, lo que dificulta los procesos de transporte al interior de la matriz cementante (principalmente la capilaridad y la difusión, como lo evidencia la prueba rápida de permeabilidad a los cloruros), por lo que se espera un aumento de la vida útil en las probetas fabricadas con una menor relación agua-cemento.

#### **4.2. Caracterización química, microestructural y físico-mecánica de las varillas de diferente manufactura.**

##### **4.2.1. Acero al carbono AC, acero termotratado ATT, acero galvanizado AG y acero dual AD.**

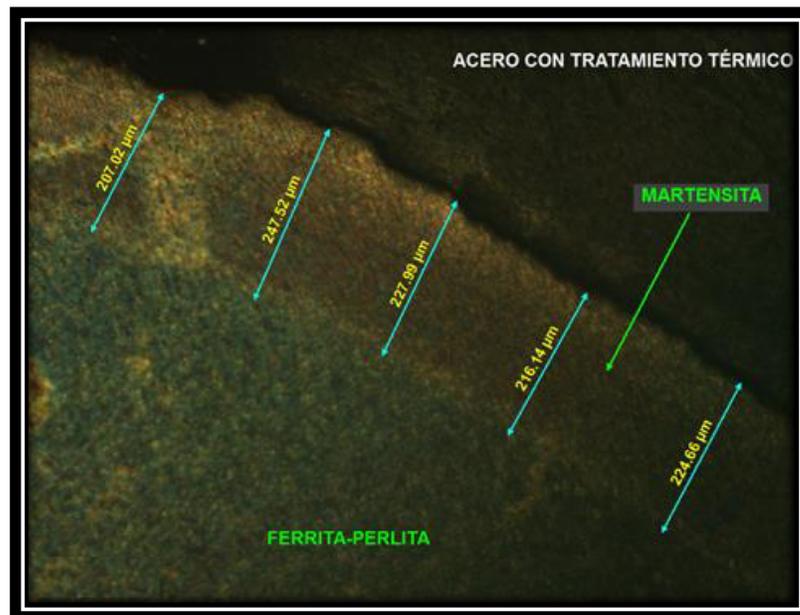
- Micrografías (AC, ATT, AG, AD).

En las Figura 37, 38 y 39 se presentan, respectivamente, las micrografías de las secciones transversales AC, ATT y AG preparadas según la sección 3.4.1. En la Figura 37, se puede observar la superficie homogénea típica del acero al carbono (AC), compuesta de fases ferrita-perlita.



**Figura 37.** Micrografía AC a 100 X.

En la Figura 38, aplicando 50 X, se observa la sección transversal de una muestra de acero termotratado (ATT), que a diferencia de AC, presenta dos zonas perfectamente definidas: un núcleo homogéneo compuesto por fases ferrita–perlita, rodeado de una fase de martensita con un espesor promedio de 225  $\mu\text{m}$ .



**Figura 38.** Micrografía ATT a 50 X.

En la Figura 39 se aprecia la sección transversal del acero galvanizado a 10 X, la que, al igual que AC y ATT, cuenta con un núcleo compuesto de fases ferrita–perlita que proporcionan las propiedades físico-mecánicas requeridas, rodeado de distintas fases de aleación Fe-Zn, las que se detallan en la Figura 40. El espesor promedio del recubrimiento galvanizado fue de 90  $\mu\text{m}$ , por encima del mínimo indicado en la ASTM A 1055.

Finalmente, en la Figura 41 se puede observar una micrografía de la sección transversal de una varilla de acero dual (metal–polímero) aplicando 20 X, la que tiene su núcleo (ferrita–perlita) rodeado de fases de aleación Fe–Zn, con un espesor promedio de 30  $\mu\text{m}$  y una cubierta de epóxico de más de 350  $\mu\text{m}$ . Este recubrimiento epóxico proporciona una barrera adicional contra los agentes agresivos (cloruros), impidiendo su interacción con el galvanizado, por lo que se puede esperar un periodo de vida útil más amplio en este tipo de refuerzo.

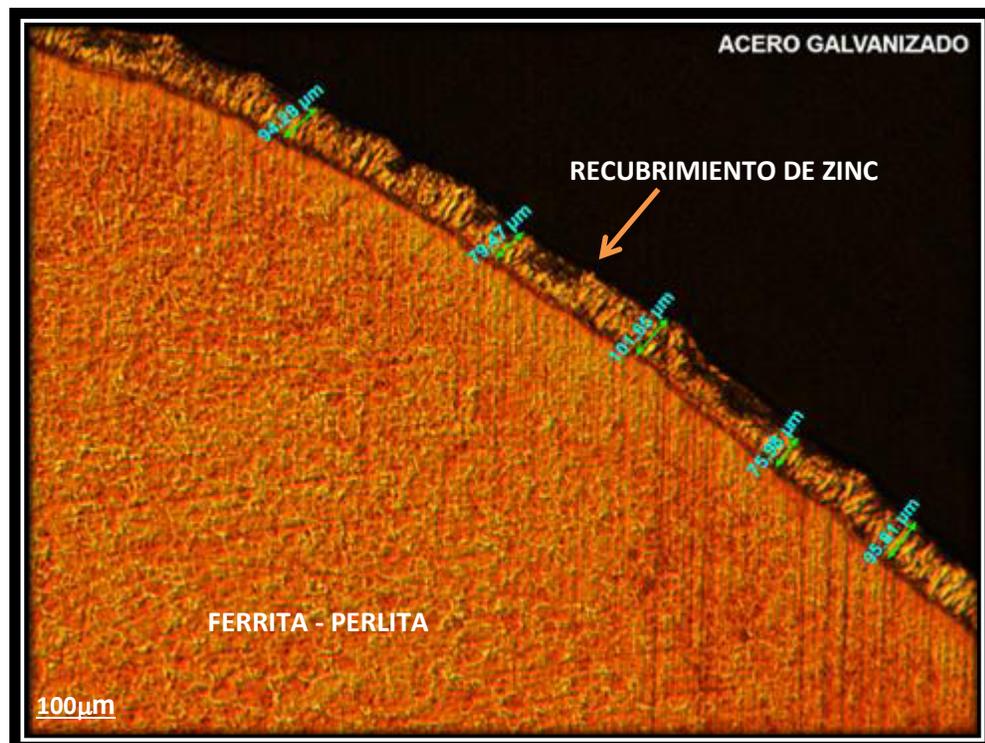


Figura 39. Micrografía AG a 10 X.



Figura 40. Micrografía AG –Fases del galvanizado a 50 X.

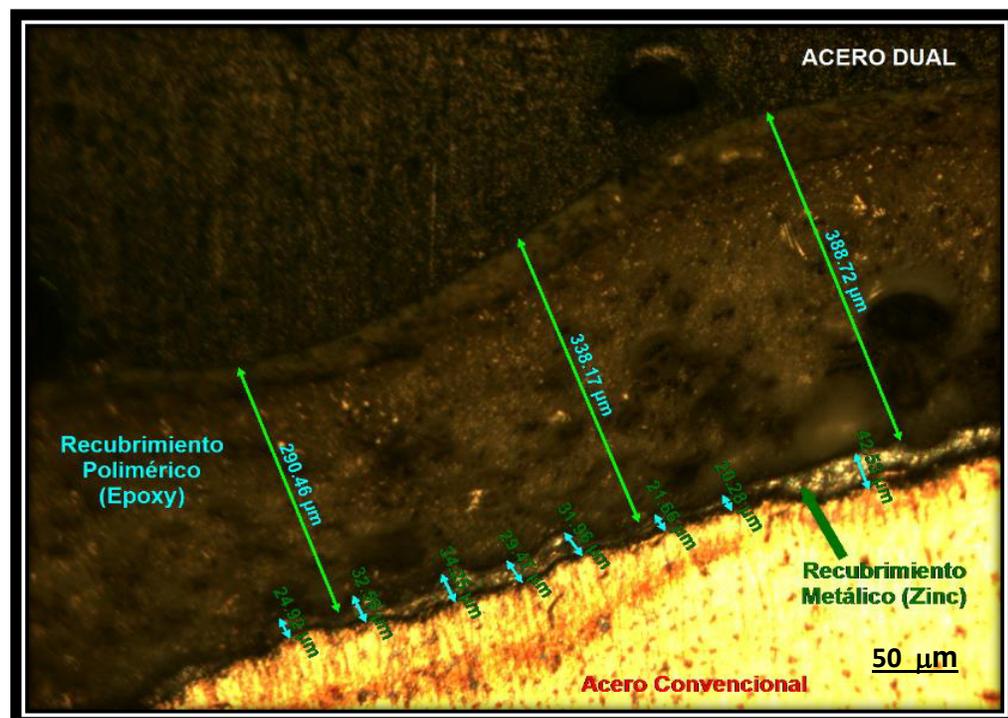
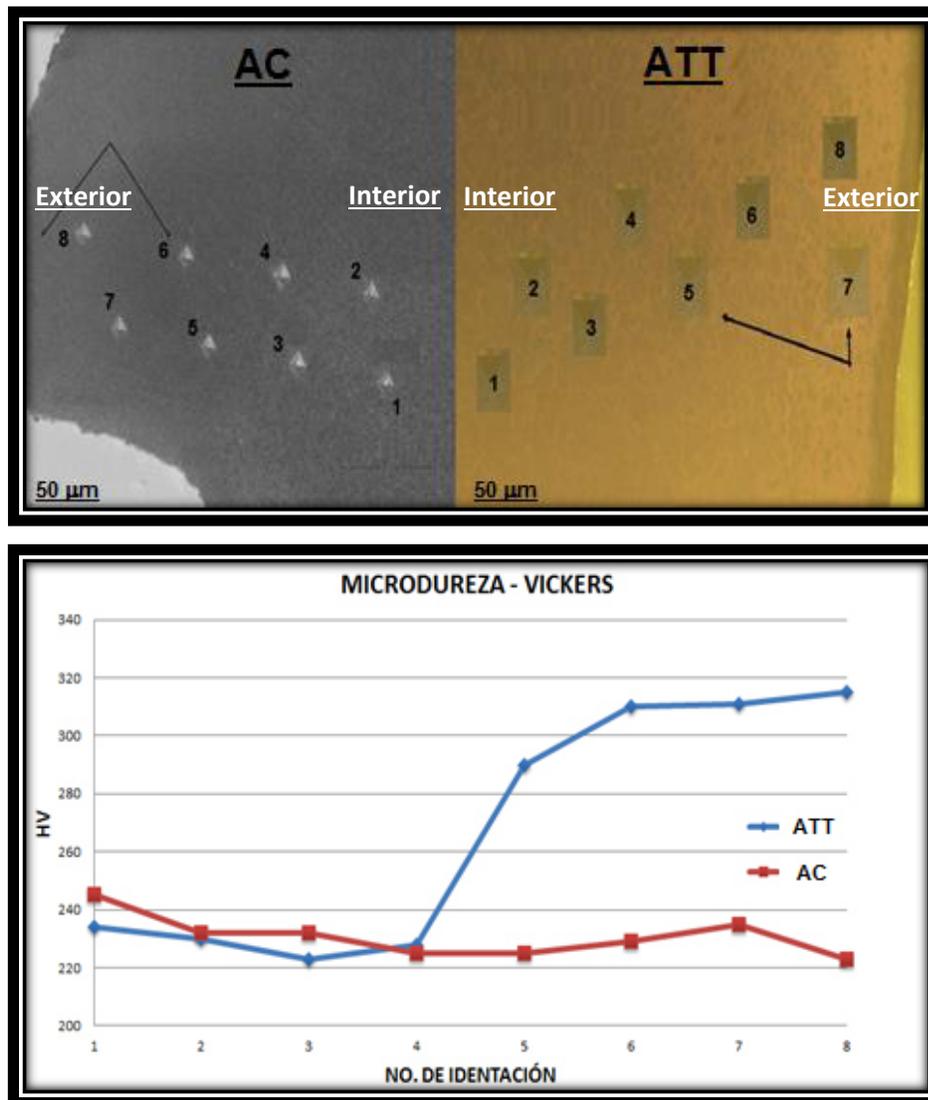


Figura 41. Micrografía AD a 20 X.

- Microdureza y composición química (AC – ATT).

Se obtuvo la microdureza y la composición química sobre la sección transversal del AC y del ATT, con la finalidad de identificar y caracterizar sus fases. Los resultados de microdureza, con su esquema de identaciones se observan en la Figura 42, mientras que los de composición química se muestran en la Tabla 12.



**Figura 42.** Microdureza Vickers con esquema de identaciones para ATT y AC según, ASTM E 384.

Los análisis de microdureza se llevaron a cabo según las variantes de Vickers. Dichas pruebas consistieron prácticamente en realizar una serie de 8 impactos desde la periferia de las secciones transversales AC y ATT, hasta el centro de las mismas, obteniendo valores en los intervalos de 320 a 280 HV para el área perimetral sometida a tratamiento térmico (fase martensítica) del ATT y de 245 a 220 HV, en la fase ferrítica-perlítica que compone a ambos tipos de acero de refuerzo. Dichos valores son congruentes con los reportados en la bibliografía y, en general, se puede esperar una mayor microdureza en materiales templados [Gale et. al., 2004].

**Tabla 12.** Composición química de las secciones transversales de las varillas AC y ATT, por ASTM E 415 y ASTM E 1019.

<b>Elemento Químico</b>	<b>Acero al Carbono AC (%)</b>	<b>Acero Termotratado ATT (%)</b>
C	0.41	0.37
Mn	1.13	0.67
Cu	0.25	0.37
Si	0.19	0.21
Cr	0.10	0.17
Ni	0.07	0.11
Sn	0.016	0.033
S	0.024	0.027
P	0.015	0.021

Por otra parte, un análisis químico de alta precisión (sección 3.4.1.), expresado de manera elemental, reveló cambios significativos en las proporciones de algunos microaleantes. En efecto, se presentó un incremento en el contenido de Cu, Si, Cr y Ni en el ATT que, además de disminuir la temperatura de endurecimiento para el revenido y posterior formación de la capa martensítica, podría incrementar notablemente su resistencia a la corrosión, al formar óxidos más estables.

- Resistencia al esfuerzo de tensión (AC, ATT, AG, AD), ASTM E 8.

Es importante mencionar que todas las varillas utilizadas para el desarrollo de la experimentación cumplen la norma mexicana NMX C 407, con una calidad de manufactura grado 42, por lo que se verificó una resistencia mínima a la fluencia  $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ .

### 4.3. Seguimiento electroquímico.

#### 4.3.1. Potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) – Intensidad de corriente ( $i_{\text{corr}}$ ).

##### Acero al carbono (AC)

Debido a que no existe una recomendación que considere los límites del comportamiento electroquímico del acero termotratado fabricado bajo el proceso QTB, se asumieron los criterios electroquímicos para el acero al carbono de ASTM C 876, dada la similitud en sus componentes elementales. Por lo tanto, en ambos casos (AC y ATT) se considerará la activación e inicio de la corrosión cuando el valor de  $E_{\text{corr}}$  sea igual o menor que -273 mV (utilizando como referencia un Electrodo de Calomel Saturado – SCE), y el valor de  $i_{\text{corr}}$  exceda  $0.1 \mu\text{A/cm}^2$ .

En las Figuras 43 y 44 se presenta el seguimiento electroquímico para el potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) y para la intensidad de corriente ( $i_{\text{corr}}$ ) del acero al carbono (AC) embebido en concreto, con  $a/c = 0.65$  y  $a/c = 0.45$ , respectivamente. Las varillas AC embebidas en concreto con una relación  $a/c = 0.65$  permanecen en estado pasivo dentro de un intervalo de -90 mV a -150 mV, presentando altas probabilidades de activarse después de los 20 ciclos (140 días) de exposición, con valores de -400 mV a -600 mV. Momento en el que alcanzan una  $i_{\text{corr}}$  mayor que  $0.1 \mu\text{A/cm}^2$ , la que se incrementa hasta  $4.0 \mu\text{A/cm}^2$  al final de 40 ciclos de humedecimiento-secado; mientras que los especímenes con una  $a/c = 0.45$  permanecen pasivos debido a que la matriz cementante retarda la llegada de los  $\text{Cl}^-$  a la zona de la interfase con el acero de refuerzo.

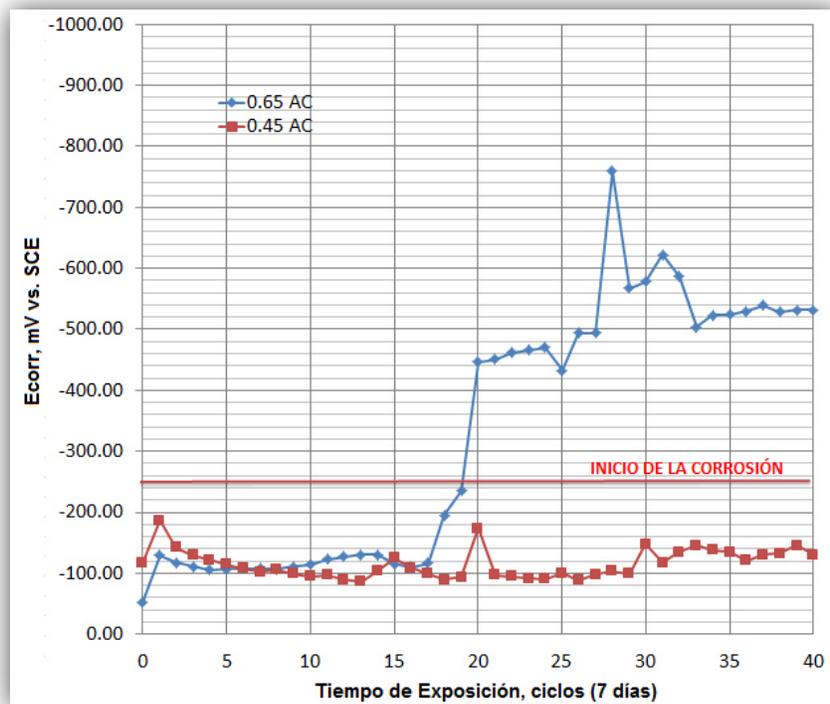


Figura 43. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – AC – a/c = 0.65 y 0.45

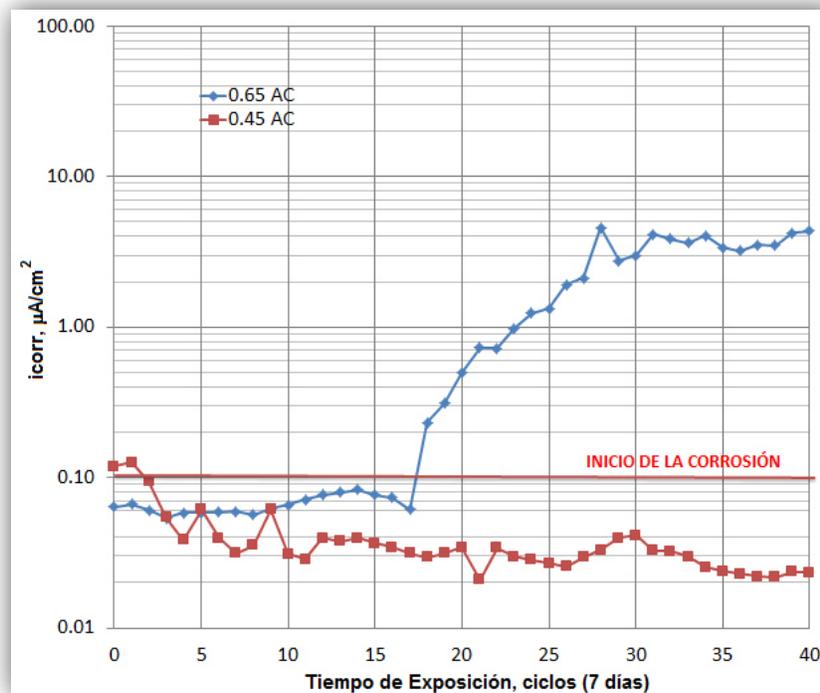


Figura 44. Intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ) – AC – a/c = 0.65 y 0.45

### Acero termotratado (ATT)

En las Figuras 45 y 46 se presenta el seguimiento electroquímico para  $E_{corr}$  e  $i_{corr}$  del acero termotratado (ATT), en concretos de  $a/c = 0.65$  y  $a/c = 0.45$ , respectivamente. Estas varillas, para un sistema  $a/c = 0.65$ , presentan un comportamiento similar al AC, permaneciendo pasivas en un intervalo de  $-90$  mV a  $-180$  mV y adquiriendo una mayor probabilidad de corrosión a los 15 ciclos (105 días) de exposición, con potenciales de  $-300$  mV a  $-500$  mV y una intensidad de corriente de  $0.1$  a  $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , que se incrementó hasta  $2.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , al final del periodo experimental. Sin embargo, es importante mencionar que, a diferencia del acero al carbono (AC), el acero termotratado (ATT), después de la activación muestra valores de  $E_{corr}$  e  $i_{corr}$  que lo ubican en la zona de pasivación entre el ciclo 16 y el ciclo 19 de exposición, por lo que, además de mantener siempre una intensidad de corriente menor que la de AC, puede existir una posible repasivación (comportamiento que se puede observar en ambos sistemas).

Ahora bien, con base en el seguimiento electroquímico realizado para AC y ATT en el concreto con una relación  $a/c = 0.45$ , y haciendo una correlación con los resultados obtenidos para los sistemas con un concreto de relación  $a/c = 0.65$ , se esperan obtener comportamientos similares, con la única variable del tiempo de activación, que será mayor cuando la microestructura del concreto sea más compacta. Por esta razón, y por la falta de información electroquímica para un periodo más prolongado, los resultados para potencial de corrosión e intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ), así como para el análisis de espectroscopia de impedancia electroquímica y la cuantificación de cloruros por titulación potenciométrica y EDS serán acotados sólo a los sistemas con una relación  $a/c = 0.65$ .

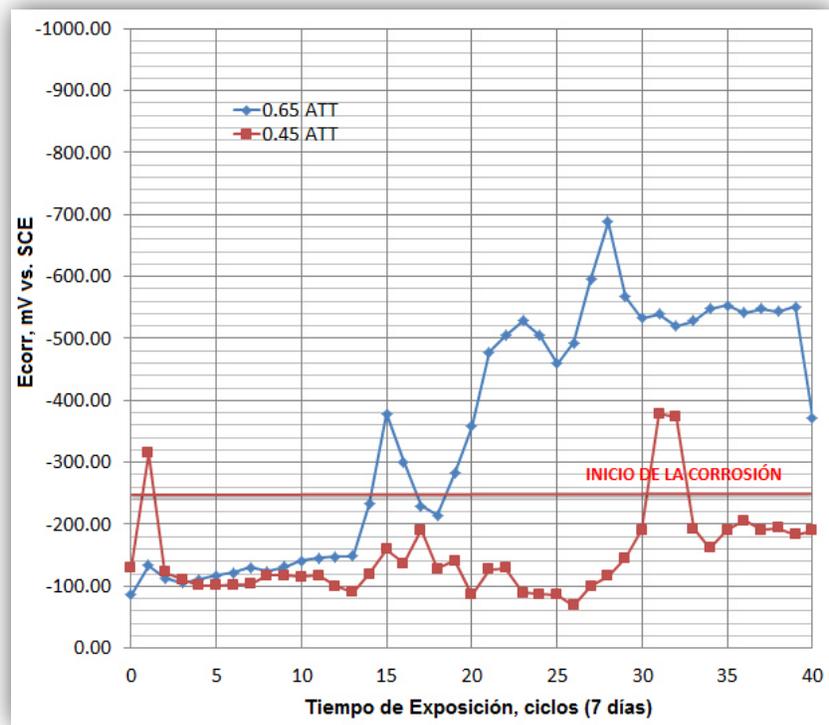


Figura 45. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – ATT – a/c = 0.65 y 0.45

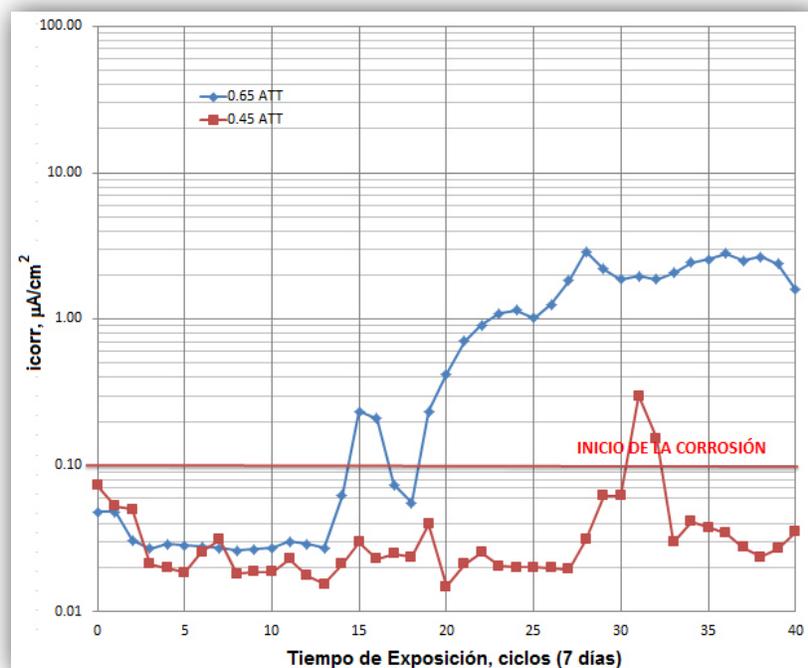


Figura 46. Intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ) – ATT – a/c = 0.65 y 0.45

Del análisis de los resultados mostrados y suponiendo que la activación electroquímica del acero es el momento en el que los cloruros han llegado en cantidad suficiente a la interfase concreto-acero para romper la capa pasiva sobre su superficie e iniciar un proceso de corrosión [Garcés et. al., 2008], se puede deducir que ATT requirió una menor cantidad de cloruros para su activación que AC (Verificación en la Sección 4.4). Pero es preciso destacar, a pesar de que ATT se activa primero que AC, que esto no implica en ninguna medida que tenga un periodo de vida útil más corto, ya que mientras el AC pasa de un estado pasivo a uno activo con un proceso de corrosión irreversible por picadura, el ATT también se activa, pero presenta propiedades intrínsecas para repasivarse y/o atenuar el proceso electroquímico de degradación sobre su superficie; es decir, que el ATT presentó una tasa  $i_{corr}$  relativamente menor que AC hacia el final del periodo de exposición.

Finalmente, es necesario mencionar que termodinámicamente es posible suponer que el ATT tenderá a activarse en un periodo de tiempo más corto que el AC, debido a que el ATT contiene una mayor cantidad de energía, producto de su proceso de fabricación, en el que se guarda una mayor energía calorífica durante su enfriamiento súbito (lo cual produce una capa exterior de martensita). Sin embargo, el ATT presenta un comportamiento electroquímico de activación-pasivación-activación, que difiere por completo del comportamiento tradicional del AC, manteniendo una intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ) menor durante todo el periodo de exposición. Este fenómeno se puede atribuir a alguna de las siguientes razones:

1. Algunos autores [Arellano et. al., 2006] [Maldonado, 2009] han reportado procesos de corrosión generalizada para acero termotratado expuesto en ambientes marinos, por lo cual se propone que, en un determinado momento, la superficie de las áreas anódicas es similar al de las áreas catódicas, lo que puede balancear las reacciones electroquímicas y dar como resultado un aumento en el potencial de corrosión y una disminución de la velocidad de corrosión. Esto puede llegar a percibirse como una repasivación de forma momentánea, mientras que se redistribuyen las áreas anódicas y catódicas en la superficie del acero.

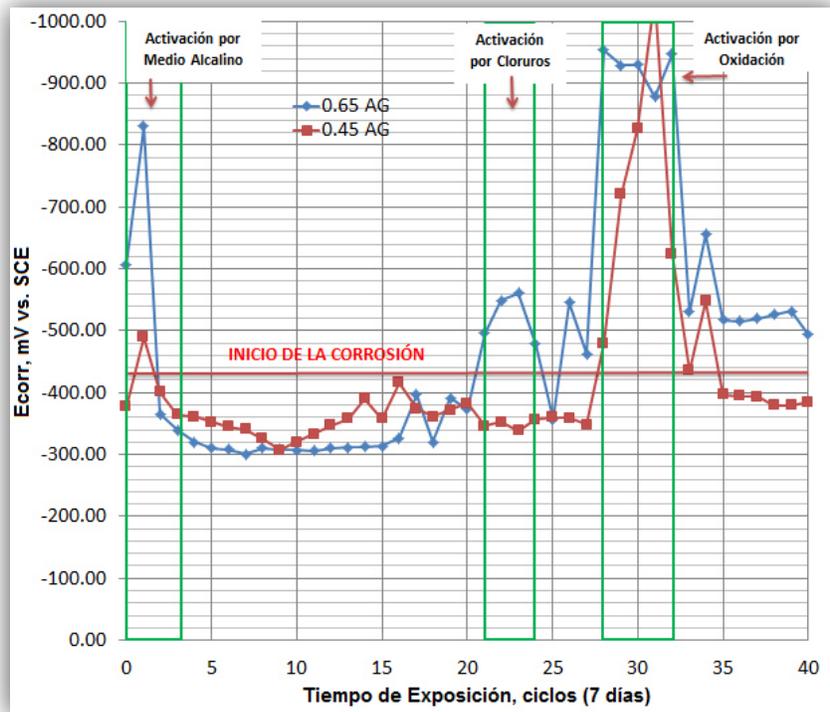
2. El uso de algunos microaleantes, tales como Cu, Si, Cr y Ni, podría incrementar notablemente su resistencia a la corrosión, al formar óxidos más estables [Chang R., 2007].

Se recomienda ampliar el período de exposición, a manera de dar tiempo a la evolución de la cinética de corrosión, analizar su morfología y la composición química de los óxidos formados.

#### Acero galvanizado (AG)

En el caso del acero galvanizado, el zinc ofrece un incremento en el tiempo de iniciación de la corrosión; este tipo de protección se fundamenta en que el zinc forma productos de corrosión insolubles, compactos y adherentes que constituyen una barrera aislante natural, que posee una alta resistencia a la corrosión [Garcés et. al., 2008].

Sin embargo, no existe una recomendación que considere los límites del comportamiento electroquímico del recubrimiento de zinc como tal, por lo que se considerará la activación e inicio de la corrosión cuando el valor de  $E_{\text{corr}}$  sea igual o menor que  $-450 \text{ mV}$  [Maldonado, 2009] y el valor de  $i_{\text{corr}}$  exceda  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , utilizando como referencia un electrodo SCE. Las Figuras 47 y 48 presentan el seguimiento electroquímico para  $E_{\text{corr}}$  e  $i_{\text{corr}}$  del AG embebido en concreto  $a/c = 0.65$  y  $0.45$ , respectivamente, utilizando los valores antes mencionados como referencia.

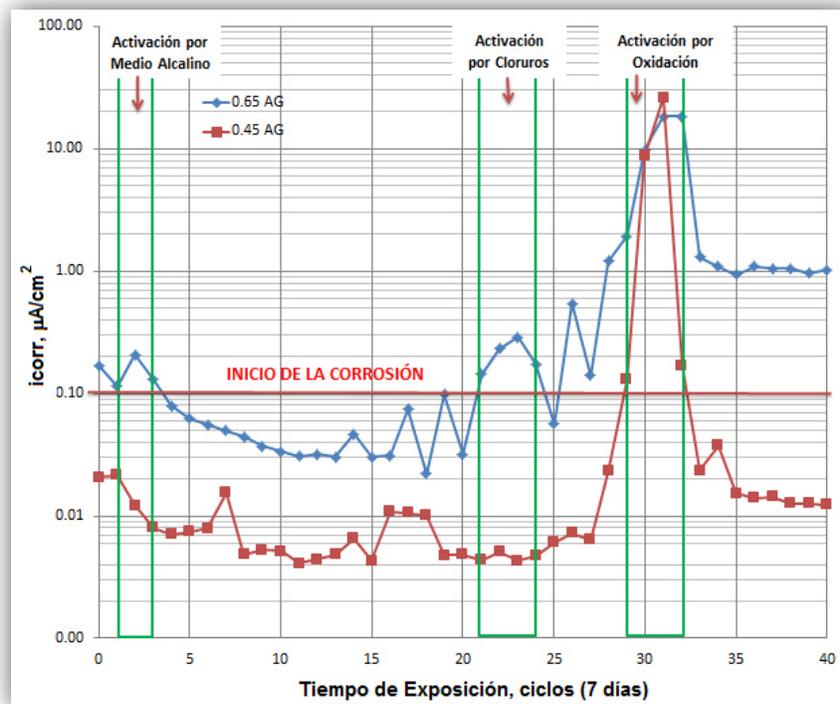


**Figura 47.** Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – AG – a/c = 0.65 y 0.45

En la Figura 47 se puede observar un pico activacional en el ciclo 2 (14 días) de exposición, que se puede explicar como un fenómeno de reacción del zinc al medio básico que lo rodea, tal como se expresa en la Ecuación 11. Posteriormente, las varillas permanecen en estado pasivo dentro de un intervalo de -280 mV a -450 mV, aumentando sus probabilidades de corrosión después de 24 ciclos, con potenciales de -500 mV a -650 mV y una  $i_{corr}$  cercana a  $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , según se puede apreciar en la Figura 48. Dicho comportamiento se puede atribuir a la acción de los cloruros. Finalmente, existe un comportamiento activacional característico del zinc, del ciclo 28 al 31, con potenciales de -800 mV a -1100 mV y hasta  $10.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , que se repasiva debido a una protección por óxidos, como lo muestra la Ecuación 14.

La razón de este fenómeno reside en que el zinc es un material inestable a valores de  $\text{pH} \geq 13.5$ , por lo cual sufrirá una oxidación/corrosión al cabo de un largo periodo de tiempo de exposición bajo dichas condiciones, tal como se cita en la Ecuación 13. Incluso si se observa detenidamente las Figuras 47 y 48, se puede observar el mismo comportamiento

activacional entre los ciclos 28 a 31, con potenciales de -850 mV a -1200 mV e intensidades de corriente superiores a los  $10.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Por eso, en el caso del AG se considerará la activación e inicio de la corrosión debido a cloruros cuando el valor de  $E_{\text{corr}}$  se encuentre en el intervalo de -450 mV a -600 mV y el valor de  $i_{\text{corr}}$  exceda  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , que son parámetros semejantes a lo que han propuesto algunos autores [Maldonado L., 2009] citados en la sección 2.1.3.



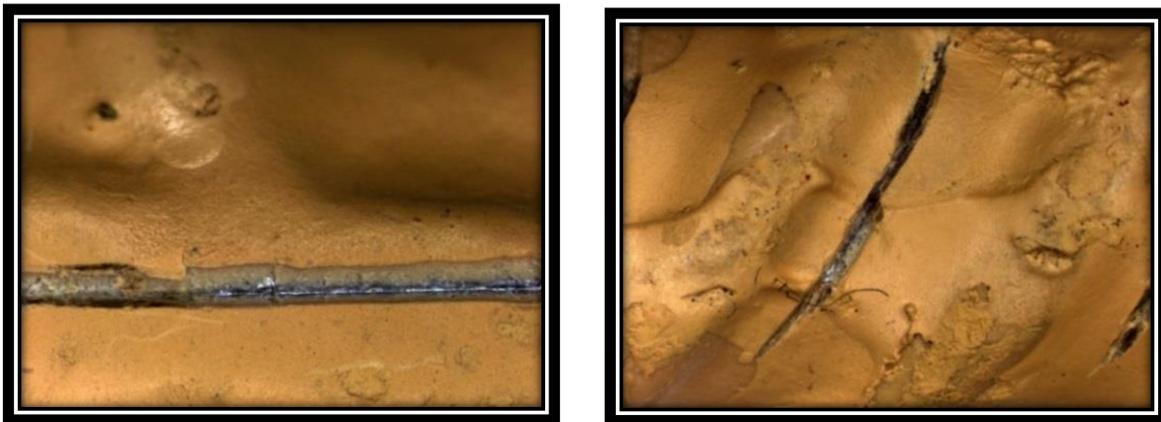
**Figura 48.** Intensidad de corriente ( $i_{\text{corr}}$ ) – AG –  $a/c = 0.65$  y  $0.45$

En la Figura 48 se puede observar que la  $i_{\text{corr}}$  para el sistema AG –  $a/c = 0.65$  siempre es superior a la del sistema AG –  $a/c = 0.45$ , lo que se puede atribuir a una mayor presencia de oxígeno en la interfase concreto-acero, producto de una porosidad capilar más abierta, facilitando de esta manera los procesos electroquímicos. Por otra parte, se deduce que para el sistema AG –  $a/c = 0.45$  el zinc se encuentra protegiendo al acero como ánodo de sacrificio, después del ciclo 31, tal cual debe ser; mientras que para el sistema AG –  $a/c = 0.65$  la acción protectora del óxido de zinc es afectada en gran parte por la acción de los cloruros, que se encuentran actuando en forma de picadura sobre el recubrimiento, acelerando el proceso de corrosión a una intensidad de corriente relativamente estable.

### Acero dual (ADCI)

Como ya se ha mencionado, el acero dual consiste en un núcleo de acero al carbono, seguido por una capa de aleación de zinc aplicada por el método de pulverización térmica o metalización y una capa externa de epóxico aplicada por el método de pulverización electrostática. Cuando el epóxico se encuentra íntegro sobre la superficie del acero de refuerzo, resulta imposible obtener una respuesta eléctrica del metal, debido a la alta resistencia eléctrica del recubrimiento. Por eso se procedió a realizar algunas incisiones sobre la superficie del epóxico, con el propósito de simular el sistema cuando existen defectos de dicho recubrimiento, derivados de su inadecuada manipulación y/o colocación.

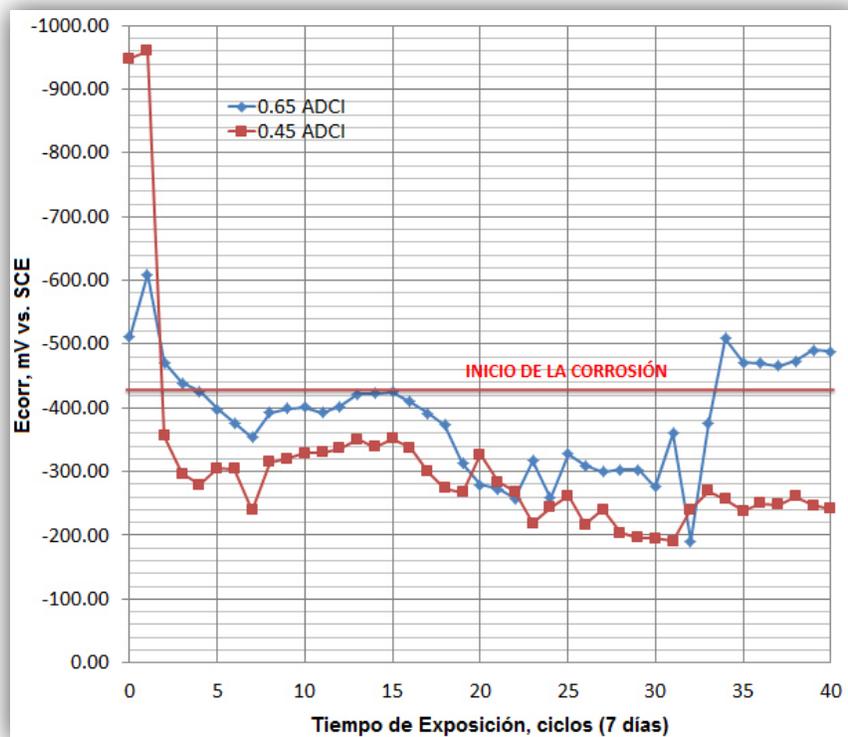
Las incisiones se realizaron de acuerdo con las recomendaciones de ASTM D 3359 y se muestran en la Figura 49, teniendo una profundidad tal, que la capa del galvanizado de zinc quedara expuesta, con el fin de aplicar distintas técnicas electroquímicas y obtener respuesta de los pulsos eléctricos. En las Figuras 50 y 51 se presenta el seguimiento electroquímico para  $E_{corr}$  e  $i_{corr}$  del acero dual con incisión (ADCI), embebido en concreto  $a/c = 0.65$  y  $0.45$ , respectivamente.



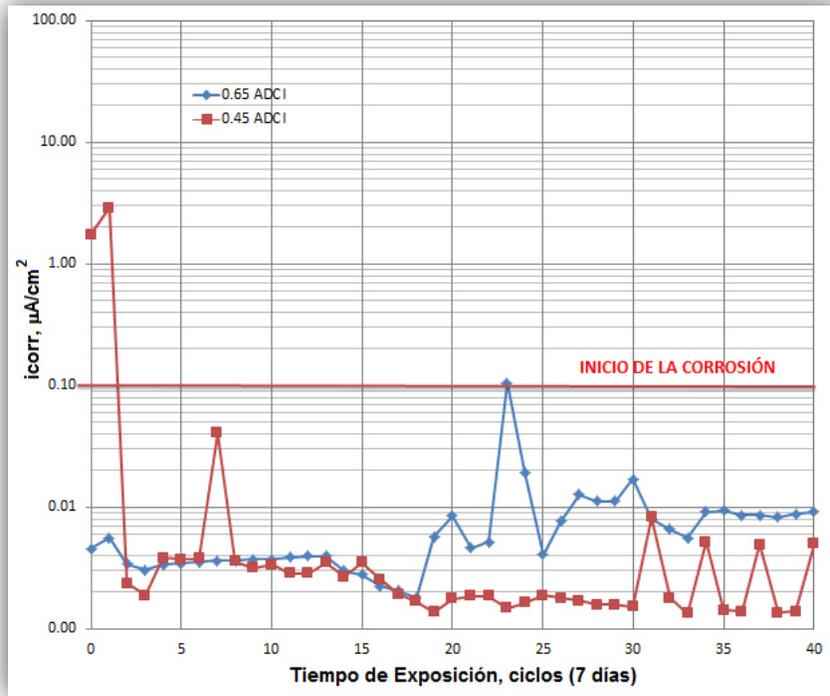
**Figura 49.** Imágenes representativas de incisiones en la superficie de las varillas de acero dual (ADCI).

Al igual que en los sistemas AG, para el sistema ADCI -  $a/c = 0.65$  se observa un pico activacional en el ciclo 2, que se explicó cómo un fenómeno de reacción del zinc al medio básico que lo rodea. Después las varillas permanecen en estado pasivo dentro de un intervalo de  $-300$  mV a  $-450$  mV y una  $i_{\text{corr}} \leq 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , hasta el ciclo 34, momento en el que el potencial supera los  $-450$  mV sin incrementar su intensidad de corriente (Figura 51), por lo que se infiere un estado de protección por óxidos.

Dado que el sistema ADCI -  $a/c = 0.45$  no presenta ningún indicio de activación y permanece pasivo durante toda la exposición, es evidente entonces que se necesita más información para establecer el contenido crítico de cloruros en los sistemas de ADCI, por lo que se recomienda ampliar el periodo de experimentación.



**Figura 50.** Potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) – ADCI –  $a/c = 0.65$  y  $0.45$



**Figura 51.** Intensidad de corriente ( $i_{corr}$ ) – ADCI – a/c = 0.65 y 0.45

#### 4.3.2. Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

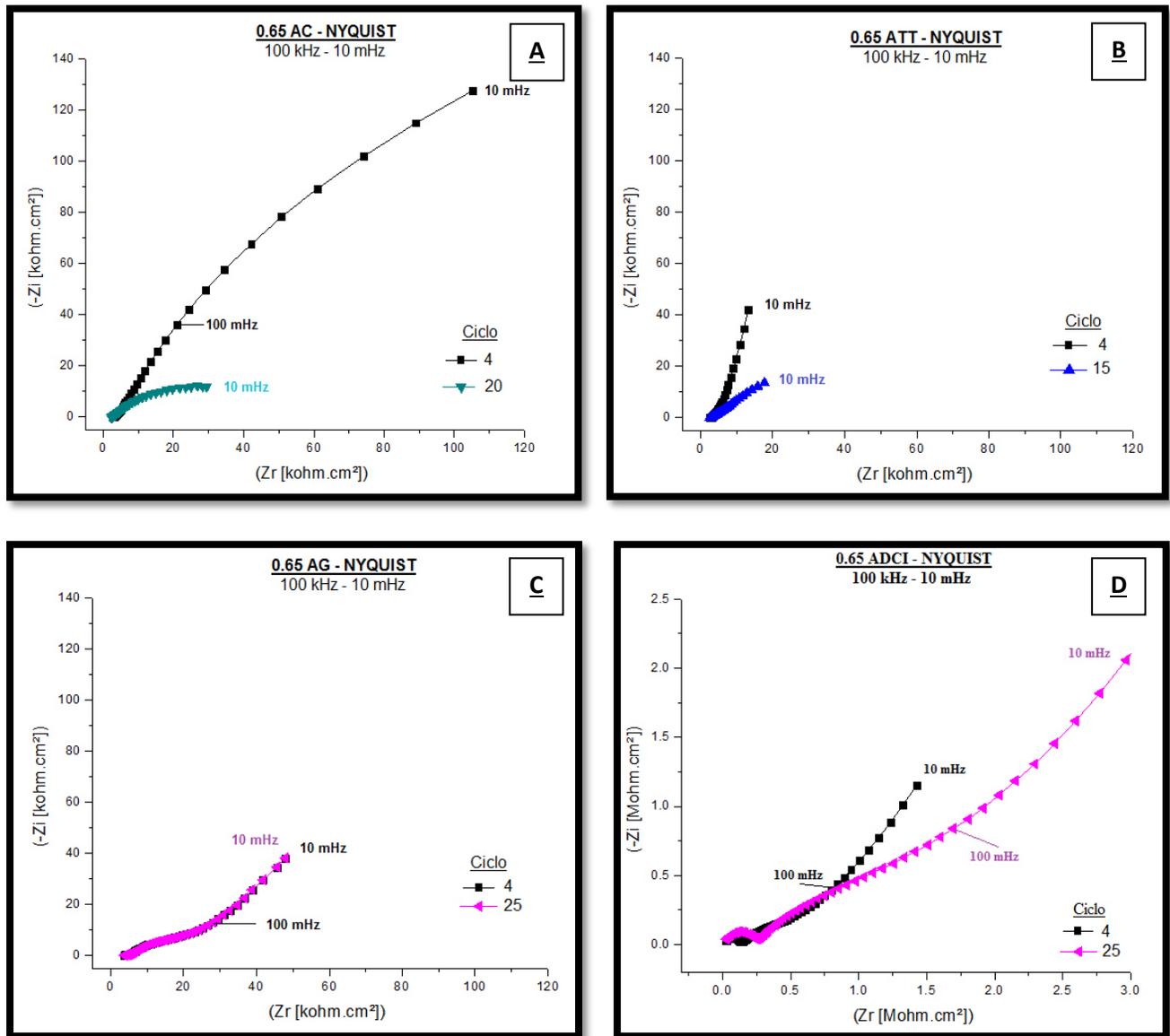
La técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), es una herramienta de gran utilidad para el estudio de procesos de corrosión en concreto reforzado, ya que proporciona medidas de diferentes parámetros, como la resistencia eléctrica del electrolito (concreto), la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ), la resistencia a la polarización ( $R_p$ ), y la capacitancia de doble capa electroquímica ( $C$ ), entre otras, las que ayudan a modelar diferentes procesos electroquímicos. Además, con la correcta interpretación de los diagramas de obtenidos, es posible aproximar los mecanismos de reacción que se llevan a cabo en la interfase acero-concreto y con ello establecer el efecto de los diferentes factores que actúan en la corrosión del acero de refuerzo (presencia de agentes agresivos, presencia de oxígeno, presencia de humedad, procesos de difusión, etc.).

El análisis de resultados para EIS se basó en los datos obtenidos del seguimiento electroquímico de las probetas ya descritas de manera periódica, una vez por ciclo o cada

7 días (3 días en inmersión y 4 días en secado); realizando la medición inmediatamente después del semi-ciclo de inmersión, con la finalidad de disminuir la resistencia o caída óhmica del concreto. Cabe mencionar que a diferencia del potencial de corrosión – Ecorr y la resistencia a la polarización lineal – LRP, que son técnicas de corriente directa, la espectroscopia de impedancia electroquímica – EIS es una técnica de corriente alterna, por lo que requiere una interpretación distinta, apoyándose en los resultados obtenidos por Ecorr y LRP. El análisis fue el siguiente:

- a) Se seleccionaron los sistemas acero-concreto de relación  $a/c= 0.65$  (AC, ATT, AG y ADCI), con sus respectivos ciclos más representativos a diferentes tiempos de exposición, trabajando durante todo el análisis, sólo con la impedancia en modo No-Faradámica.
  - b) Con los resultados de la Impedancia Real ( $Z_r$ ) y la Impedancia Imaginaria ( $Z_i$ ) de cada sistema, se procedió a elaborar los diagramas de Nyquist correspondientes, los que se pueden observar en la Figura 52.
- 1) En los sistemas 0.65 AC y 0.65 ATT, se presentaron los cambios más notables a través del tiempo de exposición de los especímenes, mostrando 2 constantes de tiempo definidas.

Ambos sistemas comenzaron mostrando espectros de impedancia altamente capacitivos (ciclo 4), lo cual es un fenómeno atribuible según [Genescá et. al., 2006], a la formación de una capa porosa de  $\text{Ca(OH)}_2$  en la superficie del acero de refuerzo. Sin embargo, se puede apreciar una clara diferencia en los valores de resistencia y capacitancia en los diagramas de Nyquist para dichos sistemas, donde prácticamente el sistema 0.65 AC triplica los valores de 0.65 ATT. Por lo que se formuló la siguiente conclusión (Figura 52 A y 52 B):



**Figura 52.** Nyquist para sistemas 0.65 concreto – aceros de diferente manufactura.

El acero termotratado tiene una capa de martensita exterior, por lo que tiene un acomodo de celda cristalina más compacto, lo que facilita la transferencia de carga (electrones), haciéndolo más propenso a una despasivación. Este proceso es gobernado por la función de transferencia de carga, que es la relación de la corriente de salida y la corriente de entrada.

Así mismo, una vez que la capa pasiva se ha roto, el modelo propuesto para (AC y ATT) en el que sólo actúa la resistencia del electrolito o concreto ( $R_s$ ), la resistencia de la capa pasiva ( $R_c$ ) y la capacitancia de la propia capa ( $CPE_c$ ), cambiará, agregando la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ), la capacitancia de la doble capa electroquímica ( $C_{edl}$ ) y un coeficiente que gobierna los procesos difusivos o coeficiente de Warburg ( $W$ ). [Genescá et. al., 2006].

Por último, se muestran los mecanismos de reacción ratificados para los sistemas 0.65 AC y 0.65 ATT:

- a) Reacciones de Oxidación (Liberan electrones, volviendo el medio más conductor, por lo que la impedancia decrece).



- b) Reacción de Reducción (Consume electrones, promoviendo el proceso de oxidación).

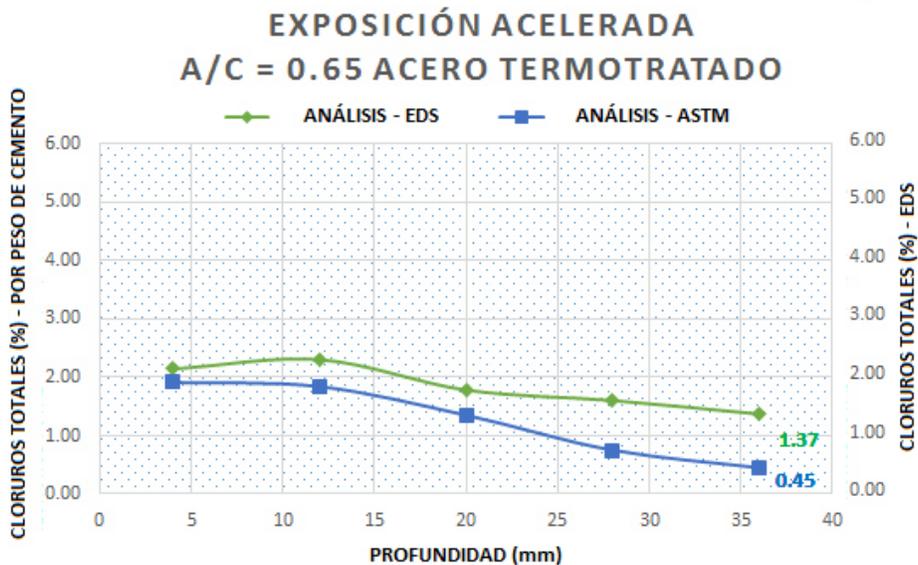
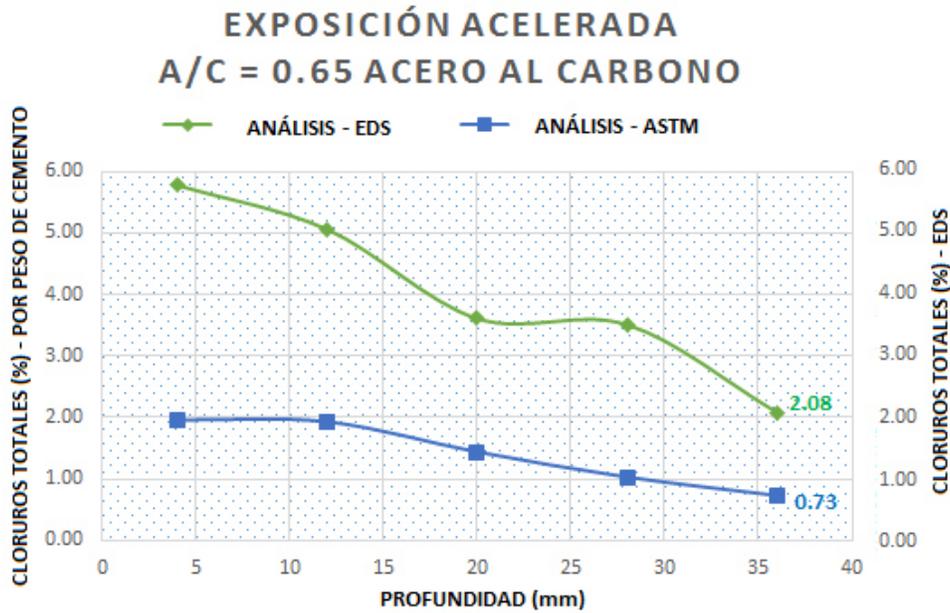


- 2) En los sistemas 0.65 AG y 0.65 ADCI, se identificaron 3 constantes de tiempo (Material metálico, capa de zinc y difusión). Sin embargo, los cambios mostrados no son tan significativos como para formular una hipótesis aún. Lo que se esperaría sería un efecto de esparado, que consiste en que, una vez que los cloruros disuelvan la capa de zinc y reaccionen con el acero al carbono en algún punto, éste se convertirá en cátodo y el zinc en ánodo, aumentando la velocidad de corrosión del proceso, debido a un par galvánico [Scully et. al., 2004].

**Nota:** A partir de esta sección, los resultados son acotados solamente a los sistemas  $a/c = 0.65$ , ya que son los que presentaron un comportamiento electroquímico activacional. Sin embargo, observando los resultados de las lecturas electroquímicas para los sistemas  $a/c = 0.45$ , éstos se mantienen pasivos y se puede esperar un comportamiento electroquímico similar para un periodo de exposición más prolongado.

#### 4.4. Inspección y cuantificación de cloruros en el concreto.

Se realizaron análisis por ASTM C 1218 (%Cl<sup>-</sup> totales por peso de cemento) y por espectroscopía de energía dispersiva de rayos X – EDS (%Cl<sup>-</sup> en las fases de silicato de calcio hidratado - CSH). Los resultados promedio obtenidos para cada sistema a/c = 0.65, por medio de las 2 técnicas se muestran en la Figura 53 y en la Tabla 13.



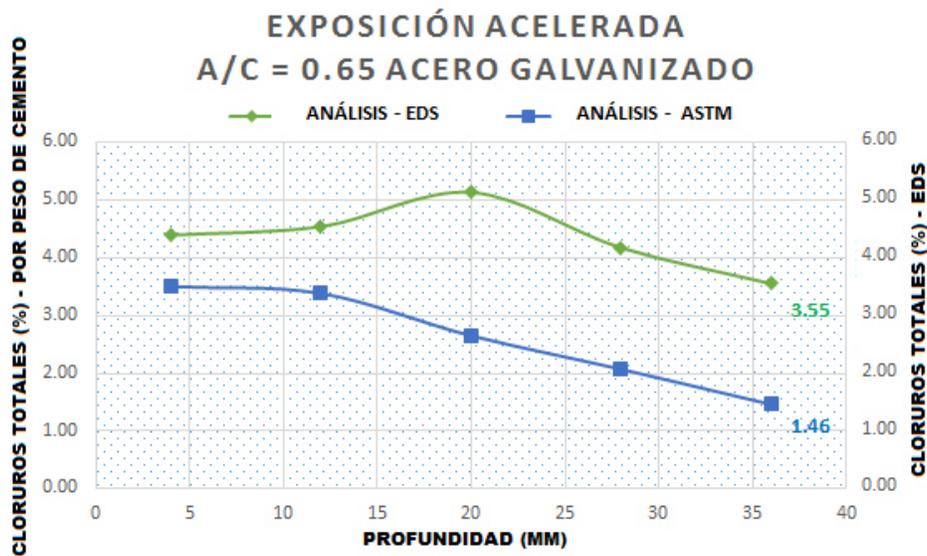


Figura 53. Perfiles de concentración de cloruros ASTM vs. EDS.

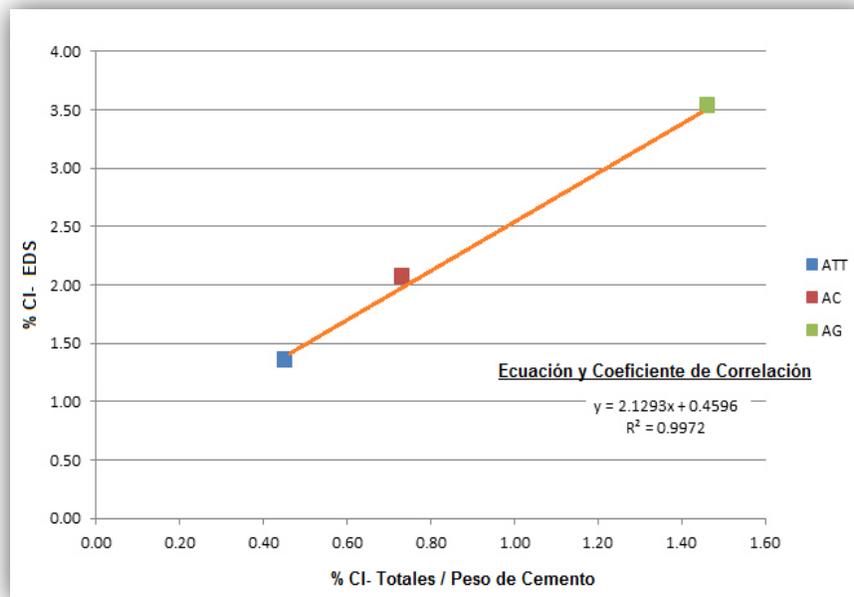
Tabla 13. Resumen de los resultados para % Cl<sup>-</sup> por titulación potenciométrica y EDS obtenidos en la interfase varilla – concreto.

Resumen de resultados a/c = 0.65				
Nomenclatura	Ciclo de extracción	% Cl <sup>-</sup> Totales/ Peso de Cemento	% Cl <sup>-</sup> EDS	
ATT	15 (105 días)	0.45	1.37	
AC	20 (140 días)	0.73	2.08	
AG	25 (175 días)	1.46	3.55	

La cuantificación de cloruros por las dos técnicas se llevó a cabo de forma paralela al momento de detectar la despasivación mediante los parámetros propuestos para las técnicas electroquímicas ya mencionadas, por lo que el ciclo de cuantificación de cloruros resulta evidentemente distinto entre las series. Los valores de concentración de cloruros por ASTM C 1218 resultaron congruentes con lo reportado en la bibliografía bajo condiciones similares de experimentación [Maldonado, 2009 y Alonso et. al., 2000], mientras que los valores de concentraciones por EDS resultaron superiores a los del análisis químico por vía húmeda (sin mantener relación alguna entre las técnicas).

#### 4.5. Correlaciones de valores.

Con la finalidad de establecer una correlación entre los valores obtenidos por la técnica de titulación potenciométrica que recomienda ASTM C 1218 y los valores de concentración obtenidos por la técnica de Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos – X (EDS) siguiendo las recomendaciones de RILEM, se calcularon los porcentajes y coeficientes de correlación de la técnica EDS-SEM, respecto a la titulación potenciométrica. La Figura 54 muestra el gráfico con la ecuación y el coeficiente de correlación.

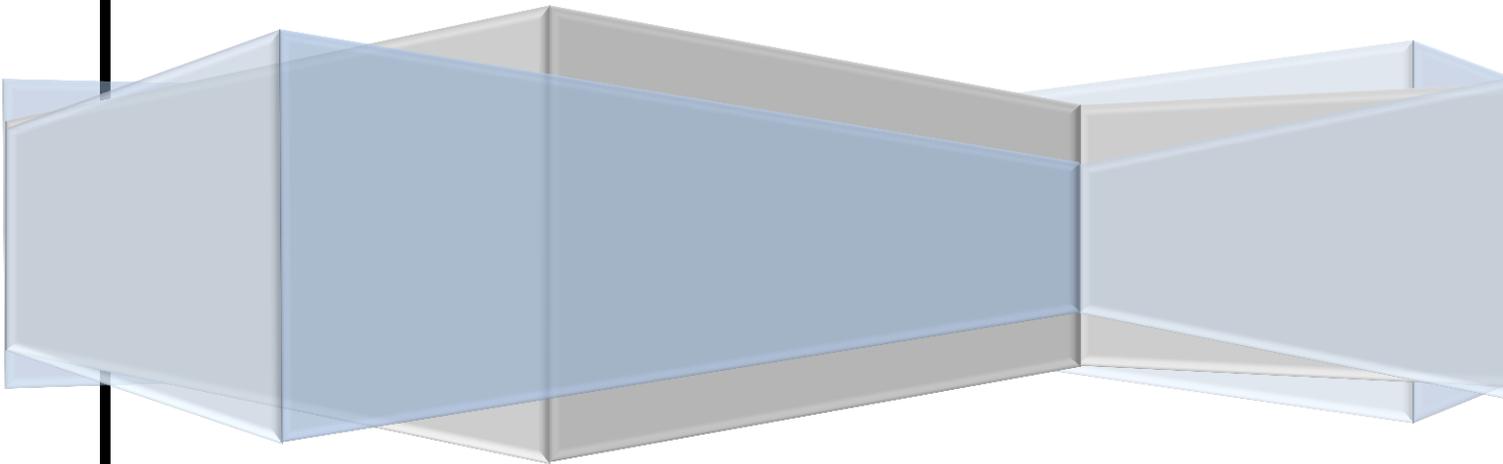


**Figura 54.** Perfiles de concentración de cloruros ASTM vs. EDS para sistemas acero-concreto  $a/c=0.65$ .

Es importante destacar que las concentraciones obtenidas mediante la titulación potenciométrica y la EDS-SEM mantienen una tendencia similar en cuanto a los gradientes de concentración obtenidos, por lo que esta correlación tiene como objetivo principal establecer una equivalencia de valores entre las dos técnicas de cuantificación, las que no son comparables entre sí directamente. Sin embargo, a manera de observación, se citan algunas variables a las que se pueden atribuir las diferencias entre los perfiles de concentración:

1. Cada método cuantifica la cantidad de cloruros presentes en una muestra de concreto respecto a diferentes parámetros. La técnica ASTM C 1218 obtiene un valor de  $\%Cl^-$  respecto a la masa de cemento, mientras que la técnica de EDS-SEM obtiene un valor de  $\%Cl^-$  respecto a un volumen de interacción con los silicatos de calcio hidratados (CSH) de la pasta de cemento.
2. El  $\%Cl^-$  obtenido por la técnica ASTM C 1218 es producto de la media de las concentraciones, en una longitud determinada a diferentes profundidades de la muestra, mientras que el  $\%Cl^-$  obtenido por la técnica de EDS es un valor para una posición particular en la fase CSH, dando lugar a diferencias en las concentraciones del perfil de cloruros. Incluso los valores obtenidos por EDS pueden ser más variables, ya que son más susceptibles a los cambios de concentración en la matriz de cemento.

# CONCLUSIONES



## CONCLUSIONES

1. Se fabricaron 8 sistemas concreto – varilla de refuerzo, utilizando relaciones  $a/c = 0.65$  y  $a/c = 0.45$ , con varillas de acero al carbono, acero termotratado, acero galvanizado y acero de recubrimiento dual zinc-epóxico:
  - a) Para el sistema AC -  $a/c = 0.65$  las varillas permanecen en estado pasivo dentro de un intervalo de  $-90$  mV a  $-150$  mV, activándose a valores de  $-400$  mV a  $-600$  mV, con una densidad de corriente de hasta  $4.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  hacia el ciclo 40 de exposición, requiriendo un %  $\text{Cl}^-$  / Peso de Cemento =  $0.73$  y un %  $\text{Cl}^-$  EDS =  $2.08$ . Mientras que para el sistema AC -  $a/c = 0.45$  las varillas permanecieron en estado pasivo dentro de un intervalo de  $-90$  mV a  $-140$  mV, con una  $i_{\text{corr}} \leq 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  hasta el final del periodo de exposición.
  - b) Para el sistema ATT –  $a/c = 0.65$  las varillas permanecieron en estado pasivo dentro de un intervalo de  $-90$  mV a  $-180$  mV, activándose a valores de  $-300$  mV a  $-550$  mV, con una densidad de corriente de entre  $0.1$  a  $3.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , requiriendo un %  $\text{Cl}^-$  / Peso de Cemento =  $0.45$  y un %  $\text{Cl}^-$  EDS =  $1.37$ . Mientras que para el sistema ATT –  $a/c = 0.45$  las varillas permanecieron en estado pasivo, dentro de un intervalo de  $-70$  mV a  $-110$  mV, con una  $i_{\text{corr}} \leq 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , hasta el ciclo 30 de exposición, momento en el que se activaron, para repasivarse inmediatamente después.
2. Del análisis de la información ya detallada se puede observar que el sistema ATT –  $a/c = 0.65$  requiere un menor CCC para su activación que el sistema AC –  $a/c = 0.65$ , utilizando los mismos parámetros electroquímicos. Sin embargo, la intensidad de corriente ( $i_{\text{corr}}$ ) de ATT siempre es relativamente menor que la de AC; por lo cual, aunque se activa primero, no necesariamente quiere decir que sea menos durable.

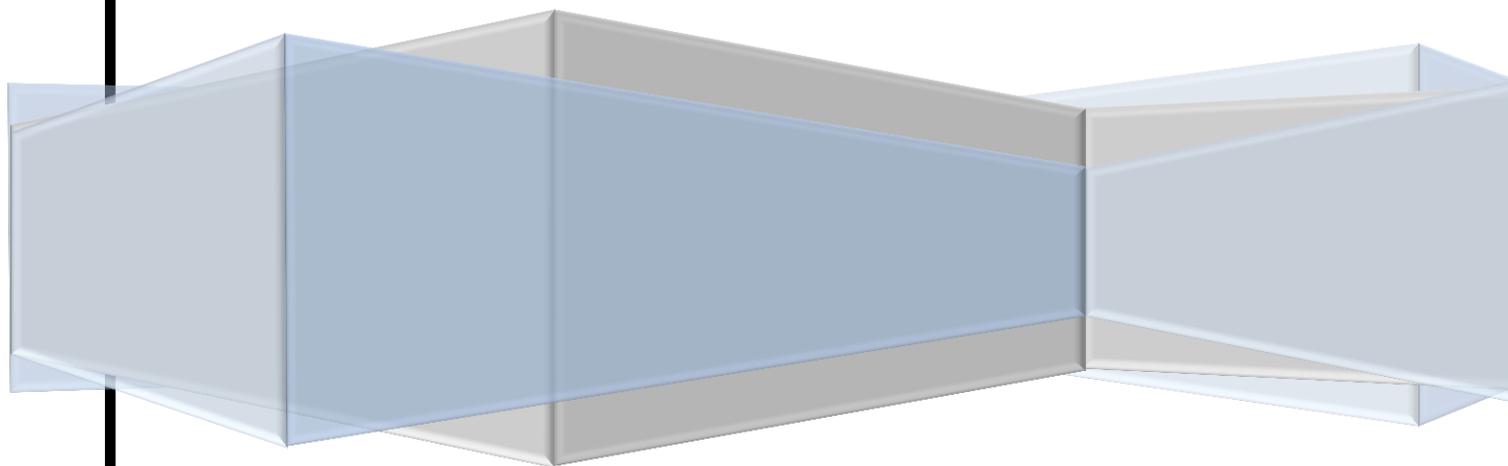
3. De hecho, las gráficas de resumen muestran que la tasa de  $i_{corr}$  de ATT es, en general, hasta un 25% menor que la de AC, lo que se traduce en un incremento de la vida útil de la estructura, sólo por la simple sustitución de una por la otra. Cabe mencionar que los dos tipos de varilla se encuentran disponibles en el mercado y, de hecho, se comercializan sin diferencia alguna. Resulta interesante entonces llevar a cabo una investigación más minuciosa para determinar los beneficios del proceso de templado.
4. Esta disminución en la tasa de la  $i_{corr}$  para ATT, puede atribuirse al incremento en el contenido de Cu, Si, Cr y Ni; los que, en conjunto, pueden elevar notablemente su resistencia a la corrosión, al formar óxidos más estables e incluso inhibir la formación de zonas anódicas, evitando la corrosión por picaduras.
  - c) Para el sistema AG – a/c = 0.65 las varillas permanecen en estado pasivo dentro un intervalo de -280 mV a -350 mV, activándose a valores de -500 mV a -650 mV con una densidad de corriente cercana a 0.5  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , requiriendo un % Cl<sup>-</sup> / Peso de Cemento = 1.46 y un % Cl<sup>-</sup> EDS = 3.55.

Para el sistema AG – a/c = 0.45 las varillas permanecen en estado pasivo, dentro de un intervalo de -280 mV a -380 mV, presentando un comportamiento activacional del zinc con valores de -800 mV a -1100 mV y hasta 10.0  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  del ciclo 28 al 31, debido al medio altamente básico que lo rodea. Este fenómeno también se observó en el sistema AG – a/c = 0.65, en tiempos de exposición similares.
  - d) Los sistemas ADCI – a/c = 0.65 y ADCI – a/c = 0.45 permanecieron en estado pasivo, dentro de un intervalo de valores de -200 mV a -400 mV, con una densidad de corriente  $\leq 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , por lo que no se presentó comportamiento activacional en ninguno de los dos sistemas.
5. Como ya se ha mencionado, la resistencia al ataque de los cloruros se debe al valor más electronegativo del potencial de corrosión del recubrimiento de zinc, el

que actúa como un ánodo de sacrificio, reduciendo la efectividad del mecanismo autocatalítico que tiene lugar en el acero al carbono, por lo que se puede esperar un periodo de vida útil más amplio.

6. El recubrimiento epóxico, adicionalmente, inhibe por completo el proceso de corrosión cuando se encuentra íntegro sobre la superficie de la varilla de refuerzo. Esto se debe a que no permite el intercambio iónico entre las especies de la solución y los electrodos, por lo que no existe una celda electroquímica y, por lo tanto, tampoco un proceso de corrosión. Sin embargo, cuando una pequeña parte de este recubrimiento se encuentra dañado, se puede formar una pequeña escama de herrumbre. Que resulta en un desprendimiento del recubrimiento. A pesar de esto, se puede esperar que la varilla de acero dual tenga el mejor comportamiento en ambientes marinos, ampliando la vida útil de las estructuras de concreto reforzado.
7. Finalmente, los valores de CCC para AC y AG resultaron congruentes con los reportes de otras publicaciones; de 0.4 - 1.0 % y de 1.0 - 1.5 % por peso de cemento para el acero al carbono y el acero galvanizado, respectivamente. Por eso se parte de una base sólida para realizar la correlación de valores, frente a la técnica de espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (EDS-SEM).
8. Los coeficientes de correlación resultantes de la cuantificación de cloruros para los sistemas concreto-acero analizados (AC, ATT, AG -  $a/c = 0.65$ ) se encuentran en un intervalo aproximado de 2.40 a 3.00, con un promedio de 2.77, para los análisis de EDS, en condiciones semicuantitativas respecto a los análisis bajo la normatividad ASTM C 1218.

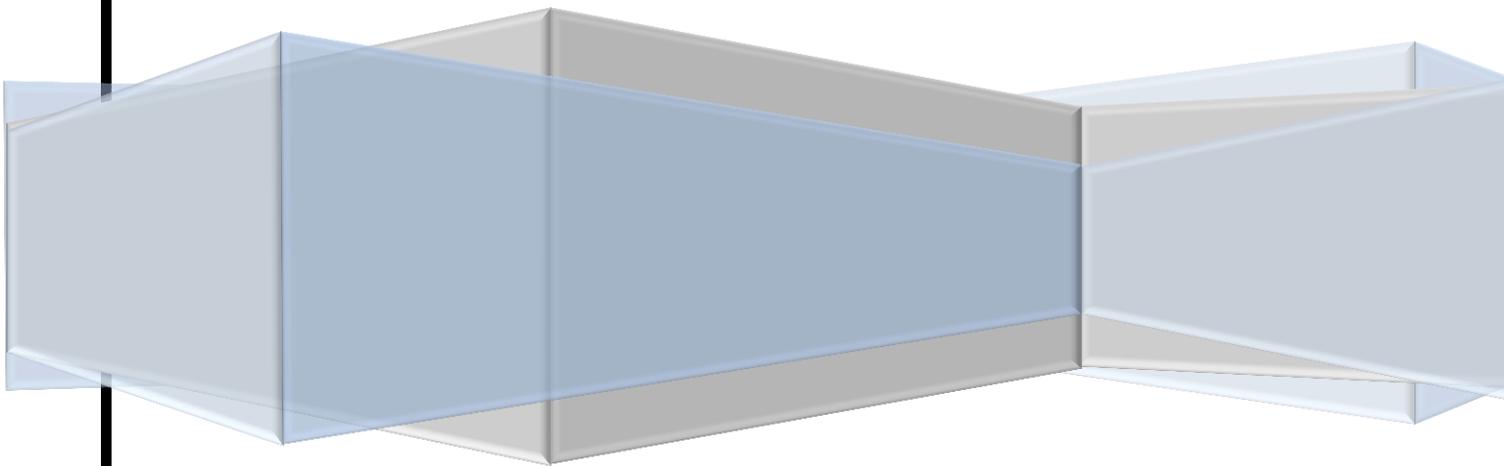
# RECOMENDACIONES



## RECOMENDACIONES

1. Ampliar el periodo de exposición de las probetas para todos los sistemas concreto-acero fabricados, llevando a cabo el seguimiento electroquímico correspondiente, obteniendo, además, una correlación de concentraciones para el contenido crítico de cloruros (CCC), entre los correspondientes sistemas  $a/c = 0.65$  y  $a/c = 0.45$ .
2. Realizar estudios más detallados acerca del comportamiento electroquímico de las varillas de acero termotratado (ATT) y el acero dual con incisión (ADCI), de los cuales, el primero presenta un comportamiento electroquímico de activación-pasivación-activación, y del segundo no se cuenta con suficiente información para estudios de durabilidad.
3. Medir la corriente de la columna de electrones del microscopio electrónico de barrido (SEM) antes, durante y después de cada medida de concentraciones por análisis de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS), mediante el uso de una celda de Faraday y un picoamperímetro digital, además de utilizar estándares de referencia, correlacionando el contenido de un elemento a la corriente de la columna de electrones para realizar una calibración, obteniendo el valor exacto del contenido de cada elemento sobre el espécimen.

# REFERENCIAS



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- ACI-318-08, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary".
- Accardi A., (2010), "Corrosión del acero de refuerzo con doble recubrimiento a través del rompimiento del polímero simulando la solución de poro del concreto", Tesis para Maestro en Ciencias e Ingeniería Mecánica, Universidad del Sur de Florida.
- Aguilar J.F., Martínez D.I., Fajardo G., (2006) "Estudio de corrosión de varillas de alta resistencia obtenidas por el proceso tempcore® embebidas en concreto, II Congreso Nacional ALCONPAT, México.
- Alonso C., Andrade C., Castellote M., Castro P. (2000), "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar", Cement and Concrete Research, Vol. 30, Págs. 1047 - 1055.
- Andrade C., Alonso C, Molina F.J., "Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part II – Numerical Model", Materials and Structures, Vol. 26, Págs. 532-548.
- American Concrete Institute Committee ACI-201.
- American Concrete Institute Committee ACI-365.
- Arellano J., Aguilar F., Martínez D.I., Fajardo G., (2006), "Estudio de corrosión de varillas de alta resistencia obtenidas por el proceso tempcore® embebidas en concreto". En memorias del II Congreso Nacional ALCONPAT, Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. ISBN 968-9031-14-7. Tampico, Tamaulipas, México.
- ASTM-A-615 "Especificación Normalizada para Barras de Acero al Carbono Lisas y Corrugadas para refuerzo de Concreto".
- ASTM-A-775 "Standard Specification for Epoxy- Coated Steel Reinforcing Bars".
- ASTM-A-1055 "Standard Specification for Zinc and Epoxy Dual Coated Reinforcing Bars".
- ASTM-B-833 "Standard Specification for Zinc and Zinc Alloy Wire for Thermal Spraying (Metallizing)".
- ASTM-C-29 "Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate".
- ASTM-C-31 "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field".

- ASTM-C-33 “Standard Specification for Concrete Aggregates”.
- ASTM-C-39 “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.
- ASTM-C-114 “Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement”.
- ASTM-A-123 “Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products”.
- ASTM-C-127 “Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM-C-128 “Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM-C-138 “Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete”.
- ASTM-C-143 “Standard Test Method for Slump of Hydraulic – Cement Concrete”.
- ASTM-C-231 “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method”.
- ASTM-C-469 “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”.
- ASTM-C-702 “Practice for Reducing Samples of Aggregate of Testing Size”.
- ASTM-C-876 “Standard Test Method for Half-Cell Potentials of uncoated reinforcing steel in concrete”.
- ASTM-C-1064 “Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic – Cement Concrete”.
- ASTM-C-1202 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.
- ASTM-D-75 “Practice for Sampling Aggregates”.
- ASTM-D-3359 “Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test”.
- ASTM-E-8 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”.
- ASTM-E-384 “Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials”.
- ASTM-E-415 “Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.

- ASTM-E-1019 “Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques”.
- ASTM-G1 “Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens”.
- ASTM-G-59 “Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements”.
- Belaïd F., Arliguie G., François R. (2001) "Porous structure of the ITZ around galvanized and ordinary steel reinforcements ". Cement and Concrete Research, Vol. 31, n°11, pp. 1561-1566.
- Benture S., Diamond N.S., Berke, (1997), “Steel corrosion in concrete, fundamentals and civil engineering practice”, Ed. Taylor & Francis.
- Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R., (2004) “Corrosion of steel in concrete”, Wiley-VHC, Weinheim. Belaïd F., Arliguie G., François R. (2001) "Porous structure of the ITZ around galvanized and ordinary steel reinforcements ". Cement and Concrete Research, Vol. 31, n°11, pp. 1561-1566.
- Callister Jr. W.D., (2007) “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, Ed. Reverté.
- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero – CANACERO (2014) [www.canacero.org.mx](http://www.canacero.org.mx)
- Castro P. (2001), "Corrosión en Estructuras de Concreto Armado", 2ª edición IMCYC A.C., México, D.F.
- Castro P., (2011) “Use of Primers as a Concrete Repair Method in Corroded Columns of Buildings Exposed to a Tropical Marine Environment – Influence on Adjacent Zones”, Corrosion NACE International, Vol. 67, No.9, Págs. 1-8.
- Chang R., (2007) “Química”, 9a. Edición, Capítulo 6, Mc. Graw Hill.
- Concrete Reinforcing Steel Institute, CRSI.
- Cottis R., Turgoose S., (1999) “Electrochemical Impedance and Noise”, NACE International.
- Dhir R.K., Byars E.A., “PFA Concrete: Chloride diffusion rates”, Magazine of Concrete Research, Vol. 45, No.162, Págs. 1-9.

- Escobar A., (2012) “Efecto del uso de ceniza volante en el proceso de agrietamiento del concreto por corrosión del acero de refuerzo”, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Fajardo G., P. Valdez, J. Pacheco J. (2008), “Corrosion of steel rebar in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides”, *Construction & Building Materials*, 23, N° 2, pp. 768-774, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.02.023, ISSN: 0950-0618.
- Federal Highway Administration U.S. – FHWA (2002) [www.fhwa.dot.gov](http://www.fhwa.dot.gov)
- Funashi M., (1990) “Predicting corrosion-free service life of a concrete structure in chloride environment”, *ACI Materials Journal*, 581.
- Gale W.F., Totemeir T.C., (2004) “Smithells Metals Reference Book”, 8th Edition, Chapter 22.
- Garcés P., Climent M.A., Zornoza E., (2008) “Corrosión de armaduras es estructuras de hormigón armado”, 1ª. Edición, Editorial Club Universitario ECU.
- Genescá J., (2003) “Técnicas Electroquímicas para el control y estudio de la corrosión”, Universidad Nacional Autónoma de México.
- González J.A., Ramirez E., Bautista A., Feliu S., (1996) “The behavior of pre-rusted steel in concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.26, Issue 3, Págs. 501-511.
- Gouda V.K., Halaka W.Y., (1970), *Corrosion and corrosion inhibition of reinforced steel*, Br. Corrosion J-5, Págs. 204-208.
- Gu P., Beaudoin J.J., Zhang M.H., Malhotra V.M., (2000) “Performance or reinforcing steel in concrete containing silica fume and blast furnace slag ponded with sodium chloride solution”, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, Págs. 254-262.
- Hansson C.M., Sorensen B., (1988), “The threshold concentration of chloride in concrete for initiation of reinforcement corrosion”, in N. Berke, V. Whiting D., Whiting (Eds.), *Corrosion rates of steel in concrete*, ASTM Spec Tech Publ 1065, Págs. 3-16.
- Hausmann D.A., (1967), “Steel corrosion in concrete. How does it occur?” *J. Mater Prot.* 19-23.
- Haynes G., (1992) “Review of laboratory corrosion tests and standards”, In: Baobian R., Dean S.W. editors. *Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume*, ASTM STP 1000. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, Págs. 281-289.

- Hernández D., (2013) "Caracterización electroquímica de varillas de refuerzo con diferente acabado superficial expuestas en soluciones sintéticas de poro", Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana, México.
- Hernández O., Mendoza C.J., (2006) "Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico", Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. VII, No.1, Págs. 57-70.
- The International Federation for Structural Concrete (CEB/FIP).
- Hussain S.E., Rasheeduzzafar S.E., Al-Musallam A., Al-Gahtani A.S., (1995), "Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete, Cement and Concrete Research No.25, Págs. 1543-1555.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2007.
- J. Pacheco, O. Copuroglu, B. Savija, E. Schlangen, R.B. Polder, (2012) "Assessment of critical chloride content in reinforced concrete by Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) revisited", Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III.
- Kelly R.G., Scully J.R., Shoesmith D., Bucheit R., (2004) "Electrochemical Technique in Corrosion Science and Engineering".
- Liu Y., Weyers R.E., (1996), "Time to cracking for chloride-induced corrosion in reinforced concrete", in: C.L. Page P.B. Bamforth, J.W. Figg (Eds.), Corrosion of reinforcement in Concrete Construction, The Royal Society of Chemistry, London, 88.
- Maldonado L., (2009) "Chloride threshold for corrosion of galvanized reinforcement in concrete exposed in the Mexican Caribbean", Materials and corrosion Vol.60, No.7, Págs. 536-539.
- Mamlouk M.S., Zaniewski J.P., (2006) "Materials for Civil and Construction Engineers", 2ª. Edición, Ed. Pearson Prentice Hall.
- Manual DURAR, (1997), "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", CYTED, Red Temática XV.B – Durabilidad de Hormigón, España.
- Maruya T., Hsu K., Takeda H., Tangtermsirikul S., (2003) "Numerical modeling of steel corrosion in concrete structures due to chloride ion, oxygen and water movement", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, Pag. 147-160.
- McCormac J.C., Brown R.H., (2011) "Diseño de concreto reforzado", 8ª. Edición Ed. Alfaomega.
- McCuen R.H., Albrecht P., Cheng J.G., (1992) "New approach to power model regression of corrosion penetration data", Corrosion forms and control for

- infrastructure, ASTM STP 1137, Victor Chaker Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Págs. 46-76.
- Menezes N.R., Arai T., (1991) "ASM Handbook – Heat Treating", Volume 4, ASM International.
  - Mehmood T. et al. (2001), "Corrosion behavior of concrete reinforcing bars from different manufacturing technologies: a comparative study". Corrosion/2001, Paper No.01640, NACE International, Houston, Texas.
  - Metha P.K., Monteiro P.J.M., (1993) "Concrete; Structure, properties, and materials", 2<sup>a</sup> Edición, Prentice Hall.
  - Metha P.K., Kumar, Walters M., (2008) "Roadmap to a Sustainable Concrete Construction Industry", The Construction Specifier, Vol.61, No.1, Págs. 48-57.
  - Metha P.K., Kumar, (2009) "Global Concrete Industry Sustainability, Tools for moving forward to cut carbon emissions", ACI-Concrete International.
  - Molina B.O., (2008) "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España.
  - Moreno P.E., (2005) "Comportamiento electroquímico del acero embebido en concreto", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México.
  - Neville A.M., Brooks J.J., (1998) "Tecnología del concreto", Ed. Trillas.
  - N.B. Winter "Scanning Electron Microscopy of Cement and Concrete" First edition, WHD Microanalysis Consultants Ltd (2012).
  - NMX-C-407 "Industria de la construcción – Varilla corrugada de acero proveniente de lingote y palanquilla para refuerzo de concreto – Especificaciones y Métodos de Prueba".
  - Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) – [www.oecd.org](http://www.oecd.org)
  - Pacheco J., (2008), "Evaluación de la vida útil de morteros con puzolana natural expuestos a cloruros y carbonatación", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
  - Pacheco J., Copuroglu O., Polder R.B., (2013), "Optimization of chloride quantification in cementitious mortars using Energy Dispersive X-Ray Analysis". Proceedings of the thirty fifth conferences on cement microscopy, USA, Págs. 49-62.
  - Pettersson K., (1992), "Corrosion threshold value and corrosion rate in reinforced concrete", CBI Report 2:92, Stockholm, Sweden.

- Pettersson K.H., (1994) Chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced concrete, in R.N. Swamy (Ed.), Proceedings of the international conference on corrosion and protection of steel in concrete. Academic Press, Sheffield, 461.
- Pettersson K.H., (1996) "Factors influencing chloride induced corrosion of reinforcement in concrete", in C. Sjöström (Ed.), Durability of Building Materials and Components, Vol.1, Chapman & Hall, London, Págs. 334-341.
- Portland Cement Association, Kosmatka S.H., Kerkhoff B., Panarese W.C., Tanesi J., "Diseño y Control de Mezclas de Concreto" (2006).
- Pourbaix M., (1987) "Lectures on Electrochemical Corrosion", Green, J.A.S., Trans.; Plenum: New York, 115.
- Rasheeduzzafar S. S., Dakil F.H., Al-Gahtani A.S., (1984) "Deterioration of concrete structures in the environment of the Middle East", ACI Journal, Vol. 81, No.13.
- Rasheeduzzafar S.S., Dakhil F.H., Bader M.A., Khan M.M., (1992), "Performance of corrosion resisting steel in chloride-bearing concrete", ACI Materials Journal, Vol. 89 (5), Págs. 439-448.
- Roper H., (1982) "Reinforcement for concrete structures subject to fatigue", International Assoc. for Bridge and Structural Engineering, Págs. 239-245.
- Sánchez M., (2004) "Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento", Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, España.
- Schiessl P., Breit W., (1996) "Local repair measures at concrete structures damaged by reinforcement corrosion, Proceedings of the fourth international symposium on corrosion of reinforcement in concrete construction, SCI, Cambridge, Págs. 525-534.
- Scully J.R., (2004) "Electrochemical Impedance (Analysis and Interpretation)".
- Shahzma J.J., Hansson C.M., (2009) "Chloride-induced corrosion products of steel in cracked concrete subjected to different loading conditions", Cement and Concrete Research, Vol. 39, Págs. 116-125.
- Shi X., Xie N., Fortune K., Gong J. (2012) "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview", Construction and Building Materials, Vol. 30, Págs. 125 -138.
- Simon P., Economopoulos M., (1984) "Tempcore: A new process for the production of high-quality reinforcing bars". Steel Branch, Centre de Recherché Metallurgiques (C.R.M.), Liege, Belgium.

- Smith W.F., Hashemi J., (2006) "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales", 4ª. Edición, Ed. Mc. Graw Hill.
- Stanish K., Hooton R.D., Thomas M.D.A., (2004) "A novel method for describing chloride ion transport due an electric gradient in concrete: Part 2. Experimental Study", Cement and Concrete Research, Vol.34, Págs. 51-57.
- Stern M., Geary A.L., (1957) "Electrochemical polarization: Theoretical analysis of the shape of polarization curves", Electrochemical Society Journal, Vol.104, Issue 1, Págs. 56-63.
- Sygula S., Riz K., (1984) "Longitudinal cracking and its relation to service life or reinforced concrete bridges", in proceedings of ACI-RILEM International Symposium on Long-Term observation of concrete structures, Budapest, Págs. 182-192.
- The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- The American Section of the International Association for Testing Materials, ASTM-E-632.
- Thomas M.D.A, Matthews J.D., Haynes C.A., (1990), "Chloride diffusion and reinforcement corrosion in marine exposed concretes containing PFA, Corrosion of reinforcement in concrete, Elsevier, Warwickshire, UK, Págs. 198-212.
- Thomas M., (1996), "Chloride thresholds in marine concrete, Cement and Concrete Research 26 Págs. 525-539.
- UNE 61-033-75 "Densidad Aparente, Absorción de Agua y Porosidad Abierta".
- Uzal B., Turanlı L., Metha P, Kumar, (2007) "High Volume Natural Pozzolan Concrete for Structural Applications", ACI Materials Journal, Págs. 535-538.
- Vaca C.E., Lorenzo A.M., (1998), "Adhesion testing of epoxy coating".
- Vagn N.P., (2008) Non-destructive electrochemical monitoring of reinforcement corrosion, Thesis, Technical University of Denmark.
- Weyers R.E., (1998) "Service life model for concrete structures in chloride laden environments", ACI Materials Journal, Vol. 95(4), Págs. 445-453.
- Wheat H.G y Deshpande P.G. (2001), "Alternative reinforcement materials for concrete-a state or the art review", CORROSION /2001, Paper N° 01652, NACE International, Houston, Texas.
- Won S.H., (2007) "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A review", Electrochemical Science Journal, Vol.2, Págs. 1-28.
- World Steel Association (2013) [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org)

- Yadav A.P., Katayama H., Noda K., Masuda H., Nishikata A., Tsuru T., (2007) "Effect of Fe-Zn alloy layer on the corrosion resistance of galvanized steel in chloride containing environments", Corrosion Science Vol. 49, Págs. 3716-3731.
- Yeomans S.R., (2004), "Galvanized steel reinforcement in concrete: An overview", Elsevier, Australia.
- Zoubir L., (2006) "Uncertainty Modeling of Chloride Contamination and Corrosion of Concrete Bridges", Chapter 22.

---

---

## **ING. RICARDO ADRIÁN MARTÍNEZ GARCÍA**

---

---



### **Contacto**

[ricardo.margar@hotmail.com](mailto:ricardo.margar@hotmail.com)

### **FORMACIÓN ACADÉMICA**

- **ESTUDIOS DE POSGRADO** **2012 a 2014**  
Facultad de Ingeniería Civil, UANL. San Nicolás de los Garza, N.L., México  
- Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.
- **ESTUDIOS PROFESIONALES** **2007 a 2011**  
Facultad de Ingeniería Civil, UANL. San Nicolás de los Garza, N.L., México  
- Título obtenido: Ingeniero Civil.

### **EXPERIENCIA DOCENTE**

- Enero - 2009 / Diciembre - 2011** **San Nicolás de los Garza, N.L., México**  
Instructor – revisor de prácticas parciales y generales de topografía (FIC-UANL).
- Enero - 2015 / Marzo - 2016** **Monterrey, N.L., México**  
Profesor de asignatura – diseño de concreto reforzado, tecnología del concreto y geotecnia.  
(Universidad del Valle de México – Campus Cumbres Monterrey, Nuevo León).

## ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN

**Afiliación Actual** **San Nicolás de los Garza, N.L., México**

Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, AV. Universidad S/N, CD. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.

**Julio – 2012** **San Nicolás de los Garza, N.L., México**

Curso de Corrosión y Protección de Estructuras Metálicas.

**Agosto – 2012** **Cancún, Quintana Roo, México**

Simposium XXI International Materials Research Congress 2012.

**Octubre – 2012** **San Nicolás de los Garza, N.L., México**

Ciclos de Seminarios de Investigación Agosto – Diciembre 2012.

**Octubre – 2012** **Boca del Río, Veracruz, México**

Ciclos de Seminarios de Corrosión y Protección 2012.

**Abril – 2013** **Colima, Morelos, Chihuahua, Distrito Federal - México**

14<sup>a</sup>. Feria de Posgrados CONACYT.

**Junio / Julio – 2013** **Delft, Netherlands**

Estancia Académica de Investigación.

**Julio – 2013** **Delft, Netherlands**

VI International PhD Student Workshop.

**Septiembre / Octubre – 2013** **Boca del Río, Veracruz, México**

Estancia Académica de Investigación.

**Octubre – 2013** **Boca del Río, Veracruz, México**

Ciclos de Seminarios de Corrosión y Protección 2013.

**Octubre – 2013**

**Boca del Río, Veracruz, México**

4<sup>a</sup>. Reunión de la Red Temática PROMEP.

**Mayo – 2014**

**Boca del Río, Veracruz, México**

Estancia Académica de Investigación.

**Mayo – 2014**

**Boca del Río, Veracruz, México**

Ciclos de Conferencias en Corrosión y Protección 2014.

**Mayo – 2014**

**Boca del Río, Veracruz, México**

7<sup>ma</sup>. Reunión de la Red Temática PROMEP.

**Octubre – 2014**

**Cancún, Quintana Roo, México**

226 th. Meeting of The Electrochemical Society, XXIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica and 7 th. Meeting of Mexico Section of The Electrochemical Society.

**Noviembre – 2014**

**Monterrey, Nuevo León, México**

VI Congreso ALCONPAT “Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción”.

## PERFIL LABORAL

**Julio - 2014 / Junio - 2016**

**Monterrey, N.L., México**

Empresa: Edificación y Desarrollo Inmobiliario Coyer S.A. de C.V.

Actividades Principales:

- Control y supervisión de obras de urbanización: terracerías, revestimientos, carpeta asfáltica, agua potable, drenaje sanitario, drenaje pluvial y obra civil para instalaciones de gas.
- Control y supervisión de obra civil: terracerías, estructuras de concreto reforzado y estructuras de acero.