CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.
POSGRADO

EVALUACIÓN DE MACROCELDAS DE CORROSIÓN EN VIGAS DE CONCRETO REFORZADO BAJO AMBIENTE SALINO

Tesis que como Requisito para obtener el Grado Doctor en Ciencias de Materiales presenta:

Alumno:

M.I. José Luis Pérez Díaz

Director de Tesis:

Dra. Citlalli Gaona Tiburcio

Chihuahua, Chihuahua; febrero del 2008

Agradecimientos:

Mi agradecimiento extensivo a las instituciones y todas aquellas personas que me orientaron, confiaron en mi desempeño, colocando los recursos técnicos, económicos y humanos que se necesitaron en este trabajo de investigación:

- ✓ **CONACYT**
- ✓ **CIMAV**
- ✓ **A mi Director y Asesor**

Dra. Citlalli Gaona Tiburcio, Dr. Facundo Almeraya Calderón, todo mi agradecimiento por su valiosa aportación para este trabajo de investigación.

- ✓ **A mis sinodales**

Dr. Alberto Martínez Villafañe, Dr. José Chacón Nava, Dr. José Castañeda Ávila, Dr. José Mora Ruacho. Por su valiosa crítica en la revisión de este trabajo.

- ✓ **Compañeros y amigos**

Adán Borunda, Carlos Barrios, Jorge García, Leonel López, Francisco Estupiñan, Ubaldo Arce, Ángel Cabral, Javier Olguín, Miguel Ángel Baltazar, Víctor Orozco, Erick Maldonado, Javier Neri, Elba Rosa Núñez, Miriam Terrazas, Daniela Luján, Marisol Andazola, por el apoyo y amistad durante mi estancia en el Posgrado.

- ✓ **A mis padres y hermanos**

Mis padres Sr. Valentín Pérez (finado), Sra. Olga Díaz, y mis hermanos: Rosy, José E. Arias (cuñado), Abigail, Romeo, Rosendo, Israel, y todos mis sobrinos (Lupita, Olga, Germán, Mariel, Giselle, Belinda, Diego, Ángel). Así también para mis hermanos fallecidos: Lesbia y Oscar. Y con mucho cariño a un angelito: Mariana. A todos mi amor y aprecio incondicional por ser parte de la fuerza interna que me guía cada día.

- ✓ **A Dios principalmente**

Por los misterios de la vida, por mantener mi fe siempre viva en momentos de aciertos y errores fruto de mi condición humana, por siempre Gracias. Así mismo por ponerme en camino de la ciencia y haber despertado en mi otra historia más para la mente.

PENSAMIENTOS:

"La mayor parte de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas, y por regla general pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos".

"El científico encuentra su recompensa en lo que Henri Poincaré llama el placer de la comprensión, y no en las posibilidades de aplicación que cualquier descubrimiento pueda conllevar".

Albert Einstein (1879-1955)

INDICE GENERAL

NUMERO
PÁGINA

Índice General **I**
Lista de Figuras **IV**
Lista de Tablas **IX**
Objetivo Principal **XI**
Hipótesis **XI**
Resumen **XII**
Abstract **XIII**

Introducción
I.1 Generalidades..... 1
I.2 Problemática de la corrosión en estructuras de Concreto Reforzado..... 1
I.3 El problema de la durabilidad.....3
I.4 El problema de la corrosión en infraestructura civil..... 6
I.5 Técnicas de estudio.....8

Capítulo 1
Corrosión en estructuras de concreto reforzado
1.1 Sistema acero-concreto..... 11
1.1.1 Concreto..... 11
1.1.1.1 Cemento hidráulico
1.1.1.2 Cemento Pórtland
1.1.1.3 Agregados
1.1.2 Acero de refuerzo..... 15
1.1.2.1 Aceros al carbono
1.1.2.2 Aceros Inoxidables austeníticos
1.2 Durabilidad de estructuras de concreto reforzado..... 17
1.2.1 Tipos de ambientes..... 18
1.2.1.1 Medio Rural y Urbano Industrial
1.2.1.2 Medio Marino
1.3 Mecanismos de deterioro por corrosión en estructuras de concreto reforzado.....21
1.3.1 Carbonatación..... 22
1.3.1.1 Mecanismos de carbonatación
1.3.2 Sulfatos..... 23

1.3.2.1 Mecanismo de ataque por sulfatos
1.3.3 Cloruros……24
1.3.3.1 Corrosión del acero de refuerzo inducida por cloruros
1.3.3.2 Mecanismo de corrosión por iones cloruros (Cl^-)
1.4 Sistema de sensores……27
1.4.1 Tipos de sensores
1.4.2 Sistemas Galvánicos…… .27
1.4.2.1 Corrosión Galvánica
1.4.2.2 Mecanismo de corrosión Galvánica
1.4.2.3 Macroceldas de corrosión…… 29
1.5 Técnicas Electroquímicas……31
1.5.1 Potenciales de Corrosión (E_{corr})……31
1.5.2 Ruido Electroquímico (R_n)…… 33
1.5.2.1 Definición (R_n)
1.5.2.2 Características del Ruido Electroquímico (R_n)
1.5.2.3 Clasificación de Ruido Electroquímico (R_n)
1.5.2.4 Métodos de análisis: visual, estadístico y de frecuencia. 35

Capítulo 2
Metodología Experimental

2.1 Nomenclatura de especímenes……40
2.2 Materiales para el diseño de vigas…… 41
2.2.1 Diseño de mezclas para el concreto
2.2.2 Cemento
2.3 Sensores de corrosión……43
2.3.1 Diseño de macroceldas
2.3.2 Ánodo
2.3.3 Cátodo
2.3.4 Acero de Referencia
2.4 Elaboración de vigas armadas con sensores……45
2.4.1 Armadura y sensores
2.4.2 Colado de vigas
2.5 Recubrimientos……48
2.6 Curado……49
2.7 Electrolitos……49
2.8 Procedimiento del ensayo……50
2.8.1 Equipos de medición
2.8.2 Multímetro de alta impedancia……..50
2.8.3 Potenciostato/Galvanostáto…… 51
2.8.4 Electrodo de Referencia
2.8.5 Potenciales, corrientes de macrocelda y potenciales de corrosión

2.8.6 Ruido electroquímico
2.9 Procedimiento para pruebas físicas y químicas..... 54
2.9.1 Procedimiento para análisis químico de elementos
2.9.2 Ensayo del contenido de iones cloruro en el concreto
2.9.3 Ensaye a compresión simple..... 57
2.9.3.1 Elaboración de probetas
2.9.3.2 Prensa Hidráulica
2.9.3.3 Fractura de probetas

Capítulo 3
Resultados y Análisis de Resultados
3.1 Análisis los sensores de corrosión..... 61
3.1.1 Potenciales de macrocelda con respecto al electrodo de referencia de acero inoxidable embebido
3.1.1.1 Discusión de los potenciales de macrocelda
3.1.2 Corrientes de macrocelda
3.1.2.1 Discusión de corrientes de macrocelda
3.2 Evaluación con técnicas electroquímicas..... 73
3.2.1 Potenciales de corrosión del sensor y armadura
3.2.2 Discusión del monitoreo con sensores y potenciales de corrosión
3.2.3 Ruido electroquímico del sensor y armadura
3.3 Pruebas químicas de los elementos del sensor.....89
3.4 Pruebas de cloruros.....89
3.5 Resultados del ensaye a compresión.....90

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones.....91

Bibliografía.....93

Anexos.....99

LISTA DE FIGURAS

NUMERO
PÁGINA

INTRODUCCION

I.1 *Corrosión del acero de refuerzo y desprendimiento del concreto en subestructura de puente. Inspección de puentes, SCT, Gro. Méx…….…… 2*

I.2 *Vista de sección transversal de un concreto permeable al aire con 60% de saturación. Con tamaño de agregados entre 0.6 mm a 1.18 mm. Las áreas claras son los poros originales. Llenada con resina para su seccionamiento…… 4*

I.3 *Estructura del gel de cemento…….… 5*

I.4 *Representación de los poros……5*

I.5 *Corrosión del acero de refuerzo en subestructura de puente. Inspección de puentes, SCT, Gro. Méx……7*

I.6 *Zonas de empleo: (DS) Sales de deshielo, (SO) Suelos, (WL) Nivel del Agua de mar, (SW) Zona de oleaje, (SP) Brisa marina……9*

CAPITULO 1

1.1 *Testigo de Concreto……. 12*

1.2 *Varilla de acero corrugado…….... 15*

1.3 *Determinación del límite elástico convencional…….16*

1.4 *Tiempo de vida útil de una estructura……. 18*

1.5 *Estructuras marinas……. 20*

1.6 *Celda de corrosión en concreto reforzado……. 21*

1.7 *Proceso de carbonatación…… 22*

1.8 *Acción de los sulfatos…… 24*

1.9 *Equilibrios del ión cloruro en el concreto…… 25*

1.10 *Rompimiento de la capa de pasivación por iones cloruro……. 26*

1.11 *Macrocelda de corrosión…… 29*

1.12 *Medición de Potencial……..32*

1.13 *Arreglo de celda para la determinación de ruido en potencial y corriente34*

1.14 *Serie de Potencial y Corriente en el tiempo del acero 1017 embebido en Concreto……36*

1.15 *Típica Potencia de la Densidad Espectral…… 38*

CAPITULO 2

2.1 *Viga de concreto armado con sensor embebido…….. 41*

2.2 *Cemento Portland CPO 30R……42*

2.3 *Posición geométrica de sensores…… 43*

2.4 *Ánodos de acero al carbono…… 44*

2.5 *Cátodos de acero inoxidable…….. 44*

2. 6 *Aceros de Referencia…….. 45*

2.7 *(a) Elaboración de soporte, (b) Aislado de conexiones eléctricas…….. 46*

2.8 *Fijación de la escalera de ánodos y prueba de continuidad en sensores…. 47*

2.9 *(a) Cimbra de madera, (b) pesaje de materiales…… 47*

2.10 *(a) Revolvedora de 1 saco, (b) prueba de continuidad después del Colado…… 48*

2.11 *Esquema de caras expuestas y selladas con cemento portland e Impermeabilizante asfáltico…… 48*

2.12 *(a) Pulido con cemento, (b) Recubrimiento con impermeabilizante Asfáltico…….. 49*

2.13 *Curado de vigas bajo agua…….. 49*

2.14 *Vigas en ambientes de (a) Agua Potable y (b) Salmuera…….. 50*

2.15 *Multímetro FLUKE 87 III……. 51*

2.16 *Potenciostato/Galvanostáto 1285…….. 52*

2.17 *Electrodo de referencia Cu/$CuSO_4$…….. 52*

2.18 *(a) Monitoreo de Potenciales y Corrientes de Macrocelda, (b) Potenciales de Corrosión…… 53*

2.19 *Arreglo para monitoreo de Ruido Electroquímico, (RE) Electrodo de referencia 1 y 2, (WE) Electrodo de Trabajo, (EARTH) Tierra, (CE) Contra-electrodo……. 54*

2.20 *Preparación de muestras*..... 55

2.21 *(a) Espectrometría de Emisión por Plasma (ICP-OES),*
(b) Espectrofotometría de Absorción Atómica (FFA)..... 55

2.22 *Analizador Elemental CHNS-O*..... 55

2.23 *Extracción de muestras para la prueba de cloruros*..... 56

2.24 *(a) Agitador Múltiple, (b) Filtrado*..... 56

2.25 *Titulación de la muestra*..... 57

2.26 *Preparación de cimbra y pesaje de materiales*..... 58

2.27 *Colado, varillado y enrasado de cilindros*..... 58

2.28 *Cabeceado con azufre de cilindros de concreto*..... 59

2.29 *Prensa Hidráulica Eléctrica*..... 59

2.30 *Cilindros con relación (a/c 0.4)*..... 60

2.31 *Cilindros con relación (a/c 0.60)*..... 60

CAPITULO 3

3.1 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Agua Potable*..... 62

3.2 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Salmuera*..... 64

3.3 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Agua Potable*..... 65

3.4 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Salmuera*..... 66

3.5 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Agua Potable*..... 68

3.6 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Salmuera*..... 69

3.7 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Agua Potable*..... 70

3.8 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Salmuera*..... 71

3.9 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Agua Potable*..... 74

3.10 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Salmuera*..... 75

3.11 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestos en Agua Potable*..... 76

3.12 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Salmuera*..... 77

3.13 *Corrientes de macrocelda a profundidades de 8 y 22 cm*..... 79

3.14 *Viga con relación a/c 0.40, expuesta en Salmuera*..... 81

Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del sensor A1 en concreto de buena calidad después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda) y con remoción de la tendencia (derecha).

Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y el potencial, obtenidos del sensor A1 en concreto de buena calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

3.15 *Viga con relación a/c 0.40, expuesta en Salmuera…….82*

Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del sensor A6 en concreto de buena calidad después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda) y con remoción de la tendencia (derecha).

Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del sensor A6 en concreto de buena calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

3.16 *Viga con relación a/c 0.40, expuesta en Salmuera…….83*

Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del acero de refuerzo AR en concreto de buena calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda) y con remoción de la tendencia (derecha).

Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del acero de refuerzo (AR) en concreto de buena calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

3.17 *Viga con relación a/c 0.60, expuesta en Salmuera…….84*

Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del sensor A1 en concreto de baja calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda) y con remoción de la tendencia (derecha).

Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del sensor A1 en concreto de baja calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

3.18 *Viga con relación a/c 0.60, expuesta en Salmuera…….85*

Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidos del sensor (A6) en concreto de baja calidad después de los 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda), sin tendencia (derecha).

Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del sensor A6 en concreto de baja calidad después de 10 meses de inmersión en salmuera.

3.19 *Viga con relación a/c 0.60, expuesta en Salmuera…….86*

Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del acero de refuerzo AR en concreto de baja calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda), y con remoción de la tendencia (derecha).

Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del acero de refuerzo AR en concreto de baja calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

3.20 *Velocidades de corrosión del acero de refuerzo y sensores para ambas*

calidades del concreto, vigas (SM143, SM563)……88

LISTA DE TABLAS

NUMERO
PÁGINA

INTRODUCCION

I.I *Factores relacionados con el proceso de corrosión…… 2*

CAPITULO 1

1.I *Clasificación de cementos Portland según ASTM C-150…… 13*

1.II *Clasificación general por sus adiciones……. 13*

1.III *Clasificación por características especiales……14*

1.IV *Clasificación por su Clase Resistente……14*

1.V *Especificaciones de la varilla corrugada grado 42……16*

1.VI *Contenido de sales en los océanos……. 19*

1.VII *Valor crítico de cloruros en concretos reforzados……25*

1.VIII *Interpretación de resultados norma ASTM C 876-91……. 32*

1.IX *Niveles por índice de localización……. 37*

1.X *Tipos de corrosión en función de la pendiente del espectro de frecuencia.39*

CAPITULO 2

2.I *Nomenclatura de vigas……. 41*

2.II *Dosificación del concreto ((kg/m^{3}concreto)/proporción)……42*

CAPITULO 3

3.I *Interpretación de resultados norma ASTM C 876-91, para potenciales de corrosión con Cu/CuSO$_4$ y su adaptación para Acero Inoxidable…… 63*

3.II *Resultados con (R_n) para los meses 10 y 18, en los electrodos A1, A6 y AR, de vigas con relación a/c=0.40 y 0.60 expuestos en salmuera…… 87*

3.III *Tipos de corrosión en función de la pendiente del espectro*

de frecuencia.....87

3.IV *Niveles por índice de localización*..... 88

3.V *Composición química de los elementos del sensor*.....89

3.VI *(%) Iones cloruros solubles en agua presentes en el concreto y su equivalente con respecto al cemento*..... 89

3.VII *Resultados del ensaye a compresión simple*.....90

Objetivo Principal

Determinar el comportamiento de la corrosión en el acero de refuerzo de vigas de concreto con *el sistema de macroceldas de corrosión* empleando técnicas electroquímicas a especímenes de concreto con dos relaciones a/c, expuestos a dos ambientes.

Objetivos Particulares

- ✓ Elaboración de dos calidades específicas de concreto con armadura de acero al carbono a base de varillas de dos diámetros.
- ✓ Emplear el método de envejecimiento mediante inmersión en un ambiente agresivo (salmuera: 5% NaCl) para acelerar el proceso de deterioro del concreto reforzado y manteniéndolos inmersos los especímenes durante la prueba para simular un medio salino altamente agresivo.
- ✓ Revisión de información confiable sobre sensores que se basan en la técnica de macroceldas embebidas en concreto y otros sensores similares para la comparación de su eficiencia en el monitoreo de agentes agresivos.
- ✓ Aplicar la técnica electroquímica de potenciales de corrosión para compararlo con los potenciales de macrocelda del sensor embebido, así mismo la técnica de ruido electroquímico para ver la cinética de corrosión del sistema.
- ✓ Determinar el mecanismo de corrosión del sistema mediante la técnica de macroceldas de corrosión (sensores).
- ✓ Estudiar y analizar el comportamiento de los materiales del sensor acero/acero inoxidable como sensor embebido dentro del concreto para monitoreo del riesgo por corrosión del acero de refuerzo.
- ✓ Investigar con esto alternativas de monitoreo de la corrosión de estructuras de concreto reforzado empleando materiales económicos, además de ser preventivos y no destructivos en el estudio y diagnóstico del deterioro por corrosión.
- ✓ Por último hacer pruebas físicas y químicas del concreto y el acero para soportar el estudio del sistema empleado.

Hipótesis

La técnica de *macroceldas de corrosión* embebido concreto reforzado presentará un comportamiento aceptable como sensor alternativo de monitoreo del riesgo por corrosión del acero de refuerzo y método preventivo ante la presencia de agentes agresivos.

Resumen

La evaluación del riesgo por corrosión del acero de refuerzo mediante sensores galvánicos de acero al carbono/acero inoxidable fue comparado con el monitoreo convencional de potenciales de media celda que emplea un electrodo de referencia de $Cu/CuSO_4$. La correlación de resultados fue llevado a cabo para determinar el funcionamiento de sensores galvánicos embebidos en vigas de concreto con dos posiciones con respecto al nivel de inmersión de los ambientes: agua potable y una solución al 5% de NaCl. El concreto para las vigas fue fabricado con dos relaciones agua cemento de 0.40 y 0.60. Los potenciales y corrientes de macrocelda, así como los potenciales de corrosión del sistema fueron monitoreados empleando un multímetro de alta impedancia. Los resultados del monitoreo durante 18 meses confirmó el buen funcionamiento de los sensores galvánicos como método de monitoreo para el estudio del riesgo por corrosión del acero de refuerzo en concreto y presentó una buena correlación con respecto a los potenciales a circuito abierto. Las relaciones agua/cemento como las diferentes condiciones de la varilla no afectaron la termodinámica de la corrosión. Pruebas con ruido electroquímico y el contenido libre de cloruros en el agua del concreto respaldan la información.

Palabras claves: acero de refuerzo, concreto, relación agua/cemento, potenciales a circuito abierto, sensor galvánico, macrocelda.

Abstract

The evaluation of the corrosion risk of reinforcing steel through carbon steel/stainless steel sensors was compared with conventional open circuit potential monitoring by employing a $Cu/CuSO_4$ reference electrode. The correlation of the results was carried out in order to determine the performance of galvanic sensors embedded in reinforced concrete beams at two positions in respect to the immersion level of the environments: potable water and a 5% wt. salt solution. The concrete for the specimens was fabricated with water-cement ratios of 0.40 and 0.60, respectively. Macrocell potentials and currents as well as the corrosion potentials for the system were monitored using a high impedance multimeter. The results of monitoring during 18 months confirmed good performance of galvanic sensors as a method for studying the corrosion risk of reinforcing steel in concrete and presents a good correlation between open circuit potentials. The water/cement ratios as well as different steel rebars did not affect the thermodynamics of the corrosion. Electrochemical noise tests and free chloride ion content in the water of the concrete back up the information.

Keywords: reinforcing steel, concrete, water/concrete ratio, open circuit potential, galvanic sensor, macrocell.

INTRODUCCIÓN

I.1 Generalidades

El problema de la corrosión es esencialmente económico, cada año por ejemplo en los Estados Unidos se pierden unos $220 billones de dólares de acuerdo a estudios de la industria y gobierno de este país. Este costo en corrosión representa el equivalente al 3 ó 4% de su producto interno bruto nacional (GNP). La tragedia real de este costo anual por corrosión es que aproximadamente el 15% o más podrían ser salvados por la aplicación de tecnologías existentes para la prevención y control de la corrosión. La tecnología existente incluye las metodologías siguientes para prevenir y controlar la corrosión: diseño apropiado, selección de materiales, recubrimientos, protección catódica e inhibidores. Normas, reportes, libros y miles de artículos técnicos testifican el uso exitoso de la tecnología existente para prevenir y controlar la corrosión, y de esta manera, reducir los costos anuales por corrosión [1].

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción en los últimos años. Se calcula un costo de 300,000 millones de dólares por fallas en la infraestructura en los Estados Unidos de América [2]. De tal forma, se estima que de esa cantidad, es posible evitar pérdidas por alrededor de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión. Otros países como Inglaterra, se gastan aproximadamente 500 millones de euros para mantenimiento y restauraciones en este tipo de estructuras [3].

I.2 Problemática de la corrosión en estructuras de concreto reforzado

El concreto es un material discontinuo, duro y de alta densidad. Debido a su propia constitución, contiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados, siendo por tanto permeable a líquidos y gases. Esto es de una gran importancia para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, pues tanto el oxígeno como el agua pueden difundirse hacia el acero a través de la masa de concreto. Por ejemplo, cuando la estructura de concreto está en contacto frecuente con agua que contenga iones de cloruro (agua de mar), a través de la propia porosidad del concreto, puede llegar al

acero de refuerzo iniciando la corrosión. La corrosión de las varillas de refuerzo se desencadena con una triple consecuencia:

a) El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido
b) Debido a las presiones que ejerce el óxido al generarse, el concreto puede agrietarse o desintegrarse
c) La adherencia acero-concreto disminuye o desaparece

Por lo tanto el fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete la integridad estructural (figura 1).

Figura No. I.1 *Corrosión del acero de refuerzo y desprendimiento del concreto en subestructura de puente. Inspección de puentes, SCT, Gro. Méx.*

No obstante los grandes avances tecnológicos mundiales, el problema de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sigue sin ser entendido completamente, debido principalmente a la complejidad del proceso, aun en los casos más simples. Tales procesos están influenciados por numerosos factores (ver tabla I), que dependen de la composición química del concreto, la metalurgia del refuerzo, la mecánica del sistema, el ambiente, el uso de aditivos, etc.

Tabla I.I *Factores relacionados con el proceso de corrosión*

Factores dependientes del concreto	Permeabilidad, porosidad, recubrimientos, tipos de cemento, agregados, aditivos y puesta en obra.
Factores dependientes del	Naturaleza física y química del refuerzo, condición superficial del mismo (óxido superficial, recubrimientos,

refuerzo metálico	etc.), solicitaciones mecánicas (tensión, compresión y torsión).
Factores dependientes del medio de servicio	Humedad relativa, temperatura, degradación biológica, acción de diversas sustancias (Cl^-, O_2, SO_4, SO_2 y CO_2), corrientes parásitas y protección catódica.

Si el concreto es proporcionado correctamente, y es consolidado, compactado y curado apropiadamente, es durable y libre de mantenimiento durante mucho tiempo. Pero en la práctica esto raramente sucede, con resultados de deterioro prematuro en las estructuras de concreto, las cuales necesitan mantenimiento y reparaciones constantes con altos costos.

I.3 El problema de la durabilidad

La durabilidad de concretos expuestos en condiciones ambientales predominantes ya sea en México o en el mundo es un problema significativo de la corrosión. Uno de los principales ataques físico-ambientales que mas causa esfuerzos y deterioro en estructuras de concreto es el fenómeno de congelamiento y descongelamiento; y el ataque químico incluye esfuerzos causados por sulfatos, dióxido de carbono y cloruros, este último cuando son usados para deshielo en estructuras expuestas en ambientes fríos o en su caso expuestas al ambiente marino, y otras como las reacciones internas alkali-agregado son los que más afectan la durabilidad de las estructuras.

La carga ambiental y reacciones internas, en conjunto con la característica física propia del concreto (como su porosidad), hacen que el deterioro por corrosión sea inevitable. La porosidad dentro del concreto está relacionada con su proporción agua-cemento (a/c), si esta disminuye se reduce significantemente la porosidad, y por lo consiguiente su permeabilidad (figura 2).

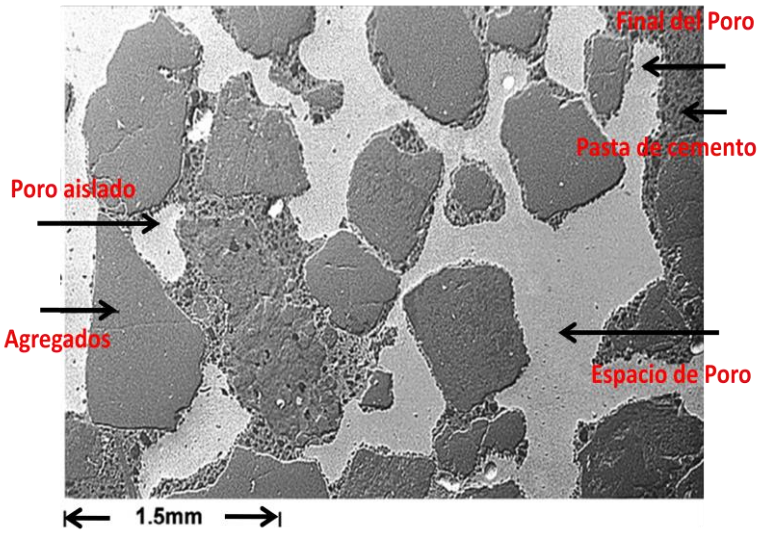


Figura No. I.2 *Vista de sección transversal de un concreto permeable al aire con 60% de saturación. Con tamaño de agregados entre 0.6 mm a 1.18 mm. Las áreas claras son los poros originales. Llenada con resina para su seccionamiento* [4].

El decremento de la permeabilidad disminuirá la difusión de agentes químicos agresivos dentro del concreto y también controlará el contenido de humedad durante los cambios ambientales. Por ejemplo una disminución de la relación agua-cemento a/c=0.80 a 0.40, reducirá el coeficiente de permeabilidad aproximadamente de $\sim 130X10^{-12}$ a $10X10^{-12}$. La permeabilidad surge principalmente de los poros capilares más grandes que los poros de gel de la pasta de cemento; por lo tanto, el nivel de permeabilidad del concreto depende de las relaciones agua-cemento y los periodos y condiciones de curado [5, 6].

Los poros capilares representan la parte de volumen bruto que no ha sido llenado por los productos de hidratación. El volumen del sistema capilar se reduce a medida que avanza la hidratación. Por lo tanto la porosidad capilar de la pasta depende tanto de la relación agua/cemento de la mezcla como del grado de hidratación. La forma de los poros capilares es variable, pero forman un sistema interconectado con distribución aleatoria a través de la pasta de cemento. Estos poros miden alrededor de 1.3 μm. Los poros interconectados constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido. Sin embargo, la hidratación aumenta el contenido sólido de la pasta, y en pastas reposadas y densas los capilares pueden bloquearse por el gel y segmentarse de modo que se transforman en poros capilares interconectados solamente por los poros de gel (figura 3). La ausencia de capilares continuos se debe a la adecuada combinación de la relación agua/cemento y a un periodo suficientemente largo de curado por humedad [7].

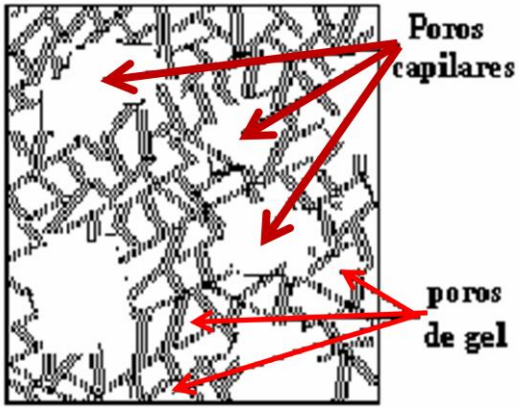


Figura No. I.3 *Estructura del gel de cemento*

El gel es poroso, pero sus poros son espacios interticiales interconectados en las partículas de gel. Estos poros miden aproximadamente entre 15 y 20 A°. Los poros de gel ocupan alrededor de un 28% del volumen total del gel, son independientes de la relación agua/cemento y del avance de hidratación. Por lo tanto, al aumentar el volumen total del gel con el avance de la hidratación, el volumen total de los poros del gel también aumenta.

También se presentan en los concretos poros que son producidos durante su elaboración (macro-poros); éstos son de mayor tamaño y se deben al aire atrapado y a una mala compactación durante la colocación del concreto fresco. La figura 4 muestra los poros que se pueden hallar presentes en el concreto.

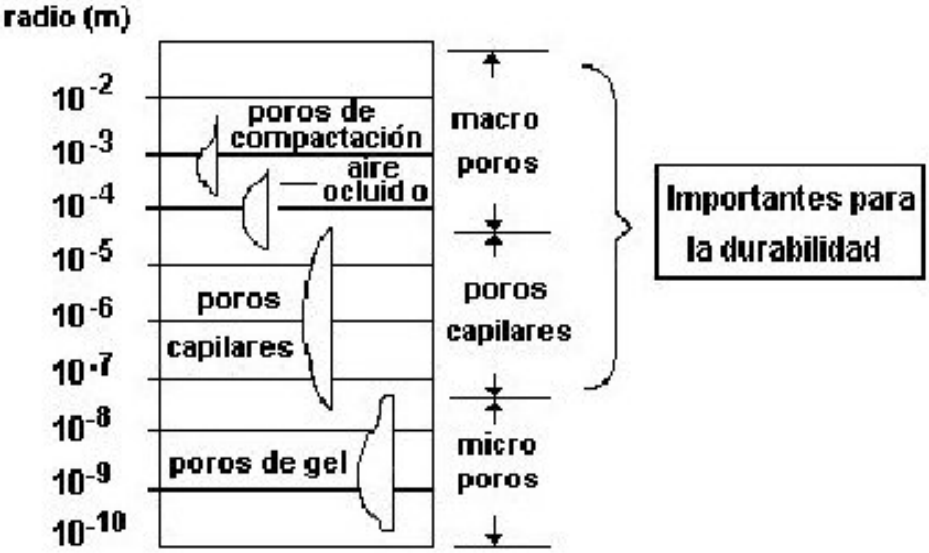


Figura No. I.4 *Representación de los poros*

Los poros de mayor tamaño son los que influyen en la durabilidad del concreto, porque a su través acceden agentes agresivos que pueden iniciar un ataque al elemento metálico embebido y causar corrosión.

I.4 El problema de la corrosión en infraestructura civil

La corrosión del refuerzo metálico embebido es reconocida como uno de los mayores problemas en estructuras de concreto, convirtiéndose en un tema que requiere la atención de los ingenieros de mantenimiento de estructuras de concreto, tales como carreteras y puentes [8]. Para este último tipo de estructuras especiales tan solo en los Estados Unidos ha sido estimado que aproximadamente de 150 a 200 puentes por año sufren deterioro parcial o colapso total, y que aproximadamente el 45% de los puentes están actualmente deficientes estructuralmente a causa del deterioro por corrosión [9], aunado a sus problemas de capacidad de carga por aumento del tráfico.

Los problemas actuales de corrosión de la armadura en México están causando no únicamente un gasto económico a los entes encargados de reparar/rehabilitar las obras (SCT, CFE, IMT, Gobiernos de los Estados, compañías privadas, etc.) si no también un problema social. Esto se manifiesta en la cantidad de INFRAESTRUCTURA donde el costo de los perjuicios sociales (perdidas indirectas) puede sobrepasar fácilmente los gastos de reparación/rehabilitación de la obra, llegando en algunos momentos a causar la pérdida de vidas humanas. En nuestro país el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se encuentra actualmente estudiando el efecto en todos los 6,500 puentes de concreto reforzado (inventario SIPUMEX) de la red federal carretera del país [10]. Esta entidad en conjunto con la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) y la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), están realizando una evaluación en detalle del estado que guardan en cuanto a los daños producto de la corrosión de las armaduras.

Considerando la magnitud del daño causado por corrosión en estructuras de concreto reforzado a nivel mundial, actualmente se está dando auge la necesidad de crear nuevas formas de protección a las estructuras de concreto reforzado, debido principalmente a que actualmente la mayoría de estas se encuentran en una edad avanzada donde los costos en dinero han disminuido, pero la inspección, mantenimiento y costos de reparación han crecido en magnitud, a tal grado que los costos de operación y reparación constituyen el principal gasto actual sobre las infraestructuras. Por ejemplo para los puentes, el costo anual de inspección, mantenimiento y reparación es estimado dentro del rango del 1 al 2% de los costos de restitución. Mundialmente han ocurrido daños muy

severos sobre todo para estructuras expuestas a ambientes agresivos, causando medidas de reparación extremadamente caras.

Los altos costos se deben principalmente a las siguientes razones:

- A los altos costos por inspección debido al tiempo consumido en trabajo y a equipos, dispositivos, y el empleo del personal capacitado, que son relativamente caros.

- A fallas por durabilidad, que se debe principalmente a la tardía detección de los daños severos causados por corrosión a la estructura, cuando los daños ya son visibles y existe desmoronamiento del concreto (figura 5). Los costos en consumo de tiempo y reparación de las estructuras, en esta etapa avanzada son extremadamente costosas.

- En el caso de estructuras especiales como túneles o puentes, las reparaciones y mantenimiento, causan graves demoras en el tráfico con costos dentro del rango del 15 al 40% del costo total de la construcción. Causando también en forma directa cuantiosas pérdidas económicas a los operadores de peaje.

Figura No. I.5 *Corrosión del acero de refuerzo en subestructura de puente.*

Inspección de puentes, SCT, Gro. Méx.

Por lo tanto la idea básica es reducir los costos del trabajo de mantenimiento y el riesgo por corrosión del acero de refuerzo, desarrollando sistemas de monitoreo relacionados con la durabilidad y permita monitorear el proceso inicial del daño a las estructuras, previniendo a los responsables para tomar medidas de protección antes de que el daño sea de alto riesgo y represente un peligro eminente para la seguridad y funcionalidad de las estructuras [11].

1.5 Técnicas de estudio

El uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio del acero de refuerzo embebido en concreto, mediante señales eléctricas y el análisis de la respuesta del sistema. La rapidez de medición y sensibilidad son algunas ventajas de las técnicas electroquímicas, además de ser pruebas no destructivas. Las más utilizadas son: medición de potencial de corrosión (Ecorr), resistencia a la polarización (Rp), voltametría cíclica y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Cada una de ellas aporta información acerca de las condiciones de la interfase acero-concreto, y con ello del grado de corrosión que se presente en la armadura.

Las técnicas electroquímicas, consisten en la aplicación de señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente, o bien la aplicación de señales de corriente y el registro de la repuesta en potencial. La más sencilla y utilizada en campo es la medición del potencial de corrosión, que revela el estado superficial de las varillas. Para información acerca de la cinética de corrosión o velocidad con la que procede la corrosión, se utiliza la técnica electroquímica de resistencia a la polarización, que junto con la anterior son las más utilizadas en la actualidad [12].

Dado que existen técnicas electroquímicas ya certificadas para el estudio de la corrosión en campo y laboratorio, la razón de la investigación de este proyecto es el empleo de una de las nuevas formas para monitoreo preventivo (sensor) y como técnica electroquímica en campo. Para ello se desarrolló un sistema galvánico embebido dentro del concreto reforzado, para obtener valores en corriente, y en potencial los cuales son comparados con los potenciales de corrosión del monitoreo convencional existente. Por lo tanto la finalidad de este proyecto es probar que esta nueva técnica se puede utilizar como sensor y como método alternativo de monitoreo del riesgo por corrosión dentro del concreto [13].

Los sensores galvánicos se han venido empleando desde 1990 como método preventivo contra el ataque de agentes agresivos, principalmente para una gran variedad de estructuras marinas. Estos monitorean el riesgo por corrosión del acero de refuerzo, mejorando la predicción de la vida de servicio. No obstante aún faltan evaluaciones y resultados con aplicaciones prácticas empleando otros tipos de materiales, y bajo otras condiciones diferentes de estudio, donde puedan esperarse valores límites relevantes [11, 14, 15].

Este tipo de sensores pueden aplicarse a estructuras nuevas, lugares de reparación y más recientemente en estructuras existentes.

Además:

1. En estructuras expuestas a ambientes agresivos (figura 6).

2. Son muy económicas para monitoreo en áreas de difícil o sin acceso.

3. Representan un monitoreo efectivo como complemento de otros sistemas de protección.

4. Son una medida más contra el ataque de cloruros.

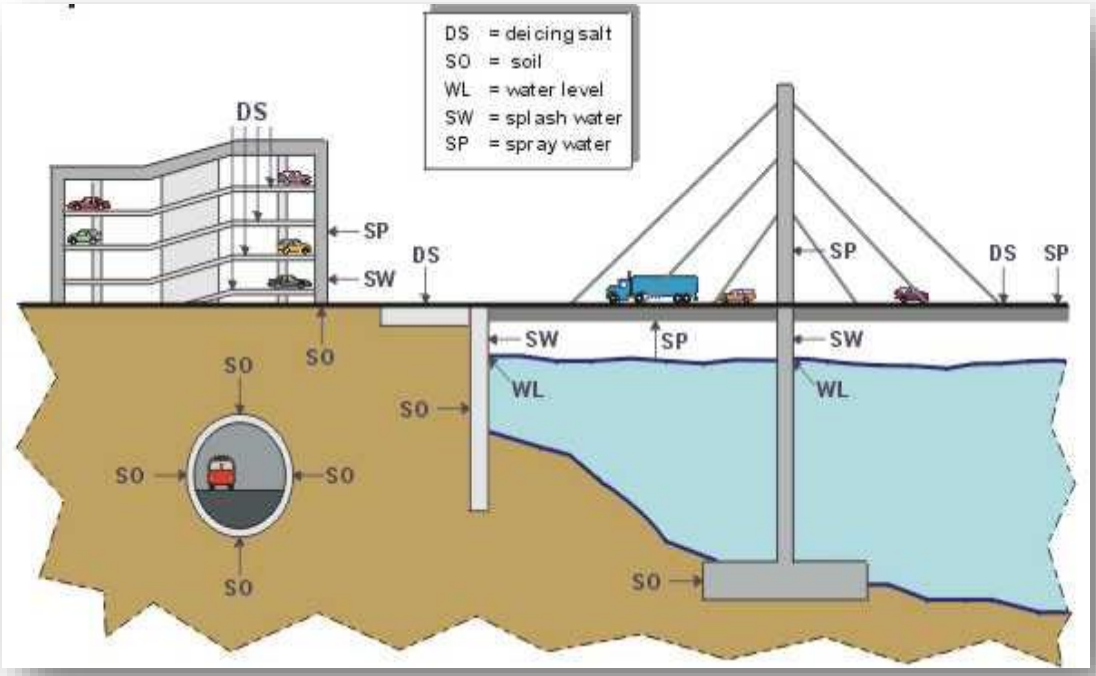


Figura No. I.6 *Zonas de empleo: (DS) Sales de deshielo, (SO) Suelos, (WL) Nivel del Agua de mar, (SW) Zona de oleaje, (SP) Brisa marina.*

Existen ensayos acelerados de corrosión inducida por cloruros, los cuales frecuentemente son empleados para reducir el tiempo en que los cloruros alcanzan un nivel crítico y llegan hasta al acero de refuerzo [16, 17]. Los tres métodos utilizados actualmente son: mezclado con cloruros, voltaje/corriente impresa, y técnicas de mojado y secado. Este último normalmente requiere de varios meses antes que los niveles de iones cloruro sean suficientes para alcanzar al acero de refuerzo.

El objetivo de este proyecto de investigación es determinar el comportamiento de la corrosión en el acero de refuerzo de vigas de concreto con el *"sistema de macroceldas de corrosión"* empleando

técnicas electroquímicas en especímenes con dos relaciones a/c, expuestos a dos electrolitos. Para su desarrollo se empleó el método de envejecimiento por inmersión en un ambiente de cloruro de sodio (NaCl al 5%) y se utilizaron técnicas electroquímicas para su estudio.

En el primer Capítulo se da la teoría básica de los principales actores en la corrosión de las estructuras de concreto reforzado, así como la descripción de las técnicas utilizadas para este trabajo de investigación. El Capítulo dos corresponde a la metodología desarrollada durante la experimentación, describiendo cada proceso de los ensayos principales a nivel laboratorio y complementarios.

En el Capítulo tres se dan los resultados de la experimentación (monitoreo de corriente y voltaje de macroceldas y potenciales de corrosión, monitoreo químico de sensores, pruebas de cloruros y resistencia), así también el análisis de estos resultados conforme a normas actuales existentes y comparativa con otras investigaciones. Por último en el Capítulo cuatro se dan las conclusiones y recomendaciones más pertinentes para este proyecto de investigación.

CAPÍTULO UNO

CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

1.1 Sistema acero-concreto

El concreto es uno de los materiales de construcción más versátil, económico, durable y más ampliamente usado en el mundo. El concreto con cemento pórtland es un material con apariencia simple en contraste con su naturaleza interna, que es muy compleja. Su uso es ilimitado y existe una gran variedad de estructuras hechas a base de concreto, desde carreteras, puentes, túneles, edificios, presas, etc. Su característica principal es su alta resistencia a la compresión, que en combinación con el acero de refuerzo que le proporciona buena resistencia a la tensión, forman una alianza óptima con alto desempeño mecánico, y de larga duración bajo condiciones normales de trabajo.

Dada la buena compatibilidad y durabilidad del sistema acero-concreto, su uso ha crecido rápidamente, así como su importancia, cuando se fueron descubriendo y apreciando sus propiedades [18] como material resistente para la industria de la construcción.

Usualmente el acero de refuerzo embebido dentro del concreto es durable como el concreto debido a la protección física y química que este le infiere durante su vida útil: un espesor de recubrimiento como barrera física, y la capa de óxido de hierro (del orden de un par de nanómetros) que se forma en su superficie debido a la alta alcalinidad del concreto circundante, con valores entre 12.6 y 14 de pH [19] (este fenómeno se llama pasivación) [20], lo cual evita que la corrosión del acero de refuerzo se siga propagando y se mantenga estable desde el punto de vista electroquímico.

1.1.1 Concreto

El concreto es un material compósito de construcción, resultante del fraguado de la mezcla del cemento con agregados inertes de tamaño controlado (grava, arena) y agua. La pasta está compuesta de cemento portland, agua y aire atrapado o incluido intencionalmente, el cual constituye del 25 al 40% del volumen total del concreto,

donde el cemento ocupa usualmente entre el 7 y el 15%, el agua del 14 al 21%, el aire sin incluir 3%, y hasta el 8% incluido intencionalmente. Los agregados constituyen del 60 al 75% del volumen total del concreto. La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta, en un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado [21], figura 1.

Figura No. 1.1 *Testigo de Concreto*

1.1.1.1 Cemento Hidráulico

En términos generales el cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad [22].

1.1.1.2 Cemento Portland

Aunque ciertos tipos de cementos hidráulicos eran conocidos desde la antigüedad, sólo han sido utilizados a partir de mediados del siglo XVIII. El término cemento Portland se empleó por primera vez en 1824 por el fabricante inglés de cemento Joseph Aspdin, debido a su parecido con la piedra de Portland, que era muy utilizada para la construcción en Inglaterra. El primer cemento Portland moderno, hecho de piedra caliza y arcillas o pizarras, calentadas hasta convertirse en clínker y después trituradas, fue producido en Gran Bretaña en 1845. En aquella época el cemento se fabricaba en hornos verticales, esparciendo las materias primas sobre capas de coque a las que se prendía fuego. Los primeros hornos rotatorios surgieron hacia 1880. El cemento Portland se emplea hoy en la mayoría de las estructuras de concreto [23].

Por definición el Cemento Portland es un cemento hidráulico producto de la pulverización del clinker que consiste esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos, usualmente contiene una o más formas de sulfato de calcio (yeso) como adición en la molienda [24].

Existen diferentes tipos de cemento Portland en el mercado, en los Estados Unidos las clasifican en cinco tipos de acuerdo a la *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 150 [24], las cuales se fabrican casi con los mismos materiales básicos, pero sus propiedades se modifican variando la dosificación (Tabla I).

Tabla 1.I *Clasificación de cementos Portland según ASTM C-150*

Cemento	Uso
Tipo I	Cemento de uso común para construcción en general.
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I, puede resistir alguna exposición al ataque de los sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras donde el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a edad temprana y fraguado rápido que en las primeras 24 horas alcanza una resistencia aproximada al doble que la del cemento tipo I. Produce calor de hidratación muy alto.
Tipo IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, produce un concreto que disipa muy lentamente el calor. Se utiliza en construcciones de gran tamaño.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, usado para concretos que van a estar expuestos a altas concentraciones de sulfatos, para estructuras que estén en suelos en contacto con aguas freáticas o aguas negras concentradas domésticas.

Si el tipo requerido de cemento no está disponible en el mercado, pueden adquirirse varios aditivos con los que las propiedades del cemento tipo I pueden modificarse para producir las características deseadas. En México, la norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004, clasifica al cemento Pórtland en tres aspectos (Tablas 2, 3 y 4):

1. Tipo de cemento por sus adiciones

Tabla 1.II *Clasificación general por sus adiciones*

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Pórtland Ordinario
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Pórtland Compuesto
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

2. Por sus características especiales

Según las necesidades del proyecto los cementos pueden requerir de una ó más características especiales. Por lo que puede ser requerido un CPO RS, que es un cemento Pórtland ordinario resistente a los sulfatos, ó bien un CPO B, un cemento Pórtlad ordinario blanco.

Tabla 1.III *Clasificación por características especiales*

Características Especiales	
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

3. Por su clase Resistente

La resistencia normal: es la resistencia a la compresión a los 28 días. La clase resistente de un cemento de acuerdo con la resistencia normal se indica por la designación del tipo de cemento, seguido por los valores de 20, 30 ó 40.

Resistencia Rápida: es la resistencia a la compresión a los 3 días. Para especificar que un tipo de cemento debe de cumplir con una resistencia rápida se le agrega la letra R después de la clase. Sólo se definen valores de resistencia rápida para las clases de 30R y 40R.

Tabla 1.IV *Clasificación por su Clase Resistente*

Clase Resistente	Resistencia a la comprensión N/mm^2		
	Mínimo a 3 días	**Mínimo a 28 días**	**Máximo a 28 días**
20	--	20	40
30	--	30	50
30 R	20	30	50
40	--	40	--
40 R	30	40	--
R significa que debe cumplir con una resistencia inicial especificada a la edad 3 días			

1.1.1.3 Agregados

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. El agregado fino consiste de arena natural, arena fabricada, o una combinación de ambos, el tamaño de partículas puede llegar

hasta 10 mm, pasando por un tamiz no. 4, con 4.7 mm (3/16”) de abertura entre hilos.

Dentro de las características generales el agregado grueso deberá consistir de: grava triturada, piedra triturada, escoria de alto horno, o concreto de cemento hidráulico triturado, o una combinación de ellos. El tamaño de partículas es mayor que 10 mm ó que se retenga en la malla no. 16, y pueden variar hasta 152 mm. Los más empleados comúnmente tienen tamaños de 19 mm a 25 mm, localizándose en depósitos de corrientes naturales de agua, o producto de cantera.

Los agregados deben consistir en partículas con buena resistencia mecánica, buena resistencia a condiciones de exposición a la intemperie, no conteniendo materiales que puedan causar el deterioro del concreto.

1.1.2 Acero de refuerzo

Los aceros de refuerzo son varillas corrugadas, estas son barras de acero laminado, diseñados especialmente para armar concreto armado, generalmente de sección circular con diámetros específicos a partir de ¼” de pulgada. Normalmente la superficie de estas varillas presenta rebordes en su superficie (corrugado) cuya función es mejorar la adherencia con el concreto, además de estar dotada de una gran ductilidad, figura 2.

Figura No. 1.2 *Varilla de acero corrugado*

Entre las características técnicas principales que deben cumplir está el límite elástico, carga unitaria de rotura y el alargamiento de rotura, para el cual solo se describe la primera de ellas:

- Límite elástico R_e (Mpa): tensión máxima que un material elástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si la tensión es menor que su límite elástico entonces se deformará temporalmente de acuerdo a la ley de Hooke, considerando el límite elástico la tensión a la cual el material tendrá una deformación plástica del 0.2%. Figura 3.

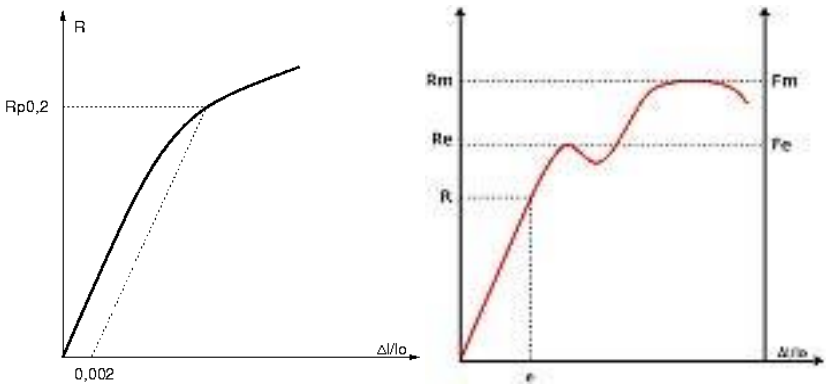


Figura No. 1.3 *Determinación del límite elástico convencional*

La norma mexicana NMX-C-407-ONNCCE-2001 la define como barra de acero especialmente fabricada para usarse como refuerzo de concreto, y cuya superficie está provista de salientes llamadas corrugaciones. Establece que las varillas se clasifican por su esfuerzo de fluencia nominal en tres grados: Grado 30, Grado 42 y Grado 52, Tabla V.

Tabla 1.V *Especificaciones de la varilla corrugada grado 42*

Número de designación *	Diámetro (pulgadas)	Diámetro (mm)	Área de la sección transversal (mm^2)	Perímetro (mm)	Masa Nominal (kg/ml)
3	3/8"	9.5	71	29.8	0.560
4	1/2"	12.7	127	39.9	0.994
5	5/8"	15.9	198	50.0	1.552
6	3/4"	19	285	60.0	2.235
8	1"	25.4	507	79.8	3.973

** El Número de designación viene impreso en la varilla*

1.1.2.1 Aceros al carbono

El acero de refuerzo empleado para estructuras de concreto es una aleación de hierro carbono que tienen desde una cantidad aproximada de 0.03 a 1.2% de carbono, de un 0.25 a 1% de manganeso y menores cantidades de otros elementos como silicio, fósforo y azufre, estos aceros reciben el nombre aceros ordinarios o de bajo carbono [25].

En particular el acero 1018 [26], se puede utilizar con éxito si los requerimientos mecánicos no son demasiado severos. Estos aceros presentan algunas limitaciones [27], tales como:

- No pueden ser forzados más allá de 100,000 psi (690 MPa) sin que se produzca una sustancial pérdida de ductilidad y resistencia de impactos.
- Tienen poca resistencia a la corrosión y oxidación.
- Tienen poca resistencia al impacto a bajas temperaturas.

1.1.2.2 Aceros inoxidables austeníticos

Generalmente los aceros austeníticos poseen una gran resistencia a la corrosión debido a la alta aleación en cromo y níquel. Básicamente son aleaciones terciarias Fierro, Cromo y níquel (Fe-Cr-Ni) conteniendo entre 16 a 25% de Cr, y desde 7 a 20% de Ni. La protección contra la corrosión lo ofrece su estado pasivo, es decir la formación de una película (delgada, compacta, continua y adherente de óxido de cromo) que protege efectivamente la superficie metálica.

La aleación más producida de la familia de aceros austeníticos es el acero 304 con una amplia variedad de aplicaciones. Este acero presenta buena resistencia a la corrosión y resiste casi a todos los ácidos oxidantes, muchas soluciones esterilizadoras, la mayor parte de los compuestos químicos orgánicos y colorantes, así como una amplia variedad de compuestos químicos inorgánicos.

Una de las debilidades del acero 304, es su susceptibilidad a compuestos que presenten cloruros, ya que estos inducen corrosión localizada (picaduras) [28].

1.2 Durabilidad de estructuras de concreto reforzado

La durabilidad en estructuras de concreto reforzado dependerá tanto de las características del concreto y del acero como de la interrelación entre ambos. Así mismo la estructura porosa resultante y la fase acuosa contenida en los poros influirá de forma decisiva sobre la accesibilidad de agentes agresivos externos hasta la armadura, ya que el contenido de fase líquida en los poros influye enormemente en la velocidad de difusión de gases y iones, a la vez que dicha fase acuosa actúa como medio electrolítico en los procesos de corrosión del acero [29].

El ACI 201 define la durabilidad del concreto hecho con cemento hidráulico como la habilidad para resistir la acción del intemperismo,

ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Y determina que el concreto durable debe mantener su forma original, calidad y características de servicio cuando es expuesto a este ambiente [30].

Desde el punto de vista de la corrosión del acero en el concreto, Tuutti [31] definió un modelo de durabilidad muy sencillo que representa el tiempo que tarda una estructura de concreto proporcionando los servicios para los cuales ha sido diseñada. Este modelo se divide en dos periodos, figura 4.

Periodo de iniciación: Tiempo en que tarda el agente agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar el acero y provocar el rompimiento de la capa de óxido protector.

Periodo de propagación: Comprende la acumulación progresiva del deterioro, hasta que alcanza un nivel inaceptable.

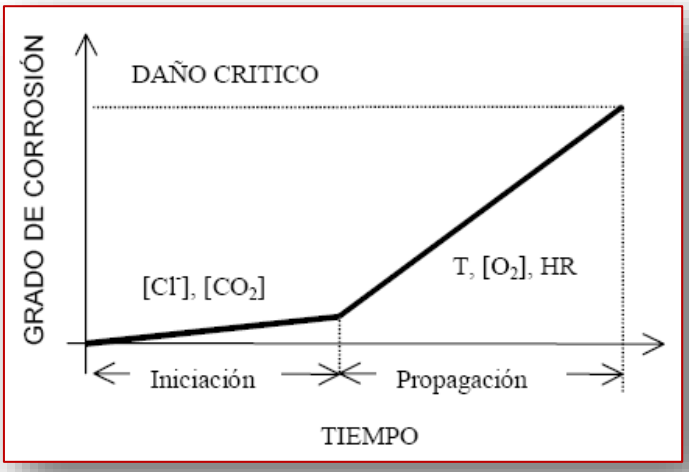


Figura No. 1.4 *Tiempo de vida útil de una estructura*

Durante el periodo de iniciación los agentes agresivos llegan a la superficie del metal e inician el proceso de corrosión. Los agentes más comunes son los iones cloruro y la neutralización de la pasta de concreto por el dióxido de carbono. La despasivación del acero es el punto donde termina el periodo de iniciación y principia la propagación, su grado en daño por corrosión depende de muchos factores principales como la temperatura, humedad relativa y la presencia de oxígeno.

1.2.1 Tipos de ambientes

Actualmente la durabilidad de las estructuras de concreto depende del macro y el micro ambientes a la cual están expuestos. En este

contexto el ambiente comprende aquellos efectos de acciones físicas y químicas que no son consideradas como carga dentro del diseño estructural.

1.2.1.1 Medio Rural y Urbano Industrial

La presencia de contaminantes en el medio ambiente rural es mínima. Los generados por la emisión de las industrias es mayor, y provoca una diversidad de componentes químicos (cada uno con diferentes grados de concentración) mayor de la que se podría observar en un ambiente marítimo natural, aunque es altamente probable la preponderancia del dióxido de carbono, algunos sulfatos y nitratos que inciden en la disminución del pH natural del concreto, y en procesos de carbonatación que favorecen la entrada de humedad y agentes corrosivos hacia el acero de refuerzo.

1.2.1.2 Medio Marino

Los océanos contienen aproximadamente 3,5% de sal en solución. En general se encuentra Na, Mg, Ca, K y Mg en solución. Estos elementos químicos provienen de las rocas de la tierra firme, que son acarreados por los ríos, Tabla VI.

Tabla 1.VI *Contenido de sales en los océanos*

Contenido		
Sales	total=100% sal	con H_2O
NaCl	78%	2,7 %
$MgCl_2$	9,5%	0,33 %
$MgSO_4$	6,5%	0,23 %
$CaSO_4$	3,5%	0,12 %
KCl	2,0%	0,07%
$CaCO_3$	0,33%	0,011%
$MgBr_2$ y NaBr	0,25%	0,009 %
total:	**100 %**	**3,5 %**

Los principales factores del ambiente marino que intervienen en la corrosión de las estructuras son: la salinidad, la concentración del oxígeno disuelto, la temperatura y el pH, principalmente [32]. La salinidad a mar abierto es de 32-36 ppt, este valor varia muy poco con la profundidad, disminuyendo cerca de los ríos. La concentración del oxígeno disuelto sobre la superficie del agua está dada por dos formas: (1) cerca del equilibrio de saturación concentrada con el

oxígeno atmosférico en una temperatura dada [6 ppm en los trópicos-11 ppm en el ártico], (2) puede ser super-saturada debido a la fotosíntesis de plantas microscópicas (hasta 200%) y la entrada de burbujas de aire (hasta casi el 10%), con la profundidad tiende a ser menos saturada o disminuye por la oxidación bioquímica de materia orgánica. La temperatura en la superficie a mar abierto varía entre -2 a 35ºC, dependiendo de la latitud, estación, corriente, etc., esta decae con la profundidad; la diferencia entre profundidad y estación del año puede ser muy grande o pequeña dependiendo de donde este localizada. El pH varía a mar abierto de 7.5 a 8.3 dependiendo de varios factores como la concentración del dióxido de carbono disuelto, actividad de las plantas y corrientes de aire marítimo, entre otras causas [33].

Las típicas estructuras de concreto armado expuestas a ambientes marinos tanto internas como costeras son las plataformas marinas, puentes, muelles, malecones, diques, edificios, etc., figura 5. Estas pueden estar expuestas a cinco diferentes zonas corrosivas dependiendo la posición relativa de sus partes con respecto al nivel del mar. Las cinco zonas son la atmosférica (brisa marina), zona de oleaje, zona de marea, zona sumergida y zona bajo lecho marino o profundas [34]. Las estructuras presentarán procesos diferentes de corrosión de acuerdo a la zona donde actúe y los factores mencionados anteriormente.

Figura No. 1.5 *Estructuras marinas*

Por lo tanto el medio marino cuenta con condiciones que propician la corrosión del acero en estructuras de concreto por los componentes químicos del agua de mar, y en caso de combinación con la emisión de contaminantes de zonas industriales en esas áreas, vienen agudizar la problemática, pues la gran aleatoriedad en la presencia

de cada componente impide el establecimiento de normas o recomendaciones en cuanto a cuidados específicos, y hace necesario el estudio de cada caso en particular.

1.3 Mecanismos de deterioro por corrosión en estructuras de concreto reforzado

El riesgo por corrosión del acero de refuerzo dentro del concreto debería ser mínimo en estructuras bien diseñadas, con suficiente profundidad de recubrimiento, con concretos de buena calidad, y una buena colocación y compactación durante el colado. Este espesor de recubrimiento como se mencionó al principio del capítulo provee al acero de refuerzo una barrera física y química contra la corrosión.

Para que se forme una celda de corrosión en el concreto es necesaria la presencia de un ánodo, un cátodo y un electrolito, el cual es una solución capaz de conducir la corriente eléctrica por medio de un flujo de iones. Cualquier concreto húmedo contiene suficiente electrolito como para conducir una corriente capaz de causar corrosión. Mientras más seco esté un concreto, menor será su conductividad y la estructura se corroe menos, figura 6.

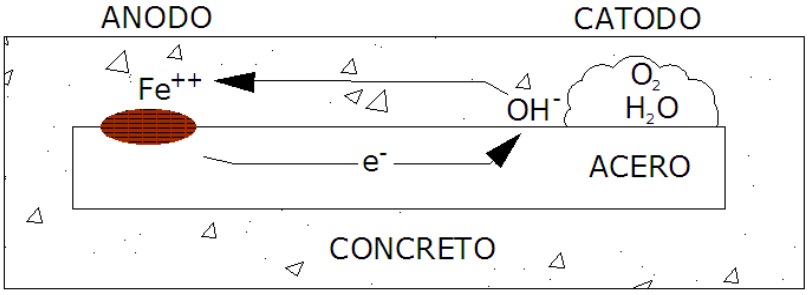


Figura No. 1.6 *Celda de corrosión en concreto reforzado*

En el mecanismo se presenta una reacción anódica, en la cual el hierro se oxida a iones ferrosos:

$$Fe \longleftrightarrow Fe^{+2} + 2e^{-} \qquad (1)$$

Una reacción catódica, en la cual el oxígeno se reduce a iones OH^{-}:

$$\tfrac{1}{2}\, H_2O + \tfrac{1}{4} O_2 + e^{-} \longleftrightarrow OH^{-} \qquad (2)$$

En una segunda etapa, el ión Fe^{+2} disuelto, reacciona con otros aniones del agua (Cl^{-}, OH^{-}, etc.) y se transforma en óxidos de hierro por un número de reacciones complejas.

La velocidad de corrosión se ve afectada por el tamaño relativo del cátodo y el ánodo, la concentración de oxígeno, la temperatura y resistividad eléctrica del electrolito (influenciada por la concentración de sustancias disueltas).

Si por cualquier razón la reacción química en el cátodo o en el ánodo no ocurre, la celda es inoperante y la corrosión no se presenta.

1.3.1 Carbonatación

El término carbonatación se refiere a la reacción del dióxido de carbono atmosférico (CO_2) con los hidratos del cemento dentro del concreto.

1.3.1.1 Mecanismo de carbonatación

La concentración de CO_2 puede variar 300 ppm (0.03%) en zonas no industrializadas hasta 3000 ppm (0.3%) por volumen en las grandes ciudades. El CO_2, en pequeñas cantidades puede penetrar en un concreto pobre o hecho con alta relación agua-cemento, el cual reacciona con los hidratos del cemento, particularmente con el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ con un pH alto (~13) y lo convierte a carbonato de calcio con un pH más neutral (~9), figura 7. Si todo el hidróxido de calcio es carbonatado el pH de la pasta hidratada puede alcanzar valores tan bajos como 8.3, con lo cual el cemento portland se deteriora dejando desprotegido al acero de refuerzo contra la humedad y el oxígeno, pero sobre todo a la penetración de agentes agresivos como los iones cloruro y sulfatos, los cuales son capaces de despasivar al acero de refuerzo iniciando el proceso de corrosión dentro del concreto.

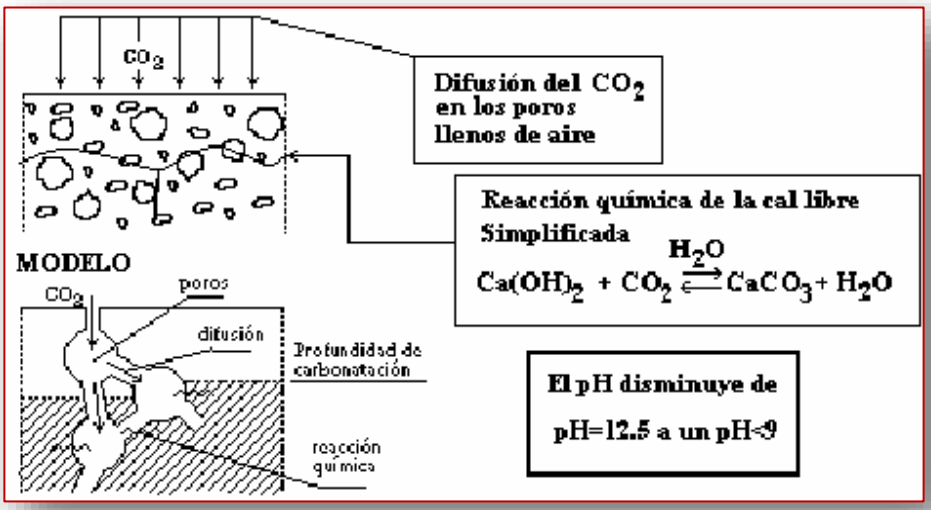


Figura No. 1.7 *Proceso de carbonatación*

El factor más importante que afecta la carbonatación del concreto es la difusividad de la pasta de cemento endurecida, la cual depende de la composición del concreto, relación agua-cemento, el tipo de cemento usado y el curado. Todos estos factores deben tomarse en cuenta cuando se investiga la velocidad de carbonatación del concreto. Primeramente muchos investigadores por su facilidad consideran el uso del esfuerzo a compresión del concreto como parámetro para determinar la carbonatación del concreto.

La relación más comúnmente empleada entre la profundidad de carbonatación y el tiempo [35], es la siguiente:

$$d = k\sqrt{t} \tag{3}$$

Donde:
d, profundidad de carbonatación en milímetros (mm)
t, tiempo de exposición en años
k, coeficiente de carbonatación en milímetros por $\sqrt{año}$ (mm/año$^{0.5}$)

Los valores de k pueden tener un rango de <1 para concretos con baja relación agua-cemento (a/c), y >5 para concretos con alta relación agua cemento.

1.3.2 Sulfatos

Los sulfatos en estado sólido no afectan el concreto, pero en solución producen un fuerte ataque que se manifiesta en deformaciones y fisuras. Los sulfatos se encuentran en la naturaleza en forma sólida (yeso, anhidrita, etringita) o disueltos en aguas superficiales y subterráneas, así como en los suelos y en la atmósfera como dióxido de azufre (zonas industriales). Sus concentraciones difieren considerablemente.

El mecanismo de la reacción química de ión sulfato como sustancia agresiva consiste en la formación de una sal fuertemente expansiva, que produce la fisuración y agrietamiento del concreto [36].

1.3.2.1 Mecanismo de ataque por sulfatos

En la hidratación del cemento pórtland los compuestos que se hidratan más rápidamente son los aluminatos tricálcicos (C_3A), seguidos por los compuestos de hierro ó alumino ferro tetracálcico (C_4AF), por último los silicatos tricálcicos (C_3S) y los silicatos dicálcicos (C_2S). Las características de colocación y endurecimiento de la pasta de cemento pórtland son determinados principalmente por las reacciones de hidratación de los aluminatos. La naturaleza de

hidratación del aluminato tricálcico es considerablemente variada si este compuesto es colocado en una solución de sulfatos.

La velocidad de reacción de los sólidos anhidros con agua y la interacción de los limos, alúmina, sílice y sulfatos en la solución determina la naturaleza de los productos de hidratación y la velocidad de colocación. Dependiendo sobre la concentración de aluminatos y iones sulfatos, los sulfatos frenan la rápida fijación de aluminatos tricálcicos (C_3A) por la alta formación de sulfatos y de sulfoaluminatos de calcio llamado sal de Candlot (etringita), o por la formación de bajos sulfatos de aluminatos monosulfatos de calcio [37].

La etringita es muy poco soluble en agua y provoca un gran aumento de volumen del orden del 250%, en relación de los reactivos iniciales. Esta expansión produce grandes tensiones internas que, por lo general, no pueden ser absorbidas por el material y desencadena una serie de fisuras y desprendimiento superficiales de material (ver figura 8).

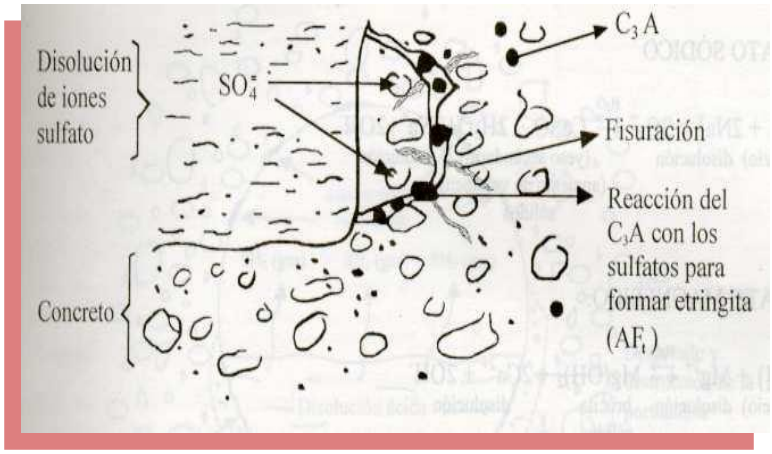


Figura No. 1.8 *Acción de los sulfatos*

1.3.3 Cloruros

Actualmente es muy conocida la capacidad de ciertos iones, como los halogenuros, para destruir localmente la pasividad de los metales y aleaciones que, en su ausencia, exhiben una pasividad perfecta frente a muchos medios naturales. En el concreto estos iones cloruro, pueden provocar una corrosión por picaduras, si se encuentran por encima del límite o umbral que los hace agresivos en este medio específico.

Los iones cloruro pueden estar presentes en el concreto de tres maneras: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua que se

conserva en los poros, lo que constituye la disolución poro. La Figura 9, ilustra los tres casos, e indica los equilibrios que se establecen para los cloruros en el concreto.

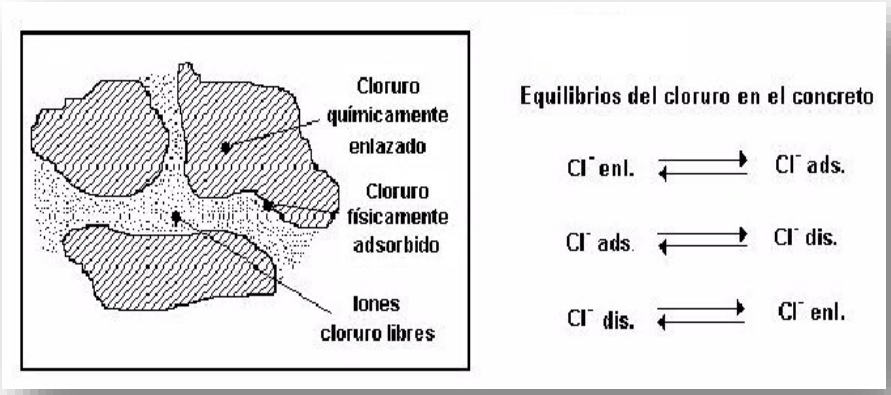


Figura No. 1.9 *Equilibrios del ión cloruro en el concreto*

Los iones cloruro que son dañinos para el acero de refuerzo son los que se hallan disueltos o libres, pero debido a los equilibrios que se presentan es posible que los que están adsorbidos se incorporen a la disolución y se tornen peligrosos.

En el caso de los cloruros que pudieran ser adicionados durante el amasado del hormigón, los códigos de fabricación y de cálculo de estructuras de hormigón de todos los países limitan su contenido en proporciones variables, tal como se muestra en la Tabla VII.

Tabla 1.VII *Valor crítico de cloruros en concretos reforzados* [38]

PAIS	NORMA	LIMITE MAS DE $C1^-$	REFERIDO A
USA	AC1 318	≤ a 0.15% en ambiente de C1	cemento
USA	AC1 318	≤ a 0.3% en ambiente normal	cemento
USA	AC1 318	≤ a .1% en ambiente seco	cemento
INGLATERRA	CP-110	≤ a 0.35% al menos en un 95%	cemento
AUSTRALIA	AS 3600	≤ al 0.22%	cemento
NORUEGA	NS 3474	≤ al 0.6%	cemento
ESPAÑA	EH 91	≤ al 0.40%	cemento
EUROPA	EUROCODIGO 2	≤ al 0.22%	cemento
JAPON	JSCE-SP 2	≤ al 0.6 Kg/m^3%	hormigón
BRASIL	NBR 6118	≤ al 0.05%	agua

Las divergencias en las cantidades máximas de cloruros admitidas por los distintos códigos aparecen debido a la inexistencia de un límite único de aplicación general. Ello se produce tanto por las diferencias de características de los cementos (su contenido en álcalis y velocidad de hidratación), como por los distintos tipos de acero utilizados (composición química, rugosidad superficial y estado de conservación), así como por las distintas materias potencialmente suministradoras de los cloruros. Por lo tanto la despasivación del acero de refuerzo en concreto es todavía materia de controversia, el cual necesita numerosos estudios fundamentales [39], muchos son los autores que han contribuido a entender mejor el fenómeno, pero quedan todavía muchos aspectos para ser estudiados.

1.3.3.1 Corrosión del acero de refuerzo inducida por cloruros

La influencia de iones cloruro en la despasivación del acero de refuerzo en concreto con altos niveles de pH, puede ser observada como una función del balance neto entre la competencia de dos procesos: la estabilización o reparación de la película de óxido por iones hidróxidos, y la ruptura de dicha película por los iones cloruros.

1.3.3.2 Mecanismo de corrosión por iones cloruros (Cl^-)

La destrucción de la película de pasivación en presencia de cloruros es debida a una mayor concentración localizada de iones de cloruro libres, figura 10.

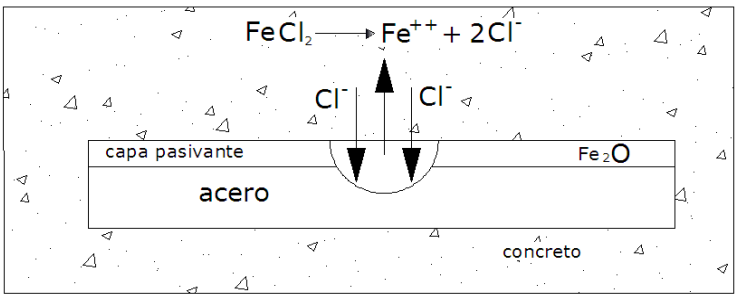


Figura No. 1.10 *Rompimiento de la capa de pasivación por iones cloruro* [40].

Las reacciones principales sobre el mecanismo de despasivación por cloruros dentro del concreto son:

$$Fe^{++} + 6Cl^- \longleftrightarrow FeCl_6^{-4} \qquad (4)$$

$$Fe^{+3} + 6Cl^- \longleftrightarrow FeCl_6^{-3} \qquad (5)$$

Una reacción tal como la ecuación 4 remueve iones ferrosos del área del cátodo, permitiendo a estos ser depositados lejos (si acaso unos pocos micrones) de la barra, a través de la reacción:

$$FeCl_6^{-3} + 2OH^- \longleftrightarrow Fe(OH)_2 + 6Cl^- \qquad (6)$$

Esta reacción produce óxido y libera ión cloruro para posteriores reacciones con iones ferrosos.

La complejidad del ión ferroso, de acuerdo con la ley de LeChatelier´s y la ecuación 7, causa la oxidación de más hierro metálico, conduciendo a la producción de más oxido.

$$Fe \longleftrightarrow Fe^{++} + 2e^- \qquad (7)$$

Además de que reduce la concentración de iones ferrosos porque su reacción con cloruros (ecuación 4) conduce a un cambio en el potencial de media celda del hierro.

1.4 Sistema de sensores

Un sensor es un arreglo de uno o más elementos transductores que son empleados para monitoreo de un sistema. Los elementos transductores son dispositivos que transforman o convierten atributos físicos, químicos y electroquímicos de un sistema a una señal eléctrica.

Para aplicaciones típicas de corrosión los transductores deben ser sensibles a muchos factores como la humedad relativa, temperatura del ambiente, concentración de especies agresivas, pH, condiciones de aereación, potencial de electrodo, cambio de peso, etc. Dentro de cualquier sistema propenso a la corrosión, una combinación de estos transductores puede ser configurado para generar respuestas eléctricas que reflejen las condiciones prevalecientes de corrosividad dentro del sistema en cualquier tiempo real.

1.4.1 Tipos de sensores

Los elementos del sensor pueden ser categorizados en dos clases: elementos sensibles inactivos y elementos sensibles interactivos. Esta categoría consiste en que cumplan estas dos funciones y que respondan a cambios para-métricos dentro del sistema.

Los Transductores Galvánicos son los sensores basados en pares galvánicos, los cuales tienen varias aplicaciones como: el monitoreo de la corrosión atmosférica [41], y más recientemente para monitoreo de la corrosión dentro del concreto reforzado [42].

1.4.2 Sistemas galvánicos

Cuando en una celda electroquímica existe una diferencia de potencial entre dos electrodos, y estos son conectados eléctricamente y expuesto a un electrolito, la corrosión puede ocurrir.

La corrosión galvánica es una forma de corrosión que ocurre debido a las diferencias de potencial entre metales. La corrosión galvánica ocurre mediante la acción de una celda electroquímica [43].

1.4.2.1 Corrosión galvánica

La corrosión galvánica es definida como una corrosión acelerada por las diferencias de potencial entre diferentes metales cuando están en contacto eléctrico y expuesto a un electrolito. Este tipo de corrosión también puede ocurrir entre un metal y un no metal eléctricamente conductivo tal como el grafito. El carbón en plásticos y elastómeros puede ser también eléctricamente activo y pueden causar corrosión galvánica. Los productos de corrosión tales como la magnetita (Fe_3O_4) y sulfuros pueden ser electroquímicamente activos y son catódicos respecto a la mayoría de los metales. Los iones de un metal más noble pueden ser reducidos sobre la superficie de un metal más activo como el cobre sobre aluminio. El depósito metálico resultante provee sitios catódicos para corrosión galvánica adicional del metal más activo.

El contacto eléctrico entre materiales disímiles puede ser por contacto directo, o mediante una ruta conductora externa.

En corrosión galvánica, la velocidad de ataque de un metal o aleación es usualmente acelerada, mientras la velocidad de corrosión del otro material usualmente decrece.

La corrosión galvánica puede ser reconocida por un incremento en la corrosión del material anódico, o un decremento de corrosión del material catódico.

1.4.2.2 Mecanismo de corrosión galvánica

El mecanismo de la corrosión galvánica es la clásica celda electroquímica, y una celda electroquímica requiere de cuatro factores:

Ánodo: Es el lugar donde el metal se pierde y se producen los electrones.

Cátodo: Lugar donde los electrones producidos en el ánodo se consumen.

Conductor Metálico: La cual conduce los electrones desde los sitios anódicos hacia los sitios catódicos.

Electrolito: Provee los reactantes para las reacciones catódicas y permite el flujo de iones.

Para que la corrosión galvánica ocurra, todos estos componentes deben estar presentes y activos.

En la corrosión galvánica, los electrones fluyen mediante una ruta metálica desde sitios donde las reacciones anódicas están ocurriendo a sitios donde ellos permiten que las reacciones catódicas ocurran. La corriente eléctrica fluye por medio del electrolito para balancear el flujo de electrones en la ruta metálica.

La corrosión galvánica es impulsada por las diferencias de potencial entre metales o no metales eléctricamente conductivos cuando están expuestos en un electrolito. Los no metales incluyen materiales eléctricamente conductivos tales como el grafito. En algunos casos, el miembro catódico de un par galvánico puede ser un depósito formado por deposición de iones metálicos de la solución sobre la superficie metálica anódica [43].

1.4.2.3 Macroceldas de corrosión

La corrosión galvánica es también conocida como macrocelda de corrosión (ver figura 11), los potenciales, corrientes son medidos de la actividad entre un ánodo que se corroe y un cátodo pasivo. Este tipo de corrosión se usa actualmente como sensor embebido en concreto, donde la corriente registrada es una medida solamente de la parte de corrosión causada por el proceso de reducción del cátodo, no considerando la propia corrosión del ánodo (microceldas de corrosión) [44].

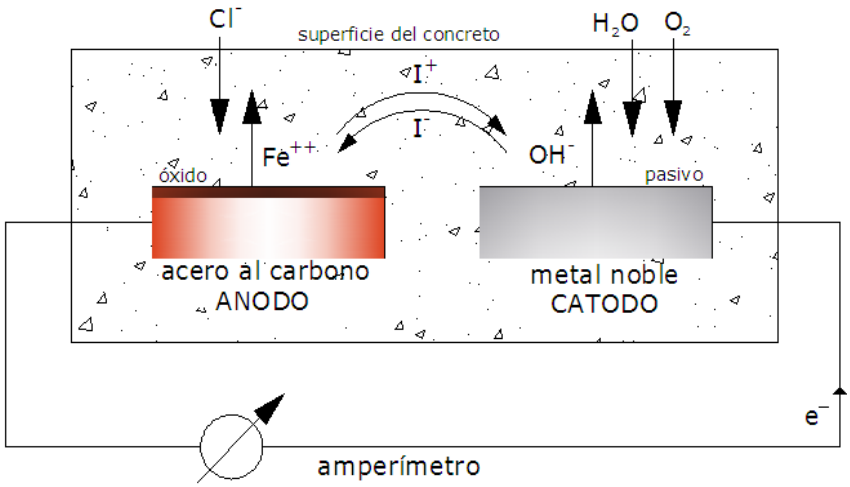


Figura No. 1.11 *Macrocelda de corrosión*

Para que se lleve a cabo la corrosión electroquímica de la macrocelda es necesario que ocurran dos procesos, las reacciones principales (ecuaciones 8, 9) son las siguientes:

Ánodo $Fe^0 \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (8)

Cátodo $O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4(OH)^-$ (9)

El proceso de corrosión en el ánodo involucra ambas reacciones, pero la corriente anódica es mayor que la corriente catódica, en el cátodo la corriente catódica es mayor que la anódica, con lo cual se conforma la macrocelda de corrosión.

Muchos son los factores que influyen en el funcionamiento de una macrocelda de corrosión en el concreto, como el diseño en la forma geométrica y tamaño de los sensores, la posición y colocación dentro de la zona de recubrimiento, así como la separación entre ánodos y cátodos pueden ocasionar el aumento o disminución en valores de corriente galvánica [45].

Por otro lado, las macroceldas de corrosión se han utilizado como técnica electroquímica para ciertos casos de estudio de materiales y usos de inhibidores dentro del concreto, esta técnica involucra la medición de la corriente pasando entre metales discontinuos embebidos dentro del concreto. Generalmente uno de los miembros está expuesto al mismo ambiente agresivo que el otro el cual llega a ser el cátodo. Dos métodos estandarizados para representar estas pruebas son: el Método de exposición del sur o meridional [46], y Método de ensayo para determinar los efectos de mezclas químicas sobre la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto expuesto a ambientes con cloruros.

Otra configuración involucra el uso de un cátodo inerte tales como el acero inoxidable o grafito. Esto permite realizar especímenes más pequeños donde los miembros pueden estar a la misma profundidad, dado que el cátodo no se corroe, por lo cual permite tener más cerca los ánodos y cátodos, disminuyendo los efectos de la resistencia del concreto.

La corriente de macrocelda está definida como la corriente entre los miembros anódicos y catódicos, y la medición de una apreciable

corriente de macrocelda es frecuentemente una buena indicación de que la corrosión se ha iniciado.

Los inconvenientes de esta técnica es que en caso de tener alta resistencia en el concreto las macroceldas no pueden ocurrir, o si el considerado como cátodo entran en corrosión, lo cual puede revertir el signo de la corriente esperada.

1.5 Técnicas Electroquímicas

El uso de técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio del acero de refuerzo embebido en concreto mediante señales eléctricas, y el análisis de la respuesta del sistema. La rapidez de medición y sensibilidad son algunas ventajas de las técnicas electroquímicas, además de ser pruebas no destructivas. Son varias las técnicas electroquímicas que se utilizan actualmente de las cuales solo se describen dos de ellas que se emplearon para el estudio y análisis en este proyecto de investigación:

- Medición de potencial (E_{corr})
- Ruido electroquímico (R_n)
- Resistencia a la polarización (R_p)
- Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)

Todas las técnicas aportan información acerca de las condiciones de la interfase acero-concreto, y con ello del grado de corrosión que se presente en la armadura, que se complementa con apreciaciones visuales de deterioro físico (manchas por herrumbre, agrietamiento y desprendimiento del concreto), y análisis químico (carbonatación y penetración de cloruros principalmente).

1.5.1 Potenciales de Corrosión (E_{corr})

Potencial es la diferencia de potencial de un electrodo (semi-pila o semi-elemento) definida con relación a otro electrodo específico, conocido por electrodo de referencia.

La definición de potencial de corrosión es el potencial de un electrodo que se corroe en un medio dado, sin flujo de corriente externa. Para el mismo concepto se emplean también los siguientes términos: potencial a circuito abierto; potencial de corrosión libre; potencial de reposo; potencial de abandono y potencial estacionario. El potencial de corrosión no es un potencial de equilibrio, pues aunque se da en él un equilibrio eléctrico, hay transformación neta de sustancia, con la

única condición de que exista equivalencia entre las velocidades globales de oxidación y reducción [47].

El potencial de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto es una magnitud que indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad del mismo. Es una magnitud probabilística del proceso que se está produciendo o no, por lo tanto no se deben obtener conclusiones cuantitativas debido a que está en función de muchas variables como el espesor de recubrimiento, el contenido de oxígeno y humedad dentro del concreto, presencia de grietas, resistividad, etc. La medición consiste en la determinación de la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de refuerzo y un electrodo de referencia externo, que se coloca sobre la superficie del concreto [31], figura 12.

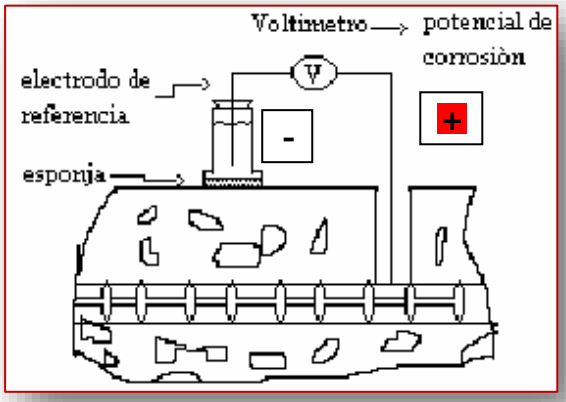


Figura No. 1.12 *Medición de Potencial*

El electrodo de referencia normalmente empleado es el de cobre-sulfato de cobre ($Cu/CuSO_4$). Para asegurar un buen contacto eléctrico entre el electrodo de referencia y el concreto se utiliza una esponja húmeda. Cualquier multímetro de alta impedancia es válido para realizar mediciones. El instrumento debe tener una precisión mínima de ±1 mV. La conexión de la terminal positiva (+) de un voltímetro de alta impedancia interna se conecta al acero de refuerzo (varilla corrugada) que es el electrodo de trabajo, y la otra terminal negativa o común (-) al electrodo de referencia posicionado sobre el concreto. El criterio de evaluación se realiza en base a los criterios establecidos por la norma ASTM C-876[48], Tabla VIII.

Tabla 1.VIII *Interpretación de resultados norma ASTM C 876-91*

Potenciales de corrosión (Ecorr)	Riesgo de daño (%)
< -200	10% de probabilidad de corrosión
-200 a -350	Cierta incertidumbre
> -350	90% de probabilidad de corrosión

En el caso de los Ecorr medidos a varillas de acero embebidas en concreto, aunque se tienen reportados intervalos de valores que aproximan al estado superficial del acero, es recomendable tomarlos con reserva, porque pueden conducir a juicios equivocados. Aparte de la medición de Ecorr, debe contarse con la profundidad de carbonatación, concentración de cloruros y condiciones de servicio, para elaborar un diagnóstico más confiable.

1.5.2 Ruido Electroquímico (R_n)

La técnica de Ruido Electroquímico se ha utilizado internacionalmente en forma creciente aproximadamente los últimos 20 años para el seguimiento y control de los procesos de corrosión. Esta técnica es muy útil para la detección y evaluación del comportamiento de la corrosión general y localizada [49]. Esta técnica es no destructiva ya que a diferencia de otras técnicas electroquímicas, no requiere de una perturbación externa, para analizar la señal de salida provocada por el proceso de corrosión, además de complementar y/o competir con otras técnicas electroquímicas como la de polarización lineal y espectroscopia de impedancia faradaica.

Los fundamentos con la tecnología de ruido electroquímico quedaron plasmados en trabajos originales llevados a cabo por Iverson [50], quien estudió los transitorios o cambios de voltaje producidos en metales y aleaciones usando instrumentación bastante rudimentaria. Subsecuentemente, los aspectos prácticos del ruido electroquímico fueron vueltos a revisar lo que condujo a una aplicación patentada original de ruido electroquímico [51]. La tecnología de ruido ha sido aplicada a una amplia variedad de problemas relacionados con la corrosión dentro del sector industrial como: la petroquímica, energía nuclear, generación de energía a base de combustibles fósiles, ingeniería civil, e industria aeroespacial. Los estudios dentro de la ingeniería civil estuvieron enfocados en la corrosión del acero de refuerzo en concreto y los primeros estudios estuvieron dados por J.L. Dawson, 1983; S.G. McKenzie, 1987; D.G. John and etal., 1987; G.K. Glass and etal., 1988; R.G. Hardon and etal. 1988 [52].

1.5.2.1 Definición de (R_n)

Se le denomina ruido electroquímico a las fluctuaciones aleatorias del potencial o de la corriente de un material sujeto a corrosión [53]. El potencial de ruido electroquímico es la fluctuación del potencial de un electrodo en relación a un electrodo de referencia y la corriente de ruido electroquímico es la fluctuación en corriente entre dos electrodos nominalmente idénticos [54].

1.5.2.2 Características del Ruido Electroquímico (R_n)

La información que se obtiene con las oscilaciones o fluctuaciones aleatorias de ruido electroquímico es en baja frecuencia del orden de <10 hz. La amplitud de las oscilaciones es pequeña fluctuando entre 1 mV, siendo sus desviaciones estándar del orden de μV a mV para el ruido en potencial, y las oscilaciones de 1 μA/cm^2 ó mayores para el ruido en corriente, con desviaciones estándar del orden de nA y μA [55].

El ruido de la corriente es asociada con los eventos de disolución discretos que ocurren sobre la superficie de un metal, mientras que el ruido del potencial es producido por la acción de la corriente de ruido sobre una impedancia interfacial [56]. Para evaluar el proceso de corrosión, ambos pueden ser monitoreados al mismo tiempo, el ruido en potencial y el ruido en corriente.

Para la medición de ruido electroquímico la instrumentación puede ser analógica o digital. El ruido en potencial es medido como las fluctuaciones del potencial de un electrodo de trabajo con respecto a un electrodo de referencia, el ruido en corriente generalmente es medido como la corriente de un par galvánico entre un electrodo de trabajo y un electrodo auxiliar, o dos electrodos nominalmente idénticos, con un amperímetro de resistencia cero para asegurar que los dos electrodos se encuentran al mismo potencial electrónico. La configuración de la celda es la siguiente, figura 13.

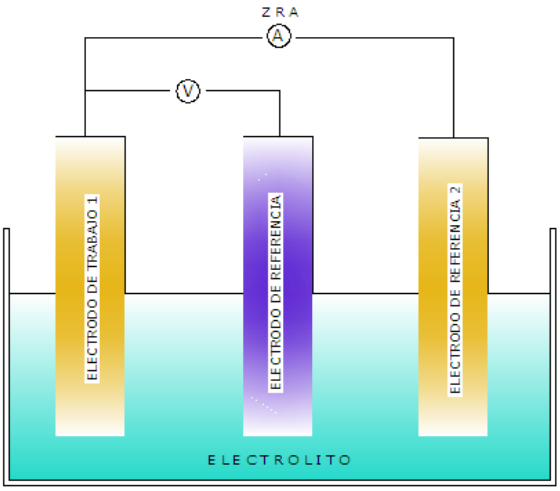


Figura No. 1.13 *Arreglo de celda para la determinación de ruido en potencial y corriente.*

Los parámetros básicos que deben ser determinados para esta técnica son el rango de frecuencias, número de puntos y la velocidad de muestreo.

La frecuencia más alta está determinada por el "Límite de Nyquist", que es la mitad de la frecuencia de muestreo:

$$f_{max} = \frac{1}{2\Delta T} \tag{10}$$

Donde:

ΔT, intervalo de muestreo

La frecuencia baja está dada por la siguiente expresión:

$$f_{max} = \frac{1}{\mathrm{N}\Delta T} \tag{11}$$

Donde:

N, número de muestras

1.5.2.3 Clasificación de Ruido Electroquímico

De acuerdo a la publicación de Hladky y colaboradores en 1982 [57] sobre resultados de avances para mejorar la técnica de medición e interpretación de datos en ruido electroquímico, clasificaron diferentes tipos de ruido:

Ruido Blanco: Originado por cambios de baja frecuencia en el medio ambiente, se observan como fluctuaciones lentas del potencial de corrosión. Es mayor de 1 Hz, no depende de la frecuencia y su precisión mejora con la raíz cuadrada del tiempo de muestreo.

Ruido de Baja Frecuencia: (1/f) ó rosa, relacionado con procesos superficiales de electrodo, caracterizado por su gran heterogeneidad. Grandes fluctuaciones de frecuencias menores o iguales a 1 Hz. La densidad de espectro varía con la frecuencia y su amplitud es mayor que la originada por los efectos de carga que la ocasionan.

Ruido Shot: Origina cambios de consecuencias, su densidad de espectro y cantidad de ruido presente, en una banda dada de baja amplitud, es constante sobre un intervalo de frecuencias.

Conforme a la morfología del fenómeno de corrosión, algunos investigadores clasificaron los tipos de corrosión de acuerdo con sus observaciones realizadas [58], las cuales son:

Corrosión Ligera o Pasivación: Caracterizado por bajas frecuencias y altas amplitudes. Procesos controlados por difusión, caracterizado por desviación estándar media ($1e^{-3}$, $1e^{-4}$ volts).

Corrosión Localizada ó Picado: Caracterizado por altas frecuencias y altas amplitudes. Procesos transitorios de rompimiento-repasivación,

caracterizado por un aumento en la desviación estándar o valores altos ($1e^{-3}$, $1e^{-2}$ volts).

Corrosión Generalizada: Altas frecuencias y bajas amplitudes. Procesos de transferencia de carga, caracterizada por una desviación estándar pequeña ($1e^{-5}$ volts ó menores).

1.5.2.4 Métodos de análisis: visual, estadístico y de frecuencia

Las series de tiempo son los datos obtenidos del ruido electroquímico, las cuales son las variaciones del potencial y corriente en el dominio del tiempo [$E_{(t)}$, $I_{(t)}$], ver figura 14.

El análisis visual es uno de los métodos más simples y más directos, al examinar las series de tiempo para identificar los detalles que son característicos de los tipos de corrosión particulares, como los transitorios de rompimiento y repasivación, o de oscilaciones asociadas a corrosión por rendijas ó corrosión por picaduras.

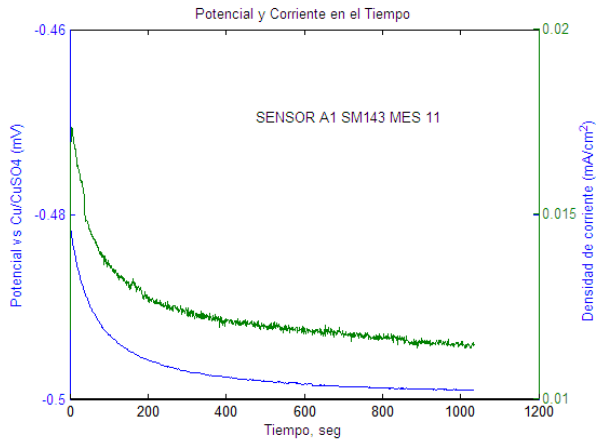


Figura No. 1.14 *Serie de Potencial y Corriente en el tiempo del acero 1017 embebido en concreto*

Uruchurtu Ch. en 1984[59] menciona que "el ruido electroquímico parece reflejar la suma individual de los eventos aleatorios, y su desviación estándar, se ha visto que provee la *huella dactilar* de la cantidad de metal disuelto, dependiendo de la combinación metal-medio ambiente"

El ruido electroquímico puede ser caracterizado por parámetros estadísticos comunes como la media, la varianza y la desviación estándar. En particular, la desviación estándar (σ), es usada como una medida de la amplitud de la variación dentro de la señal de ruido. El sesgo y la kurtosis algunas veces dan indicaciones del tipo de corrosión que esté ocurriendo [60]. La información de ruido en un tiempo de registro, la resistencia de ruido es:

$$R_n = \frac{\sigma_V}{\sigma_I} \quad (13)$$

Donde:
R_n, resistencia de ruido en ohms
σ_V, desviación estándar en potencial de la señal de ruido
σ_I, desviación estándar en corriente de la señal de ruido[61, 62]

Con la obtención de R_n se puede calcular la corriente de corrosión (I_{corr}) de acuerdo con la ecuación de Stern-Geary:

$$\mathrm{I_{corr}} = \frac{B}{R_n} \quad (14)$$

Donde:
I_{corr}, densidad de corriente en $\mu A/cm^2$
B, constante de Stern-Geary

La constante B puede adquirir los valores de 0.026 y 0.052, dependiendo del tipo de sistema a analizar [63]. Esta constante se relaciona con las constantes de Tafel o pendientes anódicas (b_a) y catódicas (b_c) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\mathrm{B} = \frac{\mathrm{b_a}\,.\mathrm{b_c}}{2.3(b_a+b_c)} \quad (15)$$

Donde:
b_a y b_c, constantes de Tafel (pendientes anódicas y catódicas).

Teniendo la I_{corr} se puede calcular la velocidad de corrosión V_{corr} con la siguiente ecuación propuesta por Sagües, A. en 1991:

$$V_{corr}\ (mm/año) = I_{corr}\ (\mu A/cm^2) * 0.011 \quad [63] \quad (16)$$

Otro dato estadístico muy importante se puede encontrar para el análisis del ruido en corriente, el cual es la razón del valor de la desviación estándar en corriente (σ_I) y la raíz media cuadrática (i_{rms}), llamado "Índice de localización ó picado" (I.L. ó I.P), quedando la expresión como sigue:

$$I.L = \frac{\sigma_I}{i_{rms}} \quad (17)$$

Estos valores de índice de localización (I.L.), indican si el tipo de corrosión desarrollado en el sistema es localizado, generalizado ó mixto. Estos niveles en valores de I.L se representan en la tabla IX.

Tabla 1.IX *Niveles por índice de localización [64].*

Índice de Localización	Tipo de corrosión
0.001-0.01	**Generalizada**
0.01-0.1	**Mixta**
0.1-1.0	**Localizada**
>1	**Muy elevada**

Generalmente se hace un análisis espectral del ruido electroquímico que provee información adicional cualitativa acerca del proceso de corrosión, y con ello se determina un número posible de factores que describen el comportamiento del sistema.
Para el análisis del dominio de la frecuencia se requiere de la estimación espectral, el cual es el proceso de estimación de la fuerza ó potencia presente en las diversas frecuencias. Para una gráfica donde se grafica la potencia en función de la frecuencia, es conocido como potencia del espectro, figura 15.

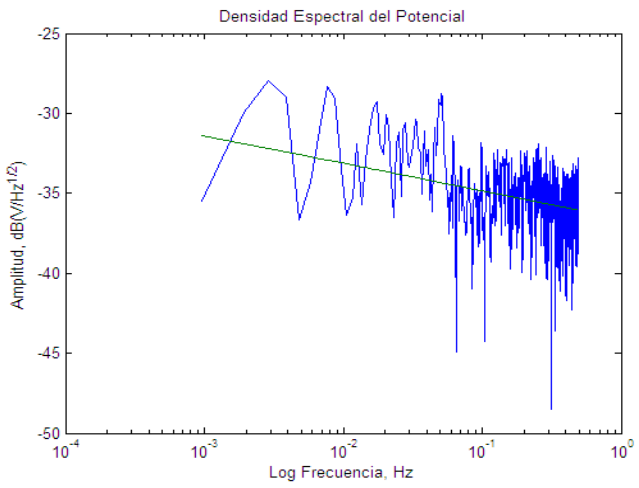


Figura No. 1.15 *Típica Potencia de la Densidad Espectral*

Dos métodos son comúnmente usados en los estudios de ruido electroquímico para estimar la potencia del espectro:

1. Se grafica el logaritmo de la amplitud de la densidad espectral vs. el logaritmo de la frecuencia, utilizando *la transformada rápida de Fourier (FFT).*
2. *Método de la Máxima entropía (MEM)* que maximiza la información obtenida, y no supone los registros de tiempo como periódicos.

El primero produce espectros ruidosos, mientras que el segundo los produce más lisos. Este análisis consiste en pasar los datos obtenidos en el dominio del tiempo de la frecuencia, a través de la FFT. La densidad espectral se obtiene al multiplicar las componentes real e imaginaria de la FFT por su conjugado complejo, y dividir entre el número de muestras en la serie de tiempo.

$$PSD = \frac{\mathrm{ZXZ}^*}{N} \tag{18}$$

En la actualidad existen programas disponibles para ejecutar los procedimientos anteriormente mencionados, elaborados por expertos dentro del área [65].

Dependiendo de los valores de las pendientes obtenidas en los espectros de frecuencia para el voltaje o la corriente, se puede establecer qué fenómeno de corrosión se está desarrollando en el sistema, como se muestra en la Tabla X [66].

Tabla 1.X *Tipos de corrosión en función de la pendiente del espectro de frecuencia.*

Tipo de corrosión	**PENDIENTE (dB[V/Hz$^{1/2}$]/década)**		**PENDIENTE (dB[AHz$^{1/2}$]/década)**	
	Máx.	***Min.***	***Máx.***	***Min.***
Pasivación	**-15**	**-25**	**1**	**-1**
Picado	**-20**	**-25**	**-7**	**-14**
Uniforme	**0**	**-7**	**0**	**-7**

CAPÍTULO DOS

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El desarrollo de la experimentación se llevó a cabo dentro de los laboratorios de Corrosión y Protección del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV, S.C.).

2.1 Nomenclatura de Especímenes

Para el desarrollo del proyecto de investigación de sensores de macrocelda (acero/acero-inoxidable), embebido en concreto reforzado, se diseñaron vigas de concreto con armadura de acero al carbono (varillas corrugadas y estribos). Estas vigas fueron identificadas mediante una nomenclatura que describe al ambiente ó electrolito empleado, número de sensor, relación agua-cemento, y el diámetro de la varilla, como se muestra en el siguiente ejemplo:

AP143

Donde:
AP: Agua Potable (ambiente)
1: Sensor no. 1
4: Relación agua-cemento (a/c=0.40)
3: Diámetro de varilla corrugada (Φ=3/8”)*

SM861

Donde:
SM: Salmuera (solución de NaCl al 5%)
8: Sensor no. 8
6: Relación agua-cemento (a/c=0.60)
1: Diámetro de varilla corrugada (Φ=1/2”)*

*Se emplea el numerador para referenciar el diámetro de la varilla

Se elaboraron un total de 16 vigas de concreto reforzado, con sus respectivos sensores embebidos, colocados sobre la armadura; cada viga con su nomenclatura e identificada con una etiqueta de color para cada ambiente, tabla I.

Tabla 2.I *Nomenclatura de vigas*

Electrolito: Agua Potable	Electrolito: Salmuera
Etiqueta Amarilla	Etiqueta Roja
AP143	SM143
AP243	SM243
AP341	SM341
AP441	SM441
AP563	SM563
AP663	SM663
AP761	SM761
AP861	SM861

2.2 Materiales para el diseño de vigas

Las vigas de concreto armado con sensores embebidos, con dimensiones de 17x20x30cm, fueron preparadas con una armadura de varillas corrugadas de acero al carbono de 3/8" y ½" de diámetro, y estribos de acero al carbono (alambrón) de ¼" de diámetro, sujetadas con alambre de amarre de acero recocido. Estas armaduras fueron embebidas con un recubrimiento de concreto de 3.5cm en ambas caras principales expuestas a la penetración de cloruros, las otras cuatro caras laterales se sellaron primero con un pulido de cemento, recubriéndolos posteriormente con impermeabilizante asfáltico base solvente (TOP 2000), para garantizar el sellado impermeable de estas caras, para evitar la penetración de agentes agresivos (figura 1).

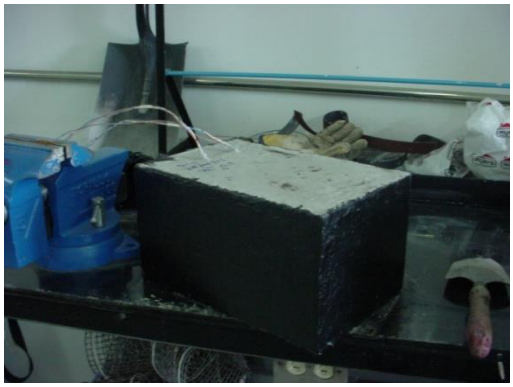


Figura No. 2.1 *Viga de concreto armado con sensor embebido.*

2.2.1 Diseño de mezclas para el concreto

Los materiales empleados para la elaboración de las vigas fue a base de cemento Pórtland ordinario (CPO 30R) [67], agua potable, grava triturada con tamaño máximo de agregado de 19 mm (3/4"), agregado fino con módulo de finura de 2.71. La relación agua-cemento fue de 0.60 y 0.40, con respecto al peso del cemento (Tabla

II), colado bajo la norma Mexicana C-159, y curado bajo agua durante 28 días para alcanzar su máxima resistencia teórica [68]. Cabe señalar que no se utilizó ningún aditivo, ni adiciones a la mezcla.

Tabla 2.II *Dosificación del concreto ((kg/m^{3}concreto)/proporción)*

Mezcla	Cemento	Agua	Grava	Arena	Aditivo
a/c 0.60	324	209	1035	765	Sin Aditivos
a/c 0.40	513	209	1035	606	Sin Aditivos

2.2.2 Cemento

El Cemento Portland Ordinario (CPO 30R) que se empleó para el concreto tiene la propiedad de inhibir la reacción álcali agregado, ya que contiene no más del 0.6% de álcalis totales. Asimismo, posee moderada resistencia a los sulfatos porque contiene no más de 8% de aluminato tricálcico (C_3A), por lo que se puede utilizar en estructuras normales o en miembros expuestos a suelos o agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal pero no severa (figura 2). Elaborado bajo la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004 "Industria de la Construcción –Cementos Hidráulicos– Especificaciones y métodos de prueba".

Figura No. 2.2 *Cemento Portland CPO 30R*

2.3 Sensores de corrosión

Los transductores empleados fueron sensores galvánicos formados por materiales de distinta composición química (ánodos de acero al carbono y cátodo de acero inoxidable).

2.3.1 Diseño de macroceldas

Un arreglo tipo escalera de ánodos fue embebido en cada viga, las características principales fueron su relación de áreas

(ánodo/cátodo), posición geométrica con respecto a la superficie del concreto, y distancias ánodo-cátodo, figura 3.

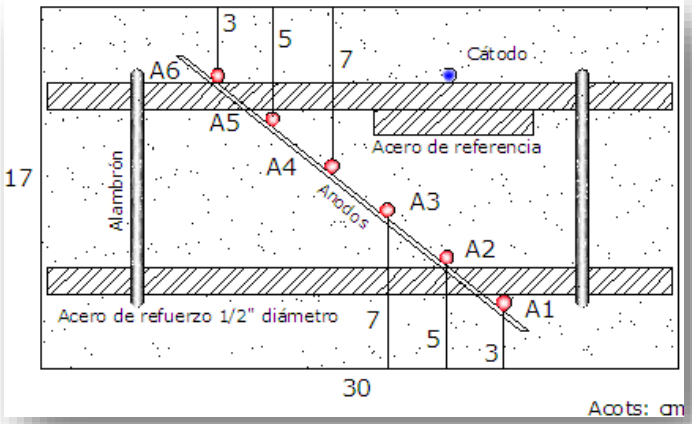


Figura No. 2.3 *Posición geométrica de sensores*

Por lo tanto, las características principales de las macroceldas son las siguientes:

- Proporción de áreas expuestas (ánodo/cátodo): 1:10
- Profundidad con respecto a la superficie del concreto (ambas caras expuestas):
  A1, A6 3.0 cm
  A2, A5 5.0 cm
  A3, A7 7.0 cm
- Distancias entre ánodo-cátodo:
  A1, A6 11.0 cm
  A2, A5 8.5 cm
  A3, A7 7.0 cm

2.3.2 Ánodo

Elemento principal que consta de 6 ánodos individuales de barras pulidas de acero al carbono de ¼" de diámetro, montados sobre dos soportes metálicos y sujetados con grapas perro, todos aislados con plásticos (manguera tipo industrial). Cada ánodo individual está conectado con alambres de cobre en ambos lados, para la verificación por continuidad eléctrica antes y después de ser embebidos dentro del concreto. El ánodo individual es una barra pulida de acero al carbono con 2 cm de largo por 1/4" de diámetro, su área expuesta es de 4 cm^2, con una separación entre ellos de 3 cm. Los ánodos extremos fueron más largos (con la misma área de exposición), mismos que sirvieron de base para montarlos como soporte del sensor (escalera de ánodos) sobre la armadura de la viga (ver figura 4).

Figura No. 2.4 *Ánodos de acero al carbono*

2.3.3 Cátodo

El cátodo individual es una barra de acero inoxidable pulido (304) con longitud de 20 cm por ¼" de diámetro. La conexión eléctrica fue mediante alambres de cobre en un extremo, con dos hilos cada uno para su verificación por continuidad eléctrica, y aisladas en dos partes o áreas mínimas para su montaje sobre la armadura (figura 5).

Figura No. 2.5 *Cátodos de acero inoxidable*

2.3.4 Acero de referencia

El acero de referencia es del mismo material que el acero de refuerzo, con longitud de 7.5 cm por 3/8" y ½" de diámetro. El acero de referencia tiene contacto eléctrico con el acero de refuerzo, conectado por dos alambres de cobre para su prueba de continuidad eléctrica y monitoreo externo (figura 6).

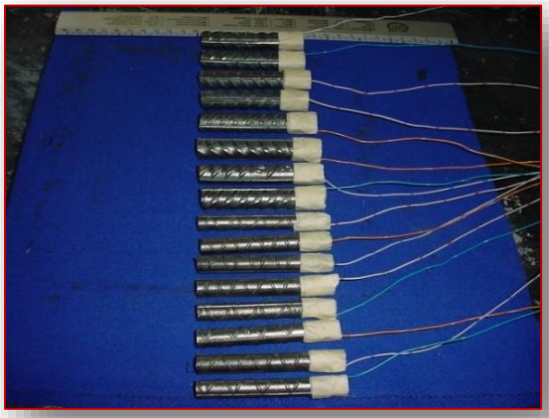


Figura No. 2.6 *Aceros de Referencia*

2.4 Elaboración de vigas armadas con sensores

Se elaboraron un total de 16 vigas de concreto reforzado con 16 sensores galvánicos embebidos, dispuestos en forma de escalera con seis ánodos, un cátodo y un acero de referencia para cada viga.

2.4.1 Armadura y sensores

Los materiales para cada armadura fueron los siguientes:

- 4 varillas corrugadas
- 2 estribos
- Alambre de amarre

El procedimiento fue armar una columna con las varillas y los estribos con alambre de amarre. Teniendo la armadura se procedió a la elaboración de los sensores, los cuales emplearon los siguientes materiales para cada uno de ellos:

- 6 Ánodos individuales
- 1 Cátodo de acero inoxidable
- 1 Acero de referencia
- 8 Pares de Alambre de cobre (2 alambres cada par)
- 12 Grapas perro
- 2 Soportes metálicos
- 14 Corbatillas de plástico
- Manguera tipo industrial

El procedimiento para su elaboración fue el siguiente: primero se procedió a cortar las piezas como los soportes metálicos los cuales fueron perforados para la sujeción con grapas perro, ánodos, cátodos y acero de referencia; posteriormente se procedió al aislamiento necesario (con la manguera tipo industrial) de ánodos y cátodos con sus conexiones eléctricas respectivas de alambre de cobre (figura 7), para posteriormente armar la escalera de ánodos sujetando estas piezas con las grapas perro.

(a) **(b)**

Figura No. 2.7 *(a) Elaboración de soporte, (b) Aislado de conexiones eléctricas.*

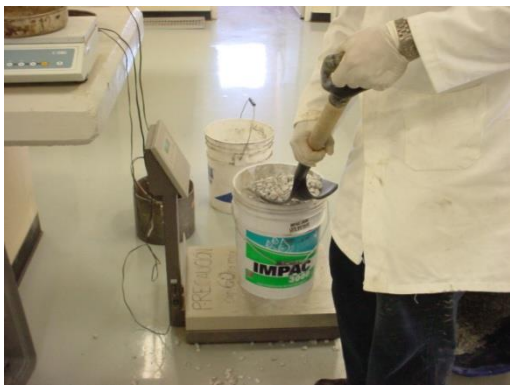
La escalera de ánodos, cátodo y acero de referencia, son fijados sobre la armadura como se muestra en la figura 8, la escalera se apoya con los ánodos extremos sobre las varillas de acero de refuerzo y atraviesa toda la viga, quedando estos más próximos a la superficie del concreto (suponiendo que al ser activados los ánodos extremos, en la zona de recubrimiento del acero de refuerzo es muy probable que al mismo tiempo se estará activando la armadura), el cátodo está sujeto perpendicularmente a las varillas de acero de refuerzo, lo más próximo a la superficie del concreto (con el objeto de tener más cercas la disposición del oxígeno) y en forma paralela a los ánodos de la escalera y estribos. Por último el acero de referencia se sujeta paralelamente a una de las varillas. Todos estos elementos son sujetados con las corbatillas de plástico. Finalmente se procedió a darle un recubrimiento con pintura base aceite en las partes donde no se necesitaba que fueran atacados por los agentes agresivos (caras no expuestas), probando la continuidad del sensor ya instalado.

Figura No. 2.8 *Fijación de la escalera de ánodos y prueba de continuidad en sensores*

2.4.2 Colado de vigas

Para colado de las vigas se realizó siguiendo los procedimientos de la Norma Mexicana C-159 [69], ya teniendo preparado la cimbra de madera con aceite untado en su interior, esto para la fácil extracción del espécimen ya seco. Se procedió a pesar los materiales de la mezcla mediante una balanza digital (figura 9).

(a)



(b)

Figura No. 2.9 *(a) Cimbra de madera, (b) pesaje de materiales*

Para el seguimiento del mezclado después de pesar los materiales, se humedeció la revolvedora y se dosificó en la olla en el orden como sigue: agua, agregado grueso, cemento y agregado fino. Se dieron tres minutos de revoltura a la muestra, luego se dejó reposar la revolvedora por dos minutos, tapando la boca de la misma con una jerga húmeda, posteriormente se reinició el remezclado por tres minutos más, por último se vació el concreto. La colada se realizó con ayuda de carretilla, cucharas, varillas de acero y martillo de goma. El vaciado de las vigas se ejecutó en capas, varillando cada capa, y golpeando los lados para un mejor acomodo de las partículas (figura 10), teniendo debido cuidado de conservar los recubrimientos especificados.

(a)

(b)

Figura No. 2.10 *(a) Revolvedora de 1 saco, (b) prueba de continuidad después del colado*

2.5 Recubrimientos

El recubrimiento de las cuatro laterales de las vigas (figuras 11 y 12), se realizó primeramente con un pulido de cemento para sellar los poros del concreto, posteriormente se recubrió con un impermeabilizante asfáltico base solvente (TOP 2000). A las que se sumergieron en el electrolito con salmuera se les dio doble capa de impermeabilizante para garantizar el buen sellado. Solamente las caras principales quedaron expuestas al ambiente, con la finalidad que ahí se lleve la difusión de los agentes agresivos, y se desencadene la corrosión del sistema.

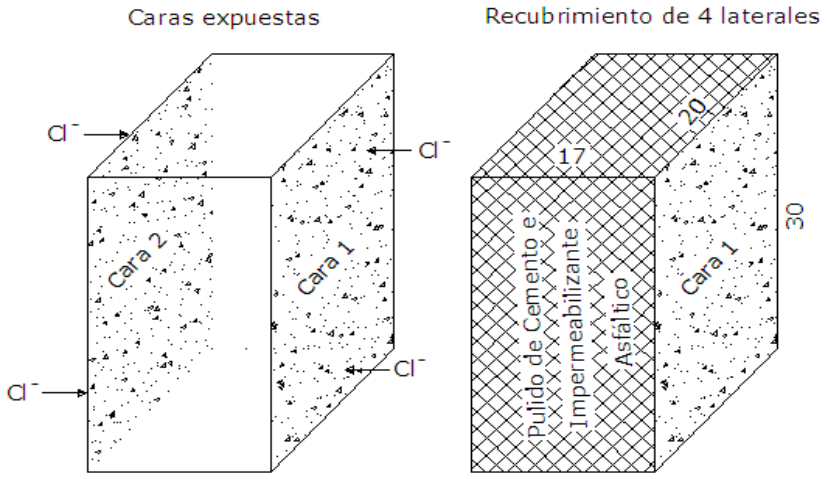
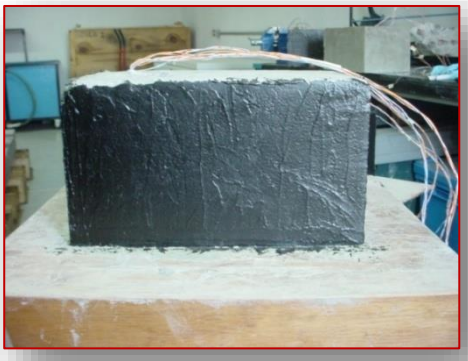


Figura No. 2.11 *Esquema de caras expuestas y selladas con cemento portland e impermeabilizante asfáltico*

(a)



(b)

Figura No. 2.12 *(a) Pulido con cemento, (b) Recubrimiento con impermeabilizante asfáltico*

2.6 Curado

El curado del las vigas se llevó a cabo posterior a los recubrimientos necesarios. Estas fueron curadas bajo agua durante 28 días, conforme a la norma ASTM C 192/C 192M-98 [70], cuidando que el nivel del agua no fuese a disminuir y producir un mal curado durante el tiempo de inmersión (figura 13), el agua empleada fue agua potable de la red de la ciudad, y el lugar de curado bajo ambiente de laboratorio.

Figura No. 2.13 *Curado de vigas bajo agua*

2.7 Electrolitos

Los electrolitos o ambientes empleados fueron: agua potable de la red (blanco), y una solución de NaCl al 5% en peso (ambiente agresivo). Se prepararon dos albercas para su exposición, quedando ocho vigas para cada ambiente (figura 14).

(a)

(b)

Figura No. 2.14 *Vigas en ambientes de (a) Agua Potable y (b) Salmuera*

2.8 Procedimiento del ensayo

El monitoreo con técnicas electroquímicas se llevó a cabo bajo ambiente de laboratorio, realizándose al principio mediciones dos veces por semana y tomando los valores promedios cada mes, tanto de potenciales de corrosión, como el monitoreo de los potenciales y corrientes de macrocelda. La técnica de ruido electroquímico se empleó a partir del mes 10, para prever si ciertamente era probable la corrosión en los sensores y acero de refuerzo con los datos arrojados por las técnicas de potenciales a circuito abierto.

2.8.1 Equipos de medición

El monitoreo de las probetas se realizó empleando un Multímetro de alta impedancia FLUKE 87 III, midiendo las señales de corriente y

voltajes de macrocelda generadas dentro del concreto mediante un circuito corto externo, así como los potenciales de corrosión empleando un electrodo de referencia externo de Cobre-Sulfato de Cobre ($Cu/CuSO_4$). Para el monitoreo con Ruido Electroquímico se empleó un Potenciostato/Galvanostato SOLARTRON 1285.

2.8.2 Multímetro de alta impedancia

Los multímetros analógicos son instrumentos de laboratorio y de campo muy útiles y versátiles, capaces de medir voltajes (en CD y CA), corriente, resistencia, ganancia de transistor, caída de voltaje en los diodos, capacitancia e impedancia. Se les llama por lo general *multímetros* (en inglés se les llama VOM, volt ohm milliammeters) [71].

El Multímetro que se utilizó para este proyecto de investigación fue el Multímetro de alta Impedancia "Fluke" de la serie 87 III (figura 15), el cual dispone de un modo de visualización de 4.5 dígitos como opción al encendido, tensión y corriente alterna AC de verdadero valor eficaz, con modo de detección de picos de 1ms. Y entre algunas de las características generales de la serie 80 son:

- Modo de registro Min/Max/Promedio, con aviso Min/Max, almacena la lectura máxima, mínima y el promedio de 36 horas de todas las lecturas
- Medidas de frecuencia, ciclos de trabajo y capacidad
- Protección de entrada hasta 1000V eficaces
- La pantalla analógica se actualiza 40 veces por segundo

Figura No. 2.15 *Multímetro FLUKE 87 III*

Las mediciones de voltaje se pueden efectuar sobre el rango de 0.4 mV hasta 1000 V con exactitudes de 0.1 por ciento. Las mediciones de corriente se pueden llevar a cabo desde 0.1 μA hasta 10 A con exactitudes de 0.2 por ciento. Se miden resistencias tan altas como 40 MΩ con una exactitud de 1 por cierto. (Se debe hacer notar que al hacer mediciones de resistencias altas, nunca se debe tocar la punta de medición con los dedos debido a que la resistencia de la piel es de solo algunos miles de ohms, y esto puede originar errores serios en la medición). Las mediciones de resistencia menores tienen una exactitud de 1 por ciento.

2.8.3 Potenciostato/Galvanostáto

El equipo empleado para el monitoreo de Ruido Electroquímico (R_n), Solartron 1285 (figura 16), se combina para la mediciones con el software de alta calidad "CorrWare for Windows™", que en conjunto con una PC permiten determinar con facilidad un espectro completo con técnicas de medición de corriente directa, como el ruido electroquímico.

Entre sus características generales están:

- Fuente, interruptor seleccionable: 90-110V, 108-132V, 198-242V, 216-264V, 48 a 65Hz
- Consumo: 150VA
- Temperatura de operación: 0 a 50°C
- Temperatura de almacenaje: -30 a 70°C
- Temperatura de limites específicos: 10 a 30°C
- Humedad, sin condensar: 95% a 40°C
- Seguridad cumpliendo con: IEC 1010
- Dimensiones: 432X472X108 mm, peso 11 kgs.

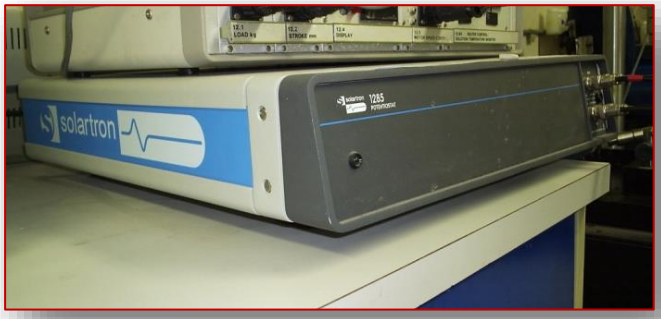


Figura No. 2.16 *Potenciostato/Galvanostáto 1285*

2.8.4 Electrodo de Referencia

El electrodo de referencia que se empleó para este proyecto fue el de cobre-sulfato de cobre $Cu/CuSO_4$, el cual es formado por una barra cilíndrica de cobre (Cu) inmersa en una solución de $CuSO_4$ saturada, teniendo su contacto eléctrico con el ambiente mediante un tapón de madera de balsa.

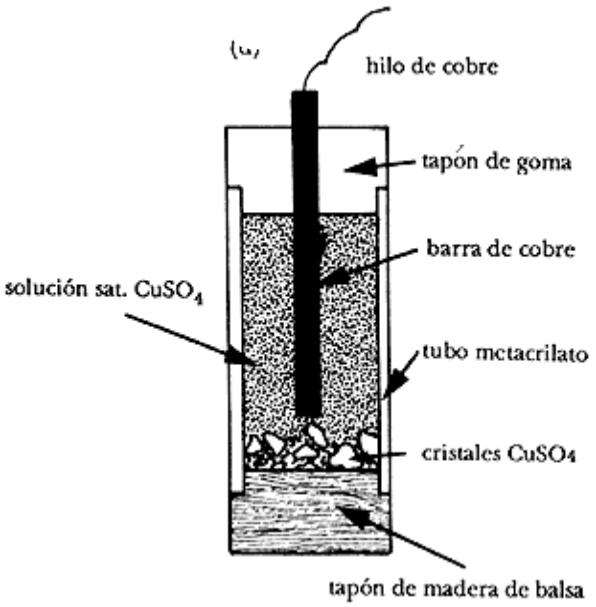
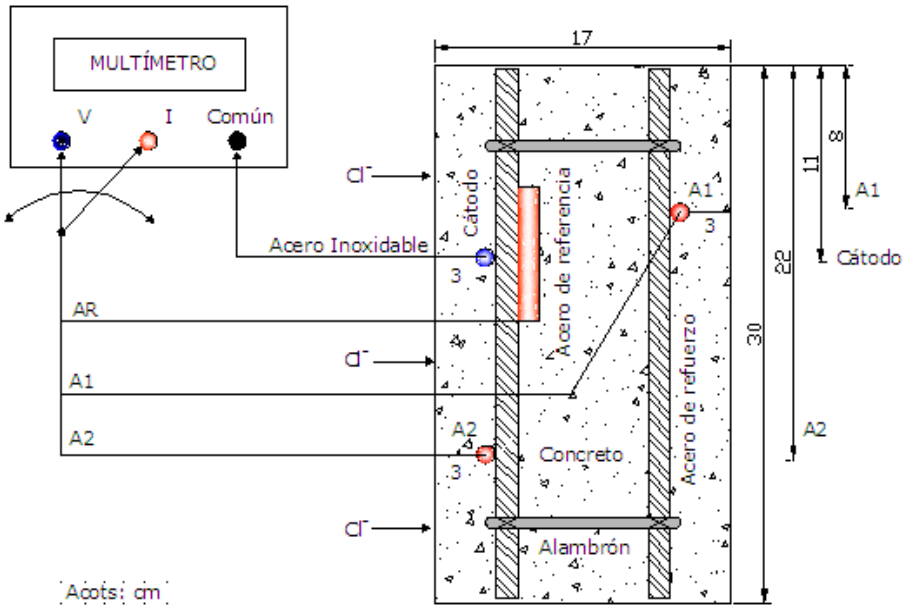


Figura No. 2.17 *Electrodo de referencia Cu/$CuSO_4$*

2.8.5 Potenciales, corrientes de macrocelda y potenciales de corrosión:

Se monitorearon los potenciales y corrientes individuales de ánodos (A1- A6) y acero de referencia (AR) con respecto al cátodo (C), los potenciales de corrosión con respecto al electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre(Cu/$CuSO_4$) utilizando las mismas varillas de refuerzo (AR), ánodos (A1-A6) y cátodos (C) del sensor, como electrodo de trabajo (figura 18).

(a)



(b)

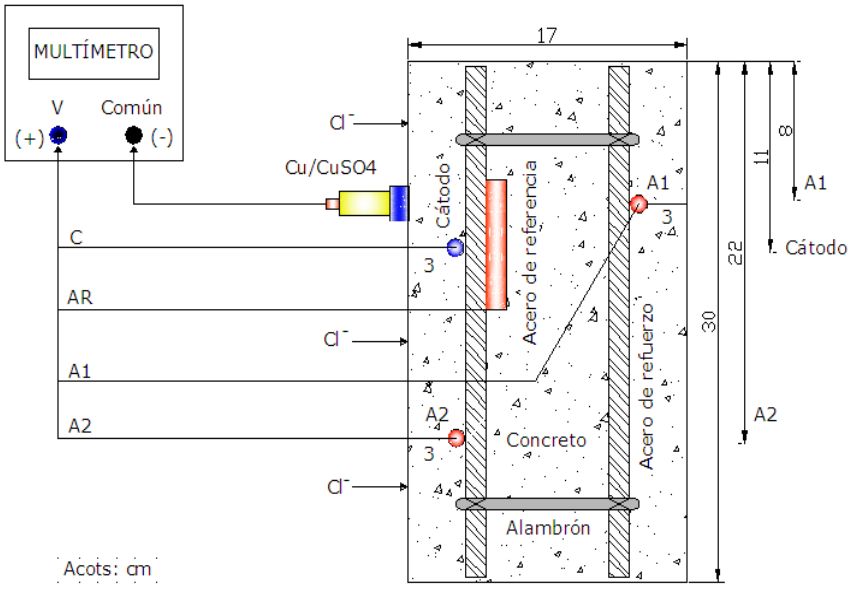


Figura No. 2.18 *(a) Monitoreo de Potenciales y Corrientes de Macrocelda, (b) Potenciales de Corrosión*

2.8.6 Ruido electroquímico:

La estimación del efecto de los cloruros sobre los sensores y acero de refuerzo dentro del concreto se realizó con pruebas de ruido electroquímico, empleando un Potenciostato/Galvanostato SOLARTRON 1285 durante 9 meses (A partir del mes 10 hasta el mes 18). Esta técnica moderna permite la detección y evaluación del comportamiento de la corrosión general y localizada. Los resultados fueron analizados visual y estadísticamente mediante el programa MATLAB 6.5, el arreglo del monitoreo se muestra en la figura 19.

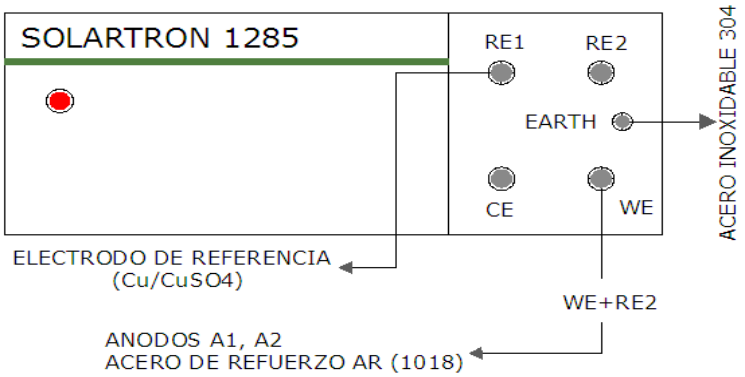


Figura No. 2.19 *Arreglo para monitoreo de Ruido Electroquímico, (RE) Electrodo de referencia 1 y 2, (WE) Electrodo de Trabajo, (EARTH) Tierra, (CE) Contra-electrodo.*

2.9 Procedimiento para pruebas químicas y físicas

Se realizaron pruebas químicas para el análisis de la composición de los materiales del sensor y el acero de refuerzo, así como la prueba de cloruros en las vigas de concreto. La prueba física fue el ensaye a compresión del concreto, todo esto para dar un resultado más confiable al proyecto de investigación.

2.9.1 Procedimiento para el análisis químico de elementos

Para el análisis de la composición química de elementos del sensor se prepararon muestras de 3 grs. (figura 20) del material anódico, catódico y el acero de refuerzo, así como también de los soportes y grapas perro de la escalera de ánodos, todo para prever posibles pares galvánicos de los materiales que estuvieran en contacto.

Figura No. 2.20 *Preparación de muestras*

El procedimiento para el análisis se llevó a cabo mediante una digestión ácida en el microondas marca (CEM modelo MDS-200), donde se aplicó el método STILL, que consistió en la preparación de 0.5 grs. de cada muestra con HCl, HNO_3, HF y HBO_3, la cual

posteriormente se filtró y aforó antes de hacer el análisis o lectura de elementos por Espectrometría de Emisión por Plasma (ICP-OES, modelo IRIS-AP), Espectrofotometría de Absorción Atómica (FAA modelo AVANTA SIGMA) y Analizador Elemental (modelo EA-1110) [72], figuras 21 y 22.

(a) **(b)**

Figura No. 2.21 *(a) Espectrometría de Emisión por Plasma (ICP-OES), (b) Espectrofotometría de Absorción Atómica (FFA).*

Figura No. 2.22 *Analizador Elemental CHNS-O*

2.9.2 Ensayo del contenido de iones cloruro en el concreto

El análisis químico del contenido de cloruros libres del concreto a 3 cm de profundidad se realizó extrayendo muestras pulverizadas cerca de los ánodos y acero de refuerzo 30 grs. de cada muestra (figura 23) fueron mezclados con 2 ml de cloruro férrico amoniacal (100g/L), 47.9 ml de H_2O y 0.1 ml de hidróxido de amonio; esta mezcla se dejó agitando durante 12 hrs. en un agitador múltiple, filtrado posteriormente con papel filtro No. 40 Whatman, desechando los primeros 10 mL y reteniendo el sobrante (figura 24).

Figura No. 2.23 *Extracción de muestras para la prueba de cloruros*

(a)

(b)

Figura No. 2.24 *(a) Agitador Múltiple, (b) Filtrado*

Los cloruros libres de la muestra fueron determinados mediante la prueba de titulación (figura 25), acidificando una alicuota de la muestra (10-mL) con 3 a 5 mL de HNO_3, agregando un volumen conocido de solución $AgNO_3$ 0.1 *N* que debe estar en exceso para precipitar los cloruros, la cual se calienta hasta hervir para coagular los cloruros de plata (AgCl). Por último se agita vigorosamente la muestra hasta enfriar a temperatura ambiente para posteriormente agregar la solución indicadora de Volhard, y se titula el exceso de $AgNO_3$ con una solución de tiocianato de amonio con una concentración de 0.1 *N* NH_4SCN [73]. La cantidad de iones cloruro totales se calculó en %.

Figura No. 2.25 *Titulación de la muestra*

2.9.3 Ensaye a compresión simple

Las probetas de concreto para ensaye a compresión se elaboraron con dos relaciones agua-cemento (0.40 y 0.60), de forma cilíndrica con dimensiones de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, de acuerdo a la norma ASTM C 39-96 [74], y curado bajo agua durante 28 días. Se elaboraron en total 3 probetas con relación a/c de 0.40 y tres con relación a/c de 0.60.

2.9.3.1 Elaboración de probetas

La metodología empleada en su elaboración fue la siguiente:

Se inició con la preparación de la cimbra cilíndrica a base de tubos de PVC, sujetados con abrazaderas metálicas y varillas roscadas sobre una base de acrílico. Posteriormente se realizó el pesaje de materiales: agregados, agua y cemento (figura 26). La mezcla se elaboró conforme a la norma mexicana NMX C-159, empleando una revolvedora de un saco.

Figura No. 2.26 *Preparación de cimbra y pesaje de materiales*

Teniendo ya el concreto elaborado, se vaciaron dentro de las cimbras cilíndricas procediendo al varillado del concreto para mejor compactación y enrasando su superficie con una regla de madera (figura 27). El curado de dichas probetas se hizo bajo agua con forme a la norma ASTM C 192/C 192M-98.

Figura No. 2.27 *Colado, varillado y enrasado de cilindros*

Para la nivelación de probetas se realizó el cabezeado (figura 28) antes del ensaye a compresión simple, empleando azufre como elemento nivelador, este material se calienta en estufa derritiéndolo y luego vaciando en molduras propias, dejándolo secar hasta solidificarse.

Figura No. 2.28 *Cabezeado con azufre de cilindros de concreto*

2.9.3.2 Prensa Hidráulica

El ensaye de las probetas de concreto a compresión fue realizado para las probetas en una Prensa Hidráulica Eléctrica Universal con capacidad de 120 Toneladas (Modelo ELVEC), equipada con bomba Modelo CT-715H (figura 29).

Figura No. 2.29 *Prensa Hidráulica Eléctric*

2.9.3.3 Fractura de probetas

Las probetas de concreto fueron colocadas sobre la prensa hasta el punto de contacto en ambos extremos, y se le aplicó una velocidad de carga constante de 5.3 KN/seg. Verificando después de su colapso (figuras 30 y 31), la carga límite alcanzada en toneladas. Se ensayaron un total de 3 probetas por cada relación agua-cemento, para obtener el valor promedio para cada relación agua-cemento.

Figura No. 2.30 *Cilindros con relación a/c 0.4*

Figura No. 2.31 *Cilindros con relación a/c 0.60*

CAPÍTULO TRES

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se da el análisis de los resultados obtenidos de los 16 especímenes inmersos en sus respectivos ambientes, correspondientes a los 18 meses de monitoreo del desarrollo experimental.

Se presentan los resultados de acuerdo al orden de monitoreo realizado: primero se interpretarán los resultados de Potenciales y Corrientes de Macrocelda, en segundo lugar los resultados de las evaluaciones con técnicas electroquímicas. Se hace una comparativa entre los Potenciales de corrosión y los potenciales de macrocelda. La técnica de ruido electroquímico se empleó para verificar si la corrosión existe, la magnitud y el tipo de corrosión presente en el sistema; analizando las expuestas en agua potable y en salmuera para ir comparando los resultados obtenidos. Cabe destacar que las gráficas muestran todos los resultados obtenidos de cada sensor dentro de la viga, tanto para los que están posicionados dentro de la zona de recubrimiento y tienen alto riesgo de ser atacados por corrosión (A1, A6), como para los que están en una zona de bajo riesgo de corrosión (A2, A3, A4, A5). No así para los resultados obtenidos con la técnica de ruido electroquímico donde solo se mostrarán para aquellos sensores dentro de la zona de recubrimiento. En cuanto al acero de refuerzo (AR) se presentan todos los resultados del monitoreo con los sensores y con ruido electroquímico. Todas las gráficas restantes se presentarán dentro de los anexos A y B de esta tesis.

3.1 Análisis de sensores de corrosión

En esta sección se presentan los resultados de las macroceldas con respecto al tiempo de inmersión en los dos ambientes a las que

estuvieron expuestos, primero se exponen las gráficas para las vigas de relación agua-cemento de 0.40 y posteriormente las vigas con relación agua-cemento de 0.60, mostrando los resultados de los potenciales de macrocelda (técnica alternativa para medir potenciales de corrosión), y las corrientes de macrocelda del sistema de sensores.

3.1.1 Potenciales de macrocelda con respecto al electrodo de referencia del acero inoxidable embebido.

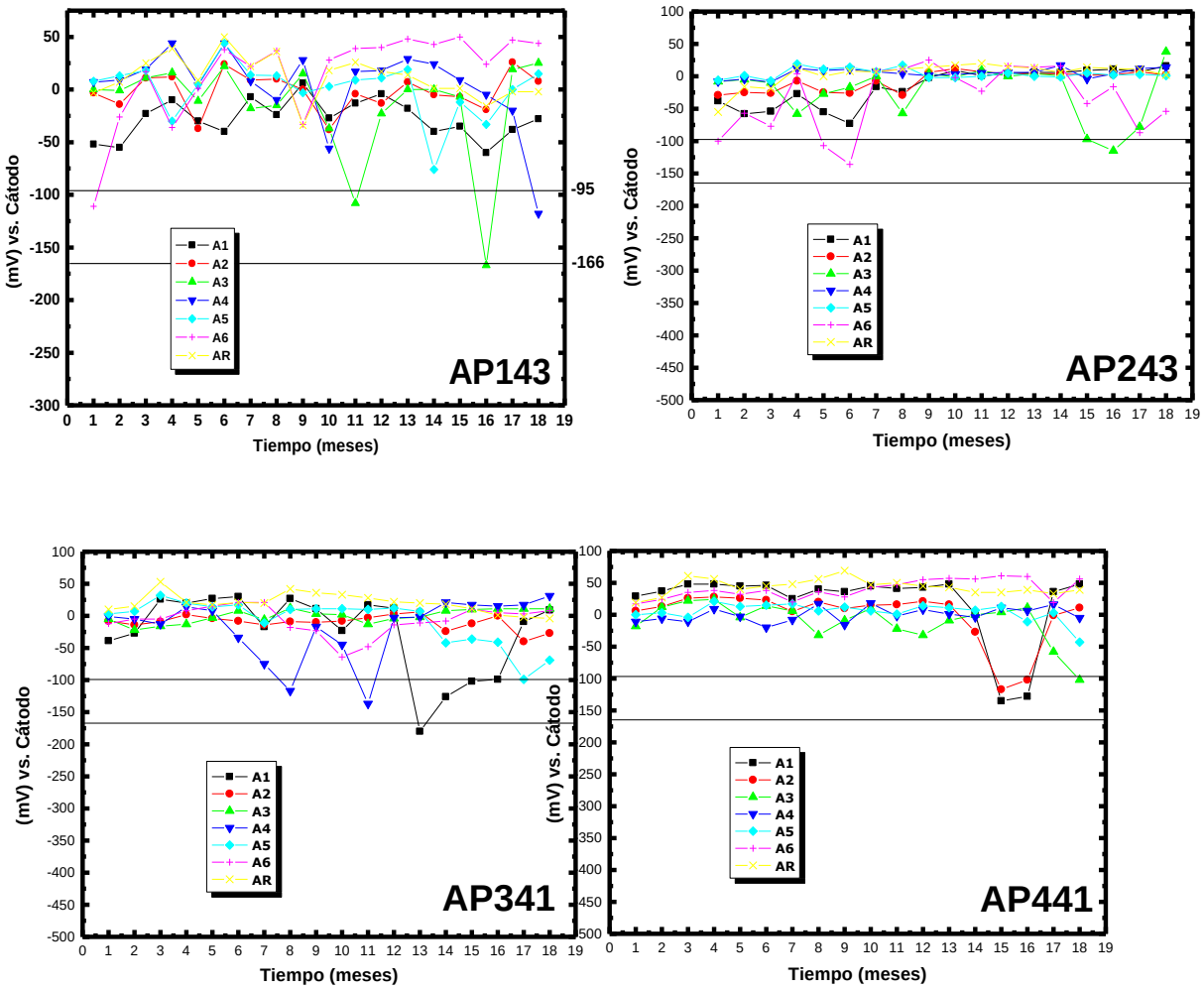


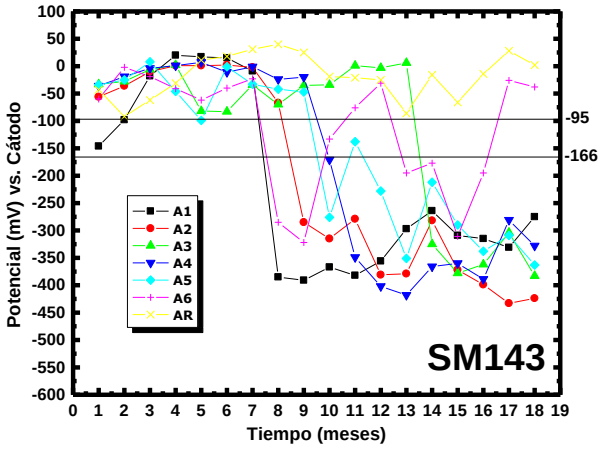
Figura No. 3.1 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Agua Potable*

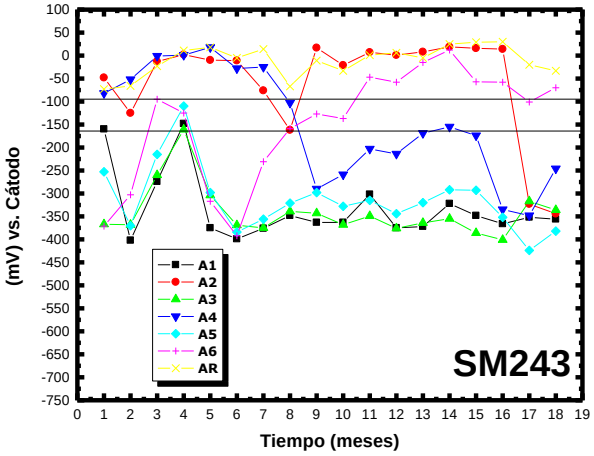
La figura 1 corresponde a las gráficas de las vigas con relación agua-cemento 0.40 (AP143, AP243, AP341, AP441), inmersas en agua potable. Los potenciales de macrocelda contra el tiempo de exposición de los sensores 1, 2, 3, 4, y el acero de refuerzo, se analizaron conforme al criterio de la norma ASTM C-876 [75], como probabilidades del riesgo por corrosión, adaptada para el electrodo de referencia de acero inoxidable (Tabla I)

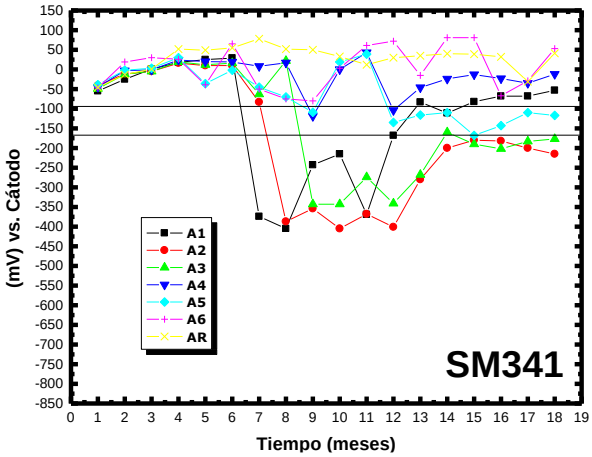
Tabla 3.I *Interpretación de resultados norma ASTM C 876-91, para potenciales de corrosión con Cu/CuSO₄ y su adaptación para Acero Inoxidable.*

Potenciales de corrosión (Ecorr) en mV	Potenciales de macrocelda (Ecorr) en mV	Riesgo de daño (%)
< -200	**< -95**	10% de probabilidad de corrosión
-200 a -350	**-95 a -166**	Cierta incertidumbre
> **-350**	**> -166**	90% de probabilidad de corrosión

Para las cuatro vigas con acero de refuerzo de 3/8" y ½" se observó un comportamiento similar, tanto para los ánodos (A1-A6) del sensor como el acero de refuerzo (AR), con potenciales negativos dentro del intervalo -50 mV y +50 mV, mostrando un comportamiento liegeramente ascendente desde -95 mV a potenciales más nobles de +50 mV durante los 18 meses de exposición, estando todos ellos dentro de la zona del 10% de probabilidad del riesgo por corrosión. Destacando para los sensores 3 y 4 con armadura de ½" de diámetro una ligera activación del ánodo A1, que desciende su potencial hasta la zona de incertidumbre en los meses 13 y 14, ascendiendo nuevamente en los meses 16 y 17, lo que indica la activación y pasivación de estos ánodos del sensor.







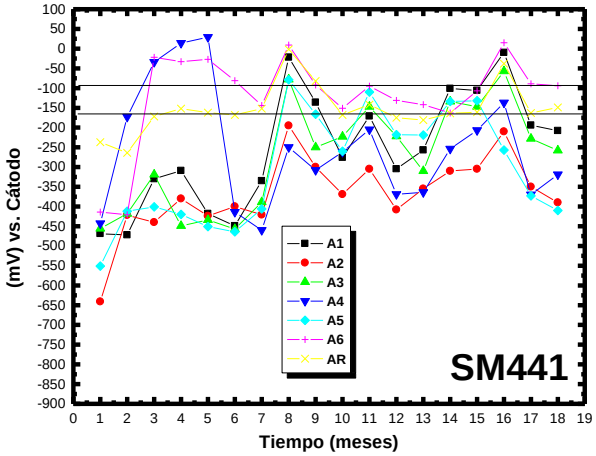


Figura No. 3.2 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Salmuera*

Para la figura 2 correspondiente a las gráficas de las vigas con relación agua-cemento de 0.40 (SM143, SM243, SM341, SM441) inmersos en salmuera, en general los potenciales de macrocelda estuvieron dentro del intervalo de -450 mV a +50 mV. Los sensores 1 y 3 presentaron un descenso de potenciales de 0 a -400 mV para todos los ánodos del sensor 1, y para los ánodos A1, A2 y A3 del sensor 3 a partir de los meses 6 y 7, manteniéndose dentro de la zona de un 90% de probabilidad de que exista corrosión, hasta el mes 14 donde los potenciales del sensor 3 ascienden hasta el límite y dentro de la zona de incertidumbre. Por otro lado, los sensores 2 y 4 iniciaron activamente con -400 mV para el sensor 2, conservándose durante los 18 meses de exposición en la zona de corrosión probable, y con -450 mV en promedio para el sensor 4 con un ascenso hasta -300 y -50 mV, y descenso a -400 mV a partir del mes 7, manteniendo su variabilidad en la zona de incertidumbre, y de corrosión hasta el mes 18. La variabilidad de los potenciales en los sensores fue más notoria para el sensor 2 donde los ánodos tuvieron un ascenso y descenso en potenciales con valores de -400 mV a -150 mV para los meses 2-6. Todos los aceros de refuerzo para las vigas de 3/8" y ½" para los sensores 1, 2, 3 permanecieron dentro de la zona de no corrosión, a excepción del AR del sensor 4, que estuvo variando en potenciales entre la zona de incertidumbre y ligeramente dentro de la zona de corrosión durante los 18 meses de exposición.

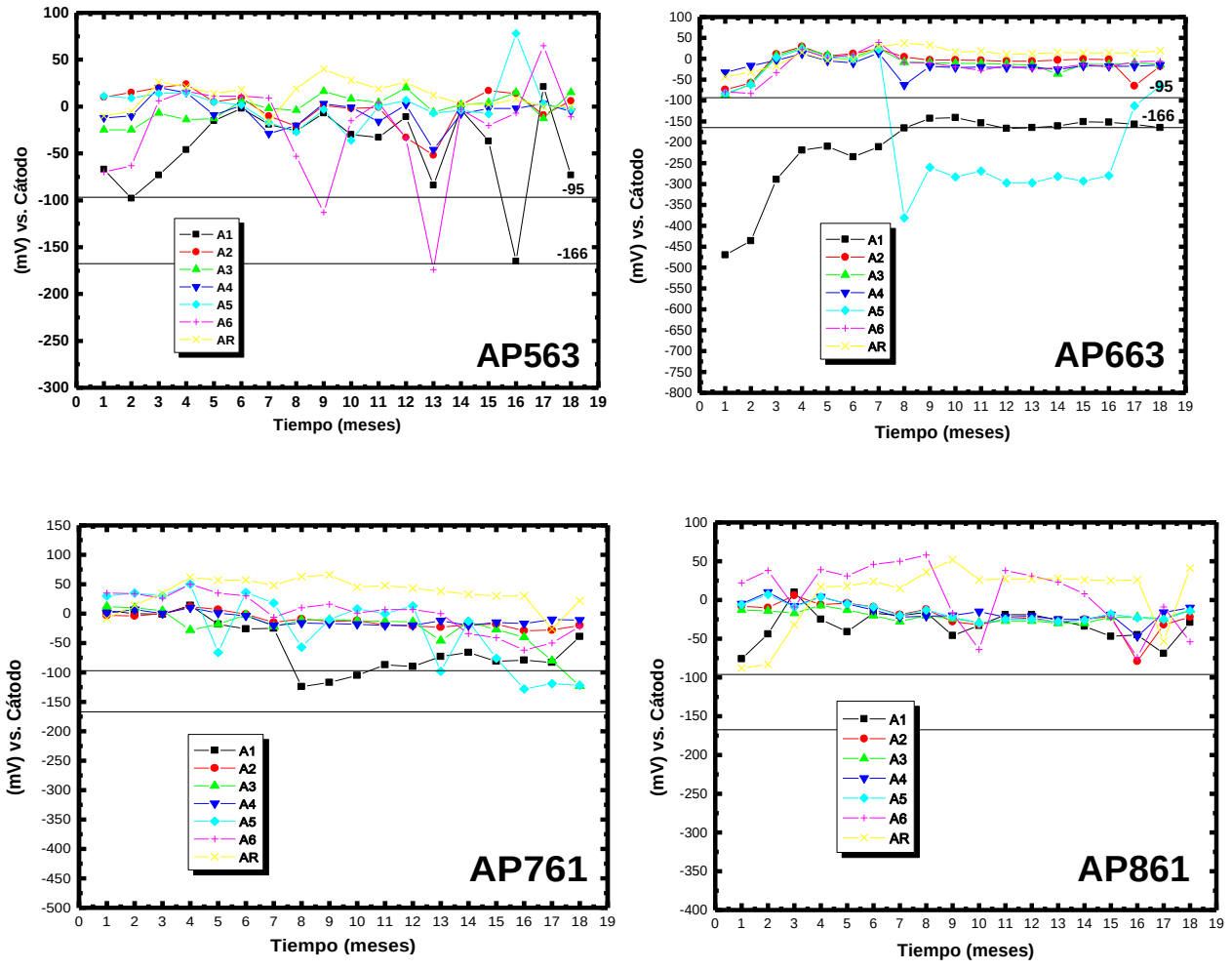


Figura No. 3.3 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Agua Potable*

En la figura 3 se muestran las gráficas para las vigas con relación agua-cemento de 0.60 inmersas en agua potable (AP563, AP663, AP761, AP861). Estas vigas tuvieron un comportamiento similar con valores de potenciales entre -50 mV y +50 mV, quedando dentro de la zona de no corrosión tanto para los sensores como para el acero de refuerzo, con excepción del ánodo A1 y A5 del sensor 6 donde el ánodo A1 tuvo un inicio muy activo de -450 mV ascendiendo gradualmente hasta la zona de incertidumbre, y el descenso en potencial para A5 en el mes 7 a -300 mV a la zona de corrosión, ascendiendo por el mes 17 hasta la zona de no corrosión. Así también para el ánodo A1 del sensor 7 que tuvo un descenso en potenciales a la zona de incertidumbre, ascendiendo por el mes 10 a la zona de 10% de probabilidad de que exista corrosión.

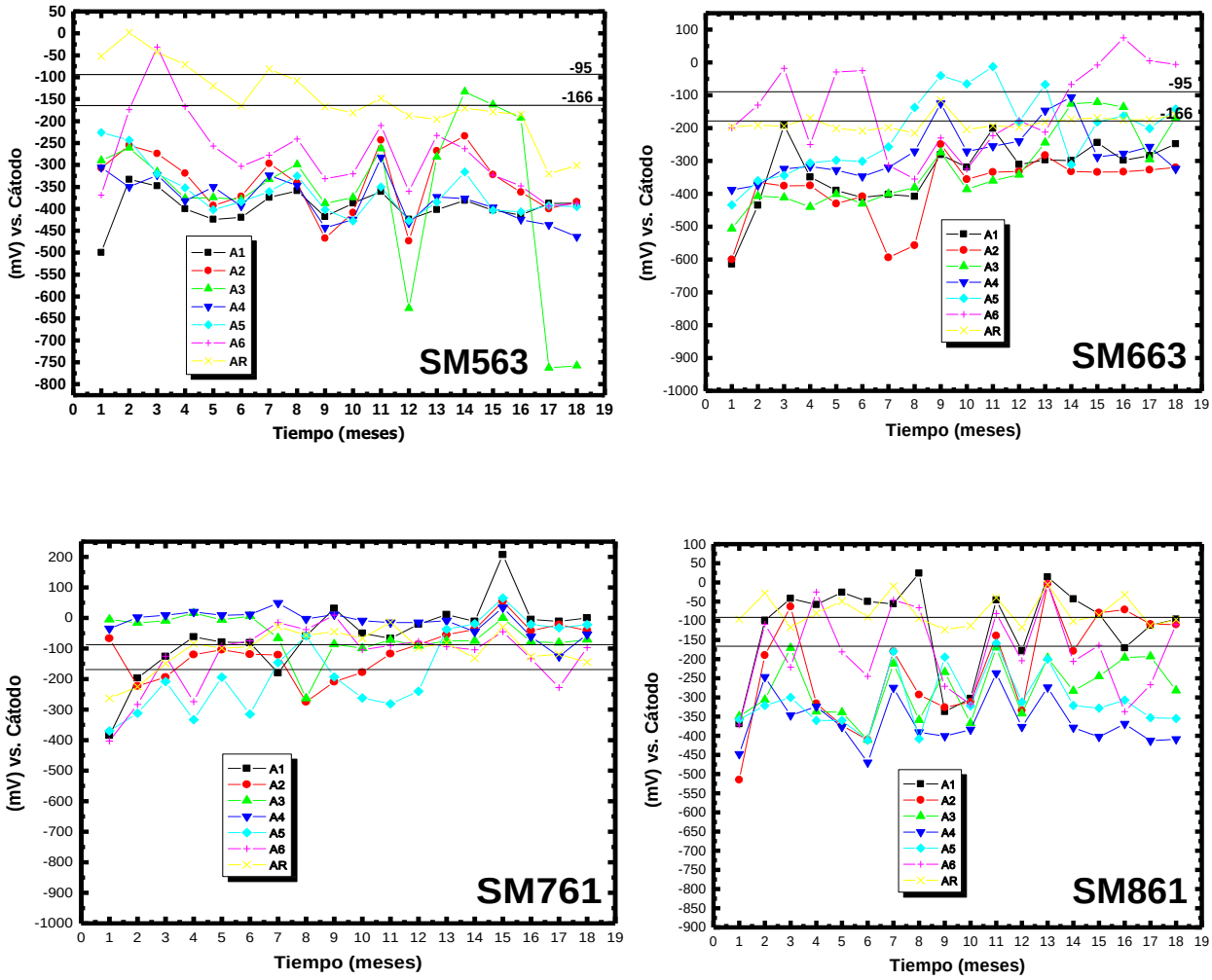


Figura No. 3.4 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Salmuera*

En la figura 4 correspondiente a las gráficas de las vigas con relación agua-cemento de 0.60 inmersas en salmuera (SM563, SM663, SM761, SM861) se presentaron potenciales en general entre -400 mV y +50 mV. Los potenciales para los ánodos del sensor 5 tuvieron un comportamiento descendente durante los 18 meses de exposición, variando entre -350 y -450 mV dentro de la zona de corrosión.

El acero de refuerzo tuvo su variación desde la zona de no corrosión hasta la zona de más alta probabilidad de corrosión en los meses 17 y 18. Los que tuvieron un comportamiento ascendente fueron los ánodos de los sensores 6 y 7, siendo más nobles los potenciales del sensor 7 con valores de 300 mV, ascendiendo hasta el mes 13 a la zona de no corrosión, con potenciales de -50 mV. El sensor 6 presentó potenciales un poco más negativos variando entre -400 mV y -200 mV, pero permaneciendo todavía dentro de la zona con más probabilidad de corrosión; el acero de refuerzo para este sensor se comportó con poca variación sobre el límite entre la zona de incertidumbre y zona de corrosión. La variación de los potenciales de los ánodos del sensor 8 fue constante entre la zona de 10% de probabilidad de corrosión hasta la zona de mayor probabilidad de corrosión con valores entre -400 mV a 0 mV. El acero de refuerzo se mantuvo en los límites de la zona de no corrosión e incertidumbre durantes los 18 meses de exposición.

3.1.1.1 Discusión de los potenciales de macrocelda

Las vigas expuestas en Salmuera, son las que presentaron potenciales de macrocelda más negativos en sus sensores y acero de refuerzo con respecto al electrodo embebido de acero inoxidable, en relación con las vigas expuestas en agua potable, con intervalos de +50 mV a -400 mV para las vigas con relación agua-cemento de 0.40. En las vigas de menor calidad (relación agua-cemento de 0.60), los potenciales resultaron más activos, con valores entre 0 mV y -450 mV, y probabilidades que van de incertidumbre a un 90% probabilidad de que exista corrosión para los ánodos del sensor y con probabilidades del 10% de que exista corrosión a incertidumbre para el acero de refuerzo. Para la viga del sensor 5 el acero de refuerzo (AR) cayó hasta potenciales de -300 mV en los meses 17 y 18, con alta probabilidad de que exista corrosión de acuerdo a la norma ASTM C-876-91. Los ánodos de los sensores y el acero de refuerzo de las vigas expuestas en agua potable presentaron en general un 10% de probabilidad de corrosión.

La variabilidad de los valores encontrados en los ánodos para las vigas expuestas en salmuera, puede deberse a la heterogeneidad del concreto y su variabilidad en la permeabilidad. Lo ideal hubiera sido un comportamiento similar de los sensores 1 y 3 de las vigas con relación agua-cemento de 0.40, donde los potenciales de macrocelda

de los ánodos A1 y A6 (siendo los más externos con respecto a la superficie del concreto), descendieron hasta el mes 7; cuyo comportamiento es el adecuado para la detección de agentes externos.

Por otro lado pudiera verse desde otro punto de vista, que en el estado sumergido podría haber zonas de mayor saturación y zonas de menor saturación dentro del concreto, o que en la etapa de curado del concreto muchas zonas se humedecieron lo suficiente y otras no, por eso mismo algunos sensores internos presentaron valores más negativos aún, que los ánodos más externos, habría que esperar más tiempo para ver la reacción cuando los agentes agresivos como los cloruros cambiaran el potencial de los ánodos y del acero de refuerzo, y en que magnitud lo harían.

3.1.2 Corrientes de macrocelda

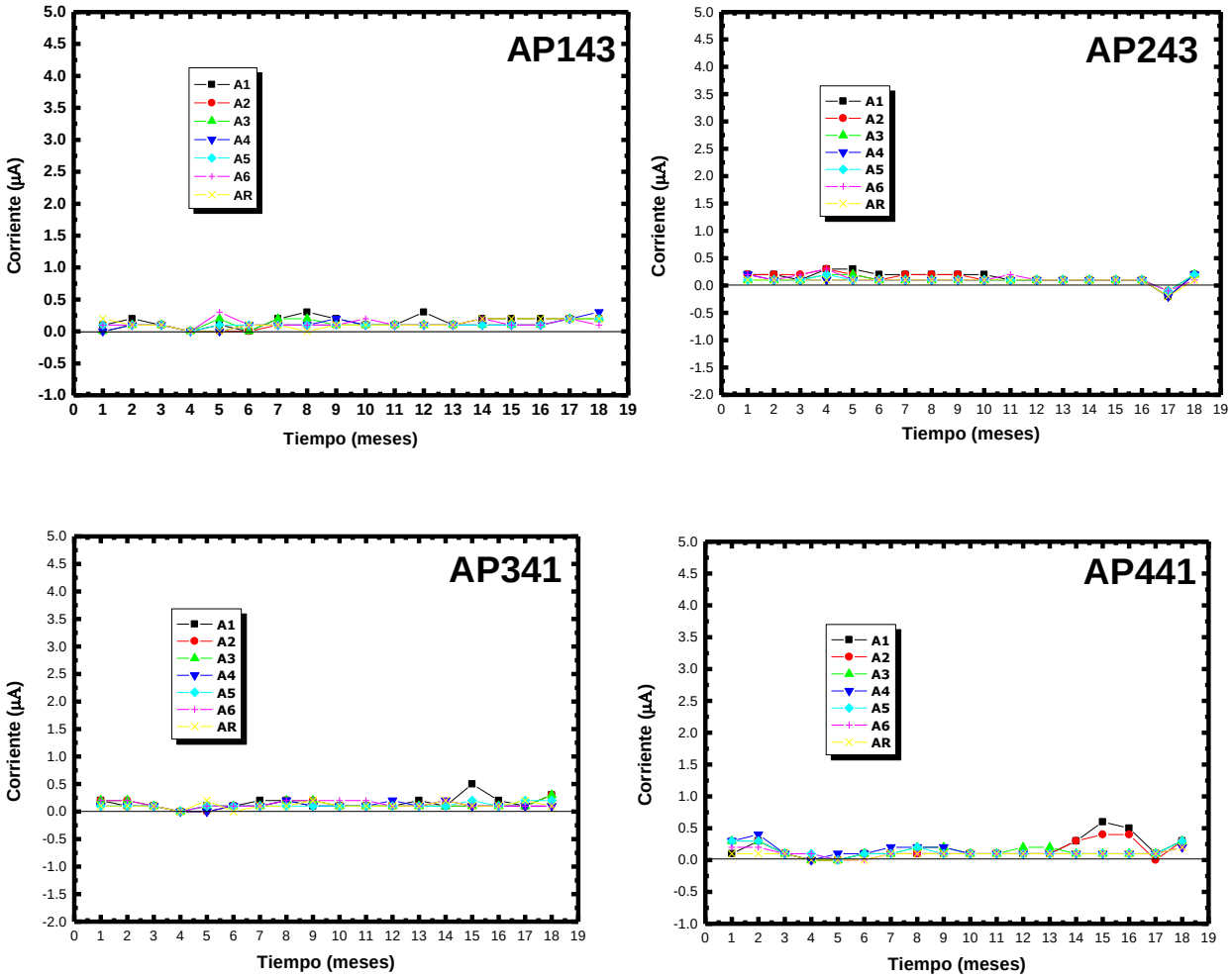


Figura No. 3.5 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Agua Potable*

En la figura 5 se muestran las gráficas correspondientes a las vigas con relación agua-cemento de 0.40 (AP143, AP243, AP341, AP441)

inmersas en agua potable. Las corrientes de macrocelda entre los ánodos y cátodos del sensor, acero de referencia y cátodo para las cuatro vigas se encontraron valores entre 0.0 μA y 0.3 μA. Se observa como en el sensor 2 para el mes 17, las corrientes cambiaron de signo y se obtuvieron valores de -0.3 μA volviendo a recuperarse en el mes 18 con valores de corrientes positivas. Para los sensores 3 y 4 destacan las corrientes de macrocelda del ánodo A1 del sensor 3, ánodos A1 y A2 del sensor 4 con valores de 0.5 μA y 0.7 μA, obtenidos en el mes 15 y 16, volviendo a disminuir en el mes 17 y 18, pero en general no indican que esté sucediendo algo interesante en cuanto al fenómeno de la corrosión, simplemente no se detectaron corrientes debido a la baja conductividad iónica del concreto en este ambiente.

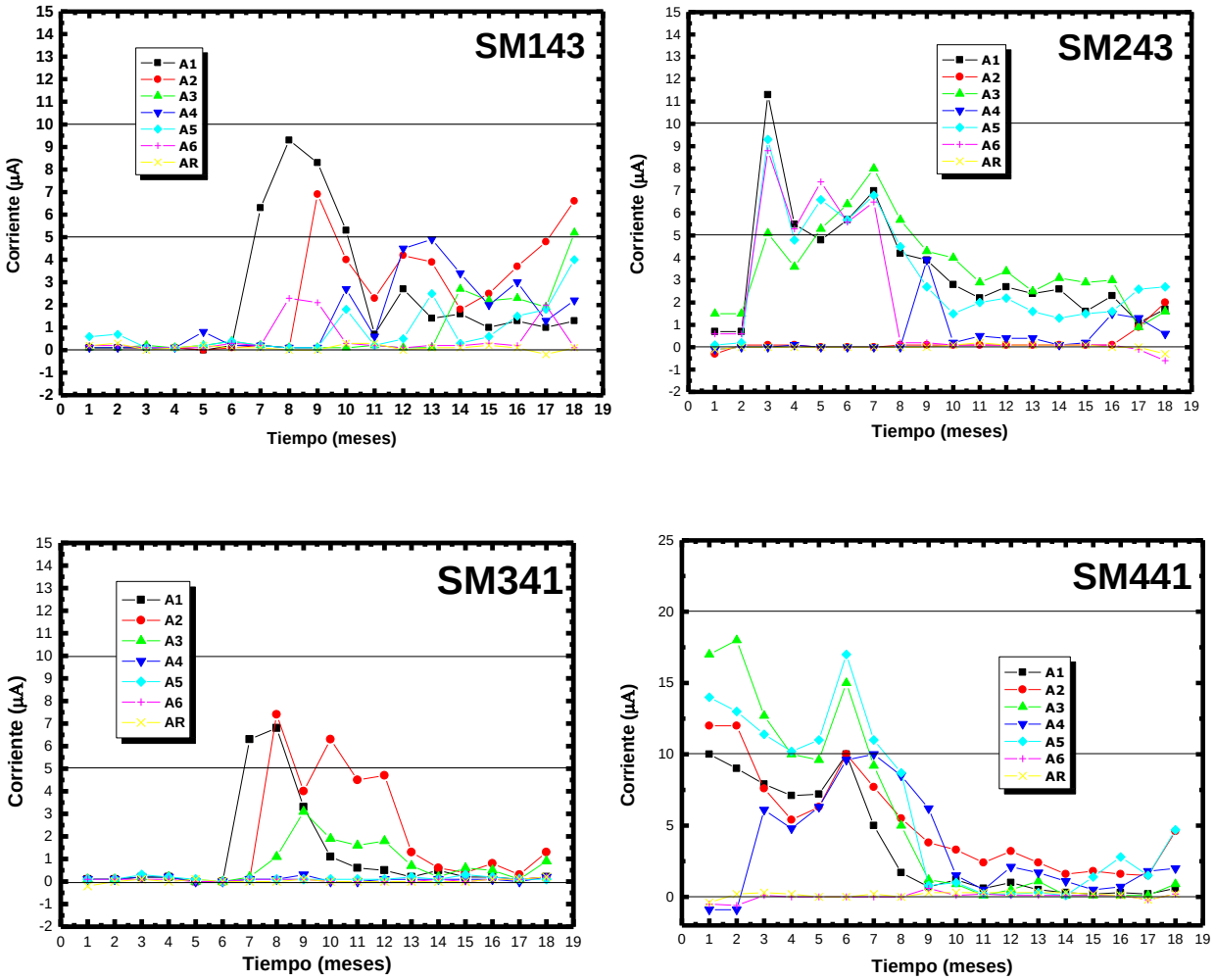


Figura No. 3.6 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Salmuera*

La figura 6 muestra las gráficas de las vigas inmersas en salmuera (SM143, SM243, SM341, SM441) con relación agua-cemento de 0.40. En general los valores de las corrientes de macrocelda fluctuaron entre 0 y 18 μA para las cuatro vigas. Los sensores 1 y 3 presentaron

valores muy bajos durante 6 meses entre (0 y 0.5 μA), activándose con corrientes entre 7 y 9 μA en el mes 7, y disminuyendo en los meses 9 y 10, manteniéndose entre 0 y 5 μA hasta el mes 18, y activándose los ánodos externos (A1, A6) e internos. El sensor 2 presentó valores entre 0 y 1.5 μA los dos primeros meses, activándose en el mes 3 con valores máximos de corriente de 11 μA para el ánodo A1, y de 9 μA para el ánodo A6. Los ánodos internos tuvieron mucha variabilidad en el flujo de corriente, los cuales tuvieron un comportamiento descendente entre 7 y 5 μA durante los 18 meses de exposición. El sensor 4 tuvo un comienzo muy activo con valores máximo en corriente de 18 μA, para los ánodos internos, y con valores entre 10 y 12 μA para los ánodos externos A1 y A6, el comportamiento fue descendente hasta 5 μA como máximo durante los 18 meses de monitoreo. Los aceros de refuerzo tanto para los de 3/8" como los de ½" presentaron casi nula activación, conservándose entre 0 y 0.3 μA para los sensores 1, 2, 3.

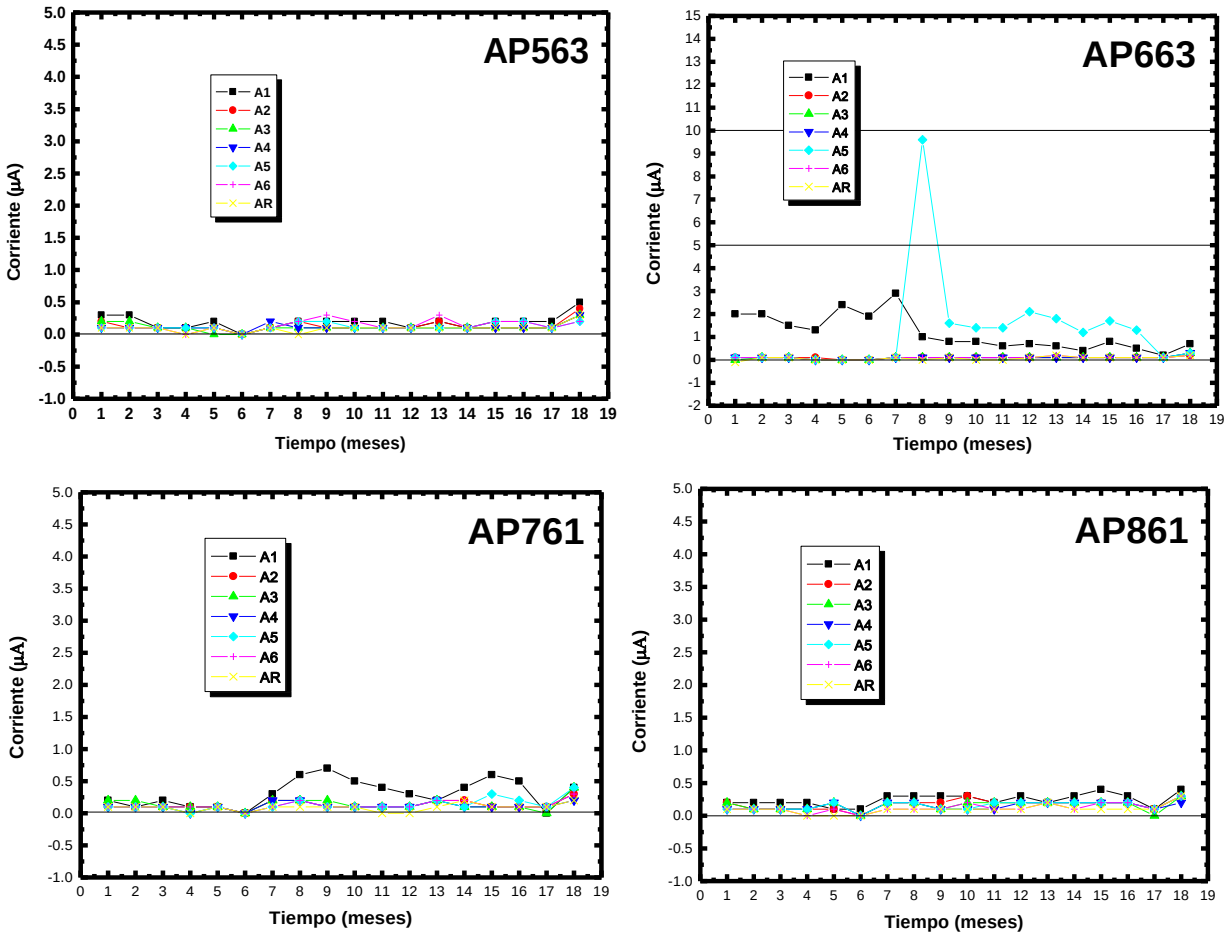


Figura No. 3.7 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Agua Potable*

Las gráficas de la figura 7 corresponden a las vigas con relación agua-cemento de 0.60 inmersos en agua potable (AP563, AP663, AP761, AP861). Las corrientes de macrocelda para los ánodos de los sensores 5 y 8 y sus respectivos aceros de refuerzo, no presentaron

ninguna variabilidad en su comportamiento, obteniéndose valores de 0 y 3 μA durante los 18 meses de exposición. Para el sensor 6 se obtuvieron valores de corriente para el ánodo A1 con comportamiento descendente de 2 a 1 μA, y A5 una activación de 2 μA a partir del mes 7 conservando el resto del tiempo un descenso gradual hasta el mes 18. El acero de refuerzo y el resto de ánodos obtuvieron valores de corriente entre 0 y 0.2 μA durante los 18 meses de exposición. En el sensor 7 solamente el ánodo A1 mostró una cierta variación en la corriente, activándose también en el mes 7 hasta 1 μA y descendiendo hasta los meses 17 y 18 con 0.3 μA, como el resto de ánodos y el acero de refuerzo.

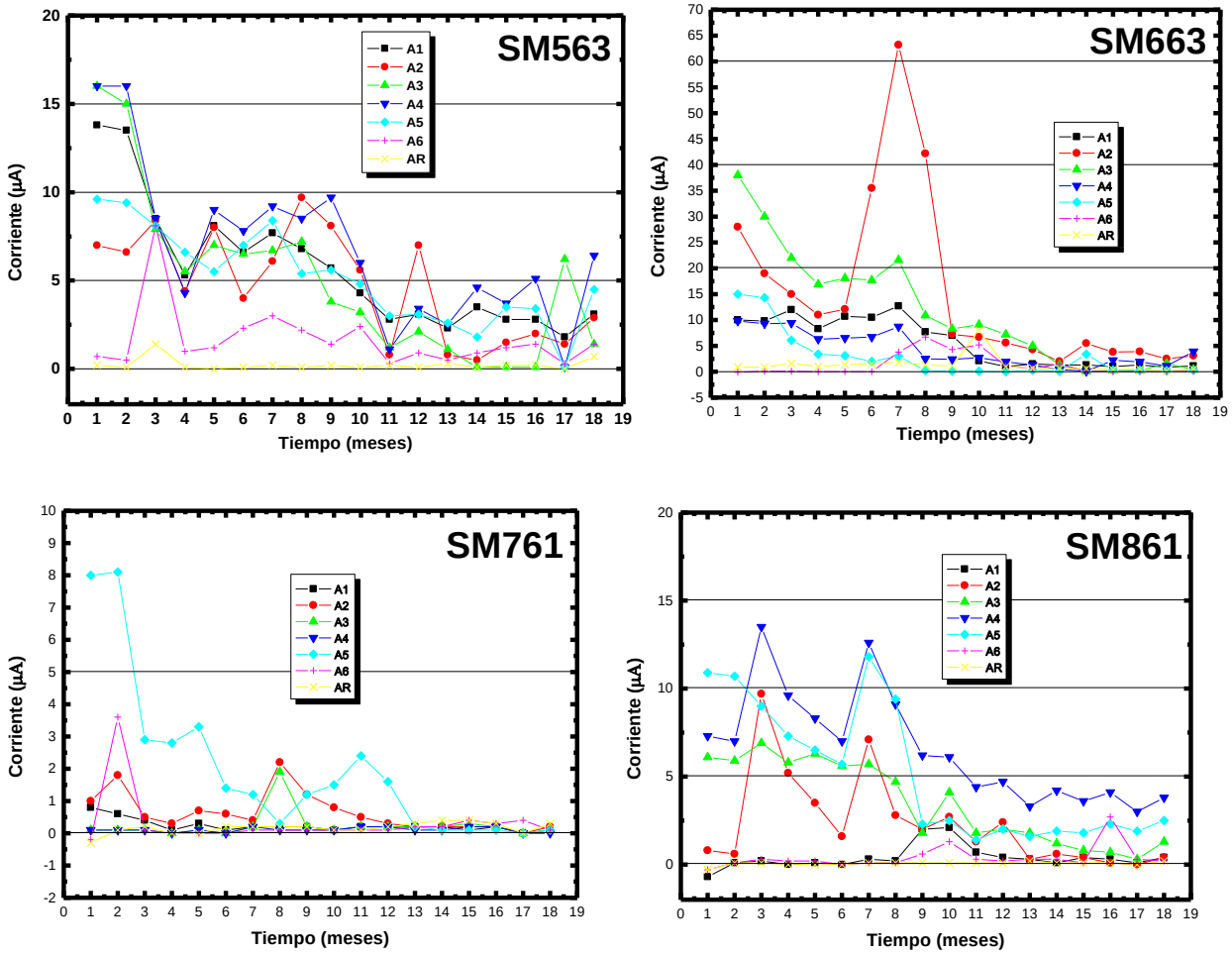


Figura No. 3.8 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Salmuera*

Las gráficas de la figura 8 pertenecen a las vigas con relación agua-cemento de 0.60 inmersos en salmuera (SM563, SM663, SM761, SM861). El comportamiento general de las cuatro vigas tuvo un inicio muy activo, con una disminución gradual de los valores de corriente de macrocelda durante los 18 meses de exposición, variando entre 0 y 37 μA. Para el sensor 5 algunos ánodos internos obtuvieron valores más altos con 17 μA como máximo en tanto los ánodos externos A1 y A6 reportaron valores de 14 y 8 μA respectivamente. Caso parecido

el del sensor 6, que tuvo una activación con valor alto en corriente para el ánodo interno A2, alcanzando un valor máximo de 60 μA para el mes 7, disminuyendo en el mes 9 hasta 5μA y 4 μA en el mes 18. Los ánodos externos A1 y A6 obtuvieron valores de 10 y 5 μA como máximo. El resto de los ánodos variaron con valores de corriente entre 10 y 38 μA, disminuyendo hasta quedar entre valores inferiores a 5 μA en el mes 18. En el sensor 7 los ánodos externos A1 y A6 presentaron muy bajas corrientes de macrocelda con un inicio activo de 1 y 3.5 μA los tres primeros meses, disminuyendo hasta valores de 0.5 μA o menores el mes 18.

Los ánodos internos variaron alcanzando valores máximos de 8 μA para el ánodo A5, disminuyendo sus valores de corriente hasta quedar entre 0 y 5 μA en el mes 18. Caso similar para los valores de corriente del sensor 8, donde los ánodos externos se activaron a partir del mes 8 con corrientes bajas de solo 2 μA, disminuyendo a valores menores de 1 μA en el mes 18. Los ánodos internos variaron sus valores de corrientes con un descenso gradual de 14 μA como máximo hasta valores menores a 4 μA. Los aceros de refuerzos no variaron para los sensores 6, 7 y 8, con valores menores a 0.5 μA. Solo el sensor 5 presentó una ligera activación, con una corriente de 0.8 μA en el mes 18.

3.1.2.1 Discusión de corrientes de macrocelda

Las corrientes de macrocelda para las vigas expuestas en Agua Potable presentaron un comportamiento similar, con valores de 0 a 0.3 μA para ambas calidades de concreto. No así para las vigas expuestas en salmuera, donde fueron más elevadas, activándose los sensores a partir del mes 7, con valores de 0 a 9 μA, para las vigas SM143 y SM341. Cabe mencionar que este caso es el más ideal para interpretar el funcionamiento del sensor como método preventivo del riesgo por corrosión, ya que los ánodos externos fueron los primeros en activarse, con valores de corriente más altos que los ánodos internos. Por otro lado, la activación a partir del mes 2 para la viga SM243, y desde el inicio para la viga SM441 (con valores que van de 0 a 18 μA), no representó nada conveniente para indicar la prevención del posible ataque por corrosión, dado que se obtuvieron valores de corriente más altos en los ánodos internos que los externos, al igual que se activaron al mismo tiempo, esto comprueba que ya existía humedad suficiente para activar los ánodos, ya sea por la humedad inicial mas la humedad por el curado ó porque los ánodos internos están más próximos al cátodo.

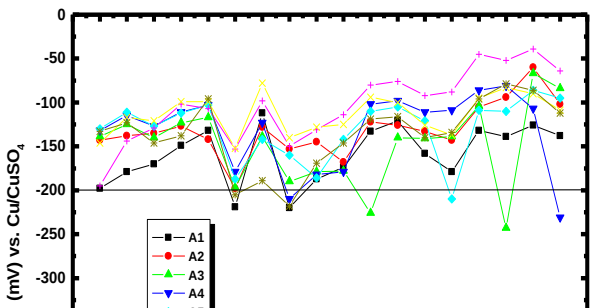
Las otras vigas pertenecientes a los concretos de menor calidad o con relación agua-cemento de 0.60 presentaron caso similar, pero con valores más altos en corriente y mayor activación de los ánodos internos, alcanzando entre 35 a 62 μA. Con lo cual se corrobora la presencia de humedad interna y el mayor flujo iónico debido a que estos concretos son menos densos que los de relación agua-cemento de 0.40 o de mejor calidad.

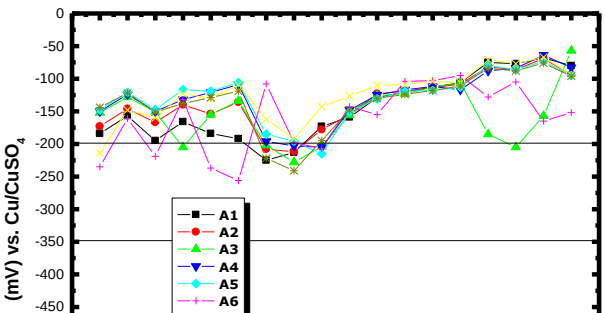
El acero de refuerzo en este ambiente presentó nula corriente para el concreto de buena calidad y una corriente significativa de 0.80 μA en el mes 17 y 18 para el concreto de calidad menor. El sensor mantuvo un comportamiento adecuado y quedó demostrado en los concretos más densos, no así para los concreto menos densos que se saturaron desde el inicio y por lo tanto no se pudo observar bien el funcionamiento del sensor como método preventivo, ya que bajo ambiente sumergido es algo difícil de prever la difusión de agentes agresivos, o podría en dado caso esperarse la activación por cloruros y esperar valores más altos en los ánodos externos, y de esta forma saber que se tiene la presencia de agentes indeseables que puedan producir corrosión en el acero de refuerzo.

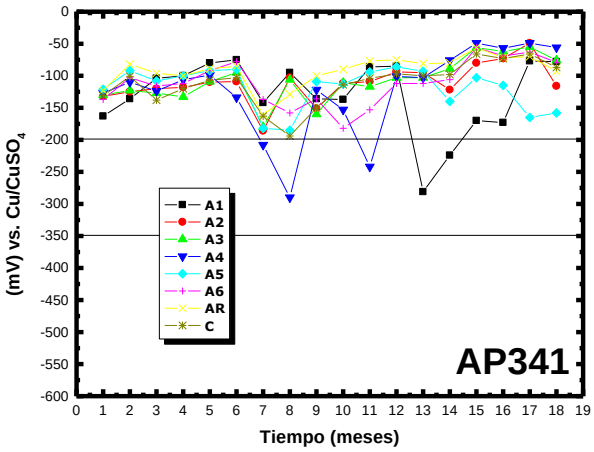
3.2 Evaluación con técnicas electroquímicas

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a los potenciales de corrosión con respecto al tiempo de inmersión en los dos ambientes a los que estuvieron expuestos. Primero se exponen las gráficas para las vigas de relación agua-cemento de 0.40, y posteriormente las vigas con relación agua-cemento de 0.60. Se monitorearon los potenciales de cada ánodo del sensor, acero de refuerzo, así como también del cátodo del sensor, ya que este electrodo también puede sufrir el ataque por cloruros y provocarle corrosión. Los valores obtenidos fueron analizados conforme al criterio de la norma ASTM C-876 (Tabla I) anteriormente mostrado.

3.2.1 Potenciales de corrosión del sensor y armadura







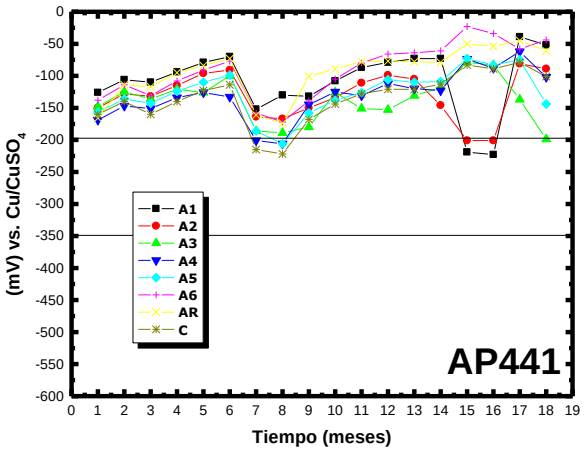
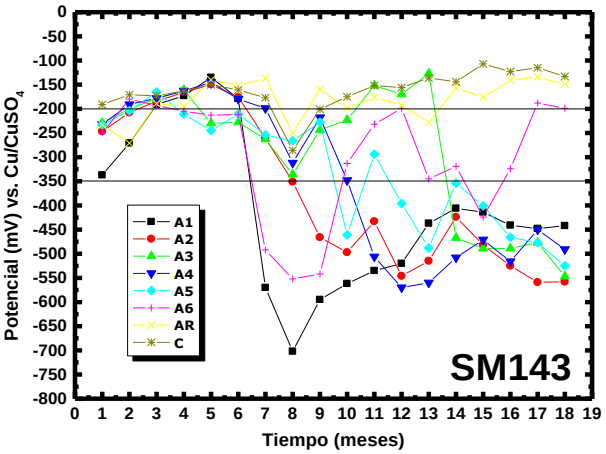
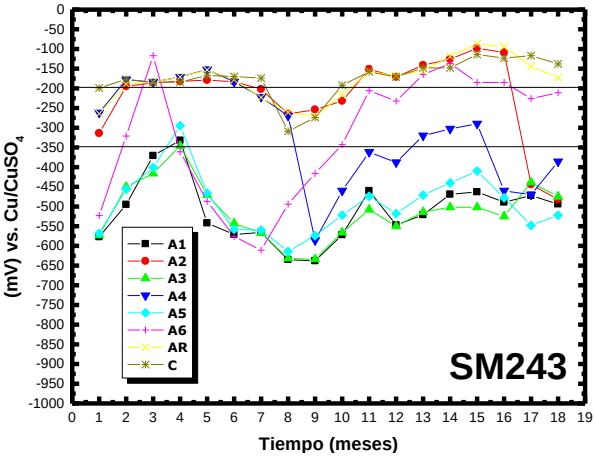


Figura No. 3.9 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Agua Potable*

Las gráficas de la figura 9 corresponden a las vigas con relación agua-cemento de 0.40 inmersos en agua potable (AP143, AP243, AP341, AP441). Para las cuatro vigas se observó un comportamiento general tanto para los ánodos (A1-A6) del sensor, como el acero de refuerzo (AR) y el cátodo (C), con potenciales negativos dentro del intervalo de -200 y -50 mV, mostrando un comportamiento ligeramente ascendente desde -200 mV a potenciales más nobles de -50 mV durante los 18 meses de exposición; estando todos ellos dentro de la zona del 10% de probabilidad del riesgo por corrosión. Destacando para los sensores 3 y 4 con armadura de ½" de diámetro, una ligera activación del ánodo A1 para el sensor 3 y A1, A2 del sensor 4, que desciende su potencial hasta la zona de incertidumbre en los meses 13 y 15, ascendiendo nuevamente en el mes 16 a la zona de menor probabilidad de corrosión.





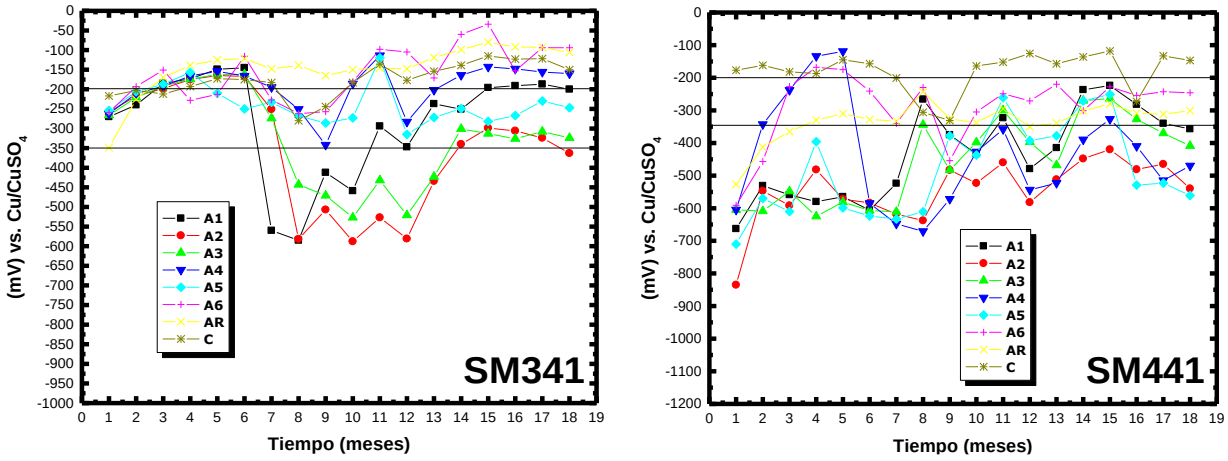


Figura No. 3.10 *Vigas con relación a/c 0.40, expuestas en Salmuera*

La figura 10 corresponde a las gráficas de las vigas con relación agua-cemento de 0.40 (SM143, SM243, SM341, SM441) inmersos en salmuera. En general los potenciales de macrocelda estuvieron variando de -700 a -100 mV. Los ánodos del sensor 1, presentaron un descenso de potenciales de -150 a -700 mV para el ánodo A1, y de -150 a -550 mV para el ánodo A6 entre los meses 6 y 7. Los ánodos internos disminuyeron posteriormente a partir del mes 7, permaneciendo hasta el mes 18 dentro de la zona con alta probabilidad de corrosión, a excepción del ánodo 6, que tuvo una recuperación a potenciales más nobles a partir del mes 9. Los ánodos A1, A2 y A3, del sensor 3, presentaron un descenso en potenciales a partir de los meses 6 y 7 con valores de -600 mV, manteniéndose dentro de la zona de alta probabilidad de corrosión, hasta los meses 11 y 14, ascendiendo nuevamente hasta la zona de incertidumbre. Los otros ánodos A6, A5 y A4 del sensor 3, permanecieron dentro de la zona de no corrosión e incertidumbre. Por otro lado, los sensores 2 y 4 iniciaron activamente con -550 mV para el sensor 2, y con -800 mV para el sensor 4, manteniendo su variabilidad en la zona de incertidumbre y de corrosión hasta el mes 18, el ánodo A1 fue el menos variable dentro de la zona de mayor probabilidad de corrosión, y A6 tuvo más cambios dentro de la zona de incertidumbre y la zona de mayor riesgo por corrosión. La variabilidad de los potenciales en los sensores fue más notoria para el sensor 2, donde los ánodos tuvieron un ascenso y descenso en potenciales dentro de la zona de corrosión-incertidumbre para los meses 2-6. Todos los aceros de refuerzo para las vigas de 3/8” y ½” para los sensores 1, 2 y 3 permanecieron dentro de la zona de no corrosión, a excepción del AR

del sensor 4, que estuvo variando en potenciales entre límites de la zona de incertidumbre y la zona de corrosión durante los 18 meses de exposición. Los cátodos de acero inoxidable presentaron valores dentro de la zona de menor riesgo por corrosión, solo disminuyeron sus potenciales entre los meses 7, 8 y 9 a la zona de incertidumbre y recuperaron sus valores hasta el mes 18, dentro de la zona de no corrosión.

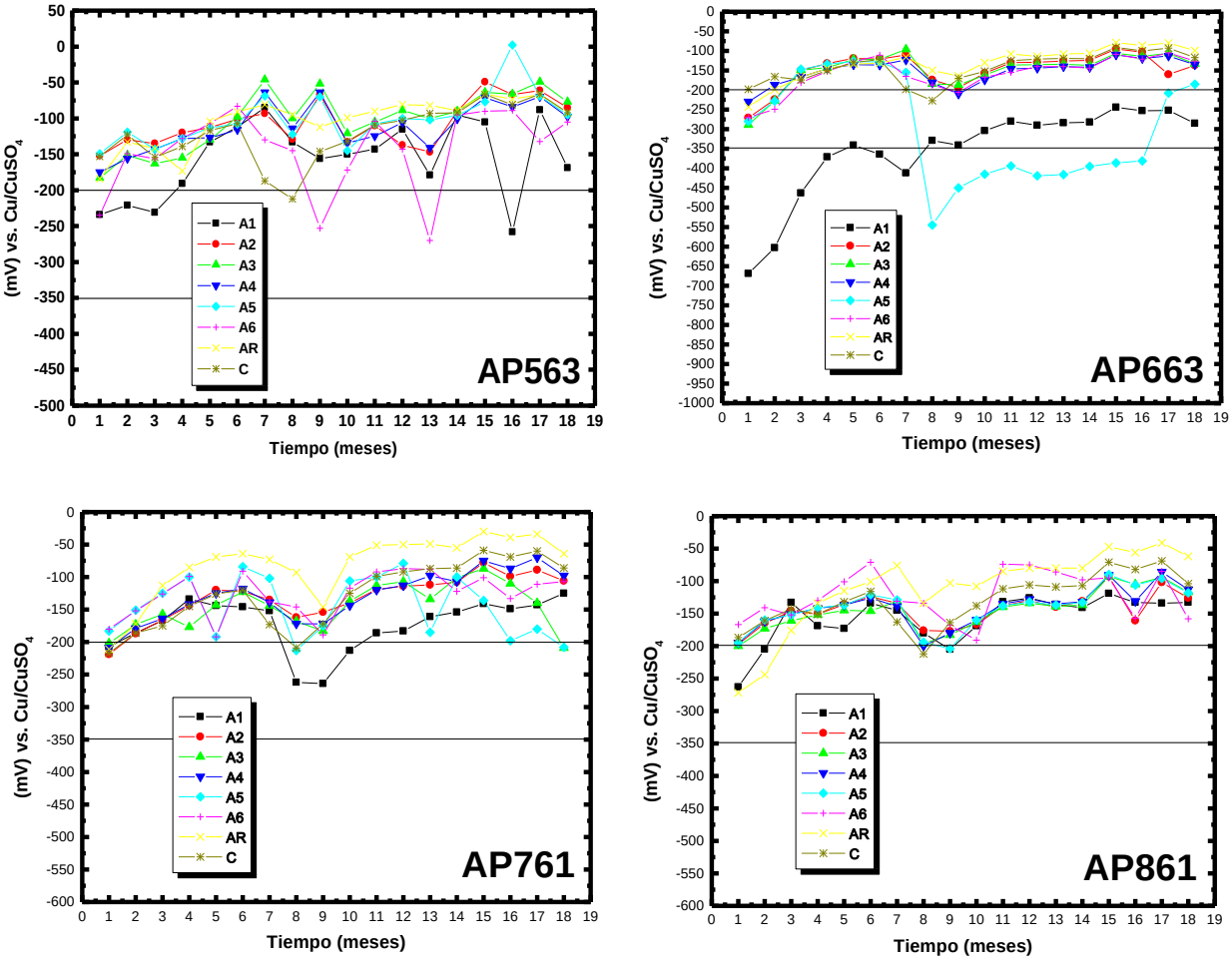


Figura 3.11 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestos en Agua Potable*

En la figura 11 se muestran las gráficas para las vigas con relación agua-cemento de 0.60 inmersas en agua potable (AP563, AP663, AP761, AP861). Estas vigas tuvieron un comportamiento general ascendente con valores de potenciales entre -250 y -50 mV, quedando dentro de la zona de no corrosión, tanto para los ánodos de los sensores, como el acero de refuerzo y el cátodo, con excepción del ánodo A1 y A5 del sensor 6, donde el ánodo A1 tuvo un inicio muy activo de -650 mV, ascendiendo gradualmente hasta la zona de incertidumbre, y el descenso en potencial para A5 en el mes 7 a -400 mV dentro de la zona de corrosión hasta el mes 17, ascendiendo a potenciales más nobles dentro de la zona de baja probabilidad de corrosión. Así también para el ánodo A1 del sensor 7, que tuvo un

descenso en potenciales a la zona de incertidumbre, ascendiendo por el mes 10 a la zona de 10% de probabilidad de que exista corrosión.

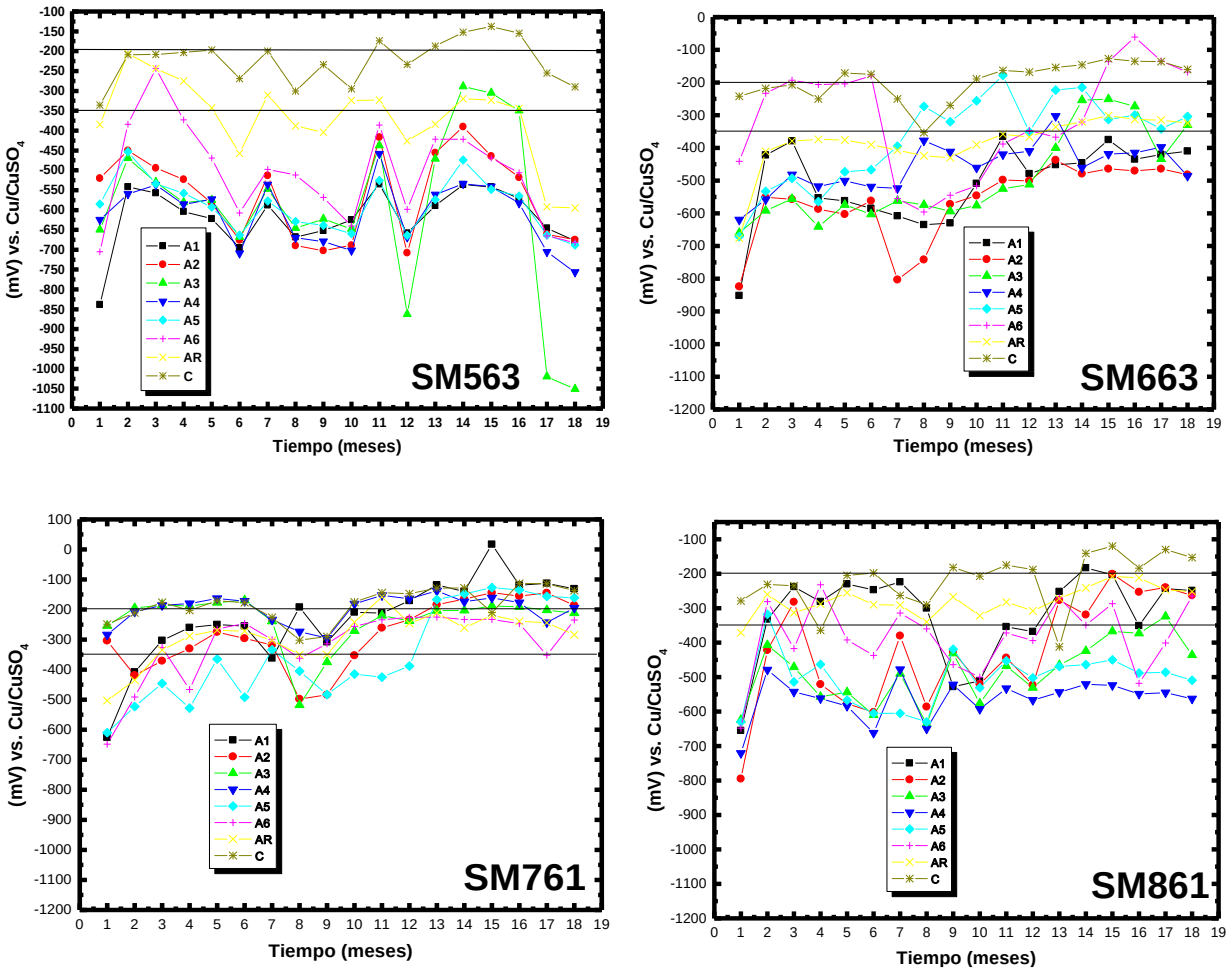


Figura No. 3.12 *Vigas con relación a/c 0.60, expuestas en Salmuera*

En la figura 12 se muestran las gráficas para las vigas con relación agua-cemento de 0.60 inmersas en salmuera (SM563, SM663, SM761, SM861). Los potenciales de corrosión contra el tiempo de exposición en general variaron con valores de -800 a -100 mV. Los potenciales para los ánodos del sensor 5 tuvieron un comportamiento con variaciones entre -700 y -400 mV dentro de la zona de mayor probabilidad de corrosión durante los 18 meses de exposición, con excepción del ánodo interno A3 que tuvo potenciales más nobles, ascendiendo a la zona de incertidumbre con valores de -300 mV para los meses 14 y 15 y descendiendo hasta los -1000 mV en los meses 17 y 18.

El acero de refuerzo presentó un comportamiento descendente desde la zona de no corrosión hasta la zona de más alta probabilidad de corrosión en los meses 17 y 18, con potenciales de -250 a -550 mV. Los que tuvieron un comportamiento ascendente fueron los ánodos

del sensor 6 y 7, comportándose más nobles los potenciales del sensor 7, con valores que van de -600 mV, ascendiendo por el mes 11 a la zona de más baja probabilidad de corrosión, con potenciales entre los limites de incertidumbre (-250 a -100 mV). El sensor 6 presentó potenciales un poco más negativos con mucha variación entre -400 y -200 mV, dentro de la zona de mayor probabilidad de corrosión. El ánodo externo A6 tuvo variaciones más notorias pasando de la zona de no corrosión, a la zona de mayor probabilidad de corrosión en el mes 7, ascendiendo por los meses 14 y 15 a la zona de no corrosión, hasta el mes 18. El acero de refuerzo para este sensor se comportó con poca variación sobre el límite entre la zona de incertidumbre y la zona de corrosión. La variación de los potenciales de los ánodos del sensor 8 fue constante entre la zona de 10% de probabilidad de corrosión a la zona de mayor probabilidad de corrosión, variando sus potenciales entre -200 a -600 mV. El acero de refuerzo se conservó dentro de la zona de incertidumbre durante los 18 meses de exposición. Los cátodos de acero inoxidable para estas cuatro vigas presentaron potenciales que van de una incertidumbre a un estado más noble, dentro de la zona de menor probabilidad de corrosión.

3.2.2 Discusión del monitoreo con sensores y potenciales de corrosión

Las vigas expuestas en Salmuera, son las que presentaron potenciales de macrocelda y de corrosión más negativos en sus sensores que las vigas expuestas en agua potable, con intervalos de 0 a -400mV del sensor acero/acero inoxidable, y de -200 a -600mV con respecto al $Cu/CuSO_4$; siendo las vigas de menor calidad más activas aún con probabilidades que van de una incertidumbre a un 90% de probabilidad de que exista corrosión, para los ánodos del sensor, de acuerdo a la norma ASTM C-876-91. Cabe mencionar que los ánodos internos obtuvieron los potenciales más negativos comparado a los ánodos más externos, dentro de la zona de recubrimiento, esto se pudo observar para las vigas con relación agua cemento de 0.60 y las vigas del sensor 2 y 4 con relación agua-cemento de 0.40, a excepción de los sensores 1 y 3 de la vigas, las cuales tuvieron un comportamiento deseable tanto en potenciales de macrocelda como potenciales de corrosión, para indicar que estos sensores presentan buen funcionamiento bajo ciertas condiciones de ambiente.

En general, el comportamiento de las variaciones en potenciales de corrosión y de macrocelda fueron muy parecidos, lo que indica que los electrodos de referencia embebidos en concreto pueden ser una solución para el monitoreo del riesgo por corrosión en concreto reforzado. Los electrodos empleados para este proyecto tienen hasta el momento buen comportamiento con probabilidades bajas de que exista corrosión en ellos. Los aceros de refuerzo todavía tienen

también probabilidades bajas del riesgo por corrosión, con excepción de la viga con relación agua-cemento de 0.60, perteneciente al sensor que presentó un comportamiento descendente hasta la zona de mayor riesgo por corrosión los meses 17 y 18. Las corrientes de macrocelda tuvieron un comportamiento inverso a los potenciales, alcanzando sus máximos valores cuando los potenciales eran más negativos, por lo consiguiente los valores más altos alcanzados fueron obtenidos por los ánodos internos. Esto puede deberse a muchas razones una de ellas es que los ánodos internos están más cerca del cátodo, lo que reduce la distancia para que se lleve a cabo el flujo iónico con mayor intensidad.

Como el motivo del proyecto es analizar la corrosión del sistema con macroceldas de corrosión, se da como ejemplo el resultado de los ánodos externos para las vigas SM143 y SM563, comparado con los resultados de dos vigas expuestas en agua potable, pero con respecto al nivel de inmersión ya que el ánodo A1 está más próximo al ambiente (con 8 cm de profundidad) y el ánodo 6 a 22 cm de profundidad, por lo tanto la gráfica es la siguiente:

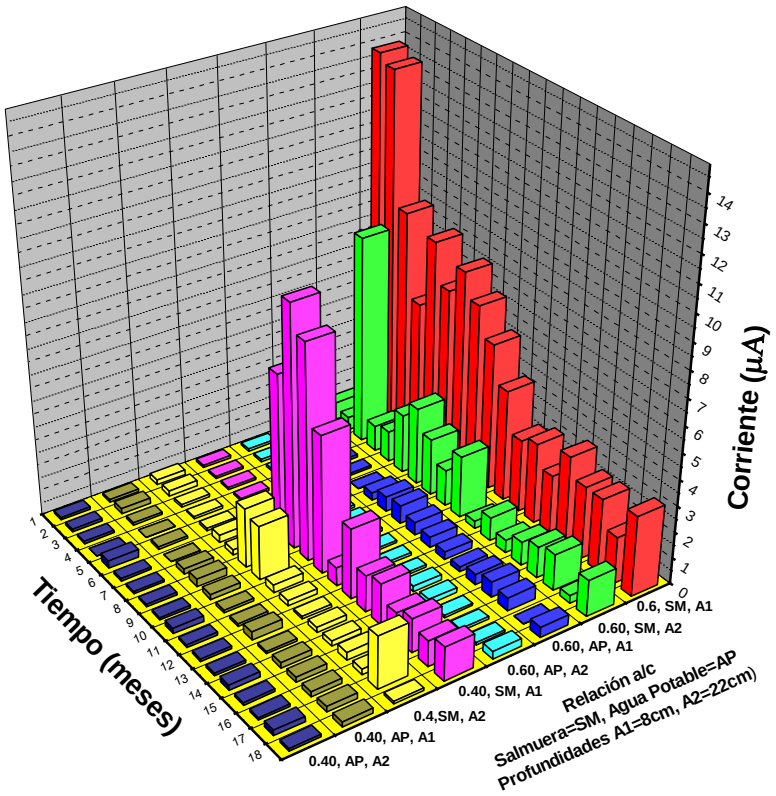


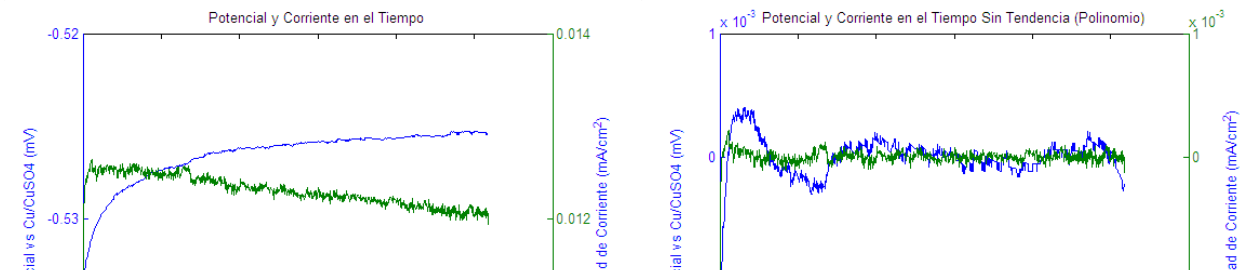
Figura No. 3.13 *Corrientes de macrocelda a profundidades de 8 y 22 cm*

La gráfica de la figura 13 muestra los resultados para las vigas SM143 y SM563, para ambas calidades del concreto, mostrando solamente las corrientes de los ánodos externos A1 y A6, comparados con dos vigas expuestas en agua potable, las cuales tuvieron casi nula activación en corriente. Los sensores a 8cm (A1) con respecto al nivel de inmersión, presentaron corrientes de macrocelda mas elevadas, hasta de 9 y 14 µA (con respecto al ánodo: 2.25 µA/cm^2 y 3.5 µA/cm^2) correspondientes a las vigas de mejor y menos calidad del concreto.

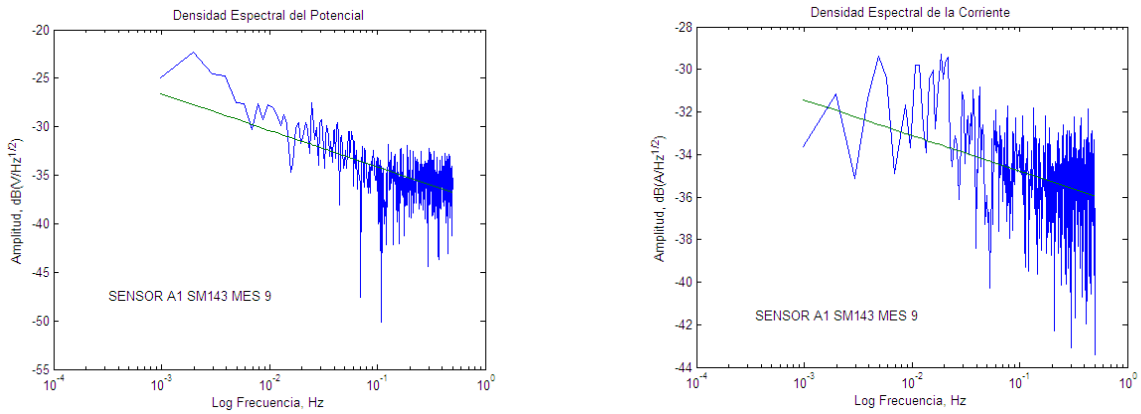
En el sensor a mayor profundidad de (22 cm) A2, los valores de corrientes de macrocelda fueron menores, hasta un tercio de los valores máximos encontrados, esto se debe que a mayor profundidad la difusión de oxígeno es más lenta, y por lo tanto disminuye la actividad de corrosión, aunque actualmente se ha revelado que aún sin la presencia de oxígeno otras reacciones de reducción dentro del concreto aseguran su desarrollo [76]. Estos valores tienen concordancia con otros autores que obtuvieron valores límite de corriente galvánica entre 15 y 16 µA, solo que bajo condiciones diferentes de ensayo y de materiales, con otros diseños y arreglos geométricos dentro del concreto [77, 78].

3.2.3 Ruido electroquímico del sensor y armadura

Dada la nula activación del sensor en agua potable, en este capítulo solo se presentan los resultados de las vigas expuestas en salmuera, para analizar si estas presentaron corrosión por cloruros. Se consideran para este caso las vigas seleccionadas como ejemplo (SM143 y SM563), para ambas calidades del concreto, tomando solo los ánodos externos o los que están dentro de la zona de recubrimiento y el acero de refuerzo. Las gráficas de las demás vigas se muestran en los anexo A y B de esta tesis, ya que los resultados en general son similares y seria repetitivo su análisis.



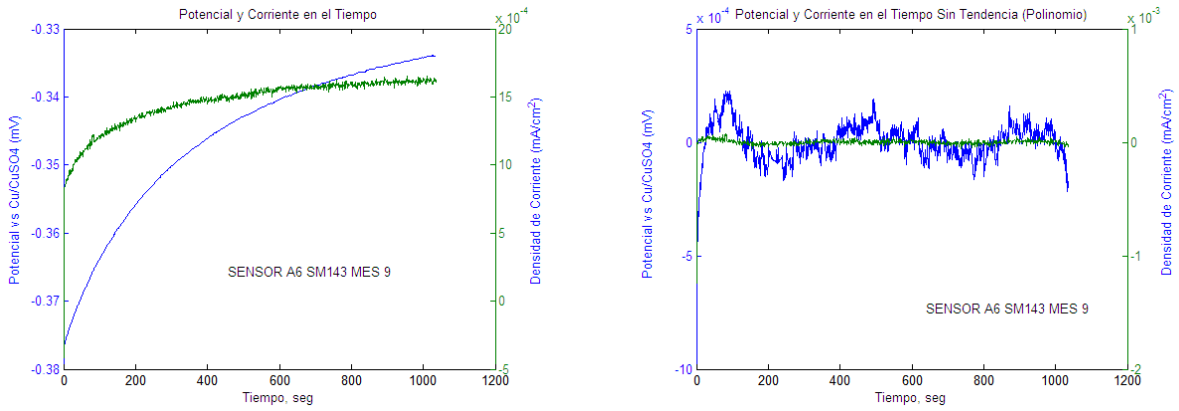
Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del sensor A1 en concreto de buena calidad después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda) y con remoción de la tendencia (derecha).



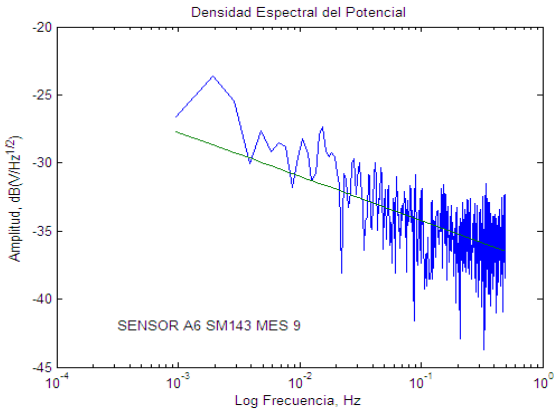
Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y el potencial, obtenidos del sensor A1 en concreto de buena calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

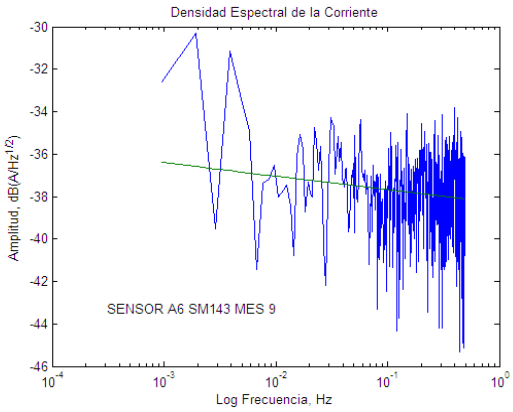
Figura No. 3.14 *Viga con relación a/c 0.40, expuesta en Salmuera*

Las gráficas A y B, de la figura 14 corresponden al ánodo A1 del sensor 1, para la viga con relación agua-cemento de 0.40, inmersos en salmuera. En general las series de potencial y corriente en el tiempo (gráfica A) presentaron frecuencias altas con bajas amplitudes, con transitorios escasos, demostrando en el análisis visual un tipo de corrosión generalizada. Las densidades espectrales (gráfica B) muestran una pendiente pronunciada, que es señal de un fenómeno de corrosión. En la densidad espectral del potencial la amplitud disminuye con las altas frecuencias, lo contrario a la densidad espectral de la corriente que aumenta su amplitud con las altas frecuencias.



Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del sensor A6 en concreto de buena calidad después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda) y con remoción de la tendencia (derecha).

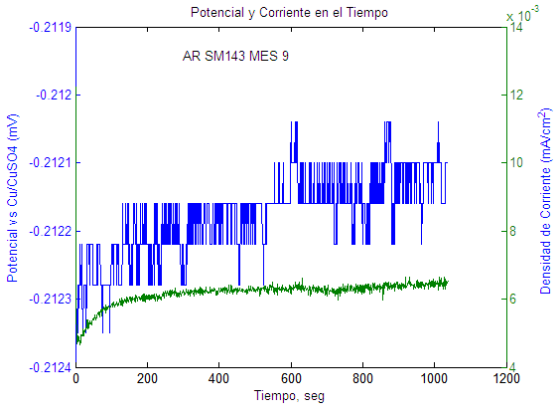


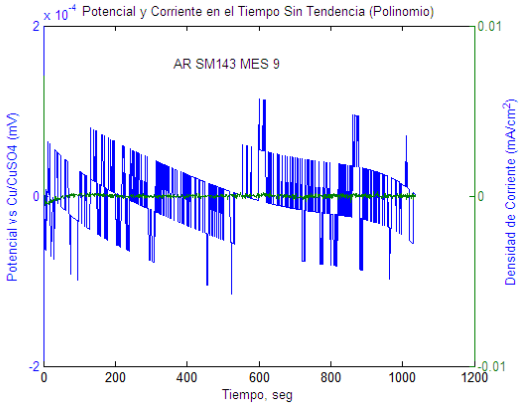


Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del sensor A6 en concreto de buena calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

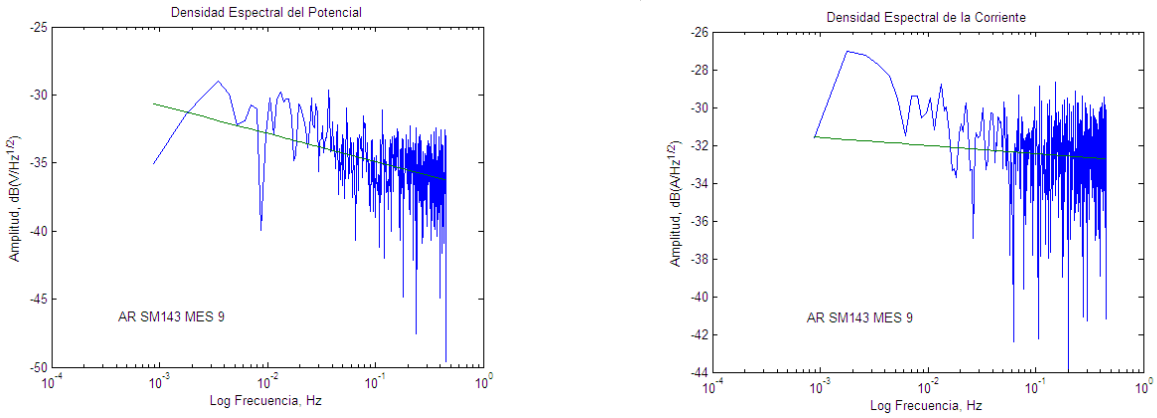
Figura No. 3.15 *Viga con relación a/c 0.40, expuesta en Salmuera*

Las gráficas A y B, de la figura 15 corresponden al ánodo A6 del sensor 1, para la viga con relación agua-cemento de 0.40, inmersos en salmuera. Las series de potencial y corriente en el tiempo (gráfica A) presentaron frecuencias altas con bajas amplitudes, con transitorios escasos, demostrando en el análisis visual un tipo de corrosión también generalizada. Las densidades espectrales (gráfica B) muestran una pendiente pronunciada que es señal o presencia de un fenómeno como la pasivación para la densidad espectral del potencial, aumentando su amplitud con las altas frecuencias. La densidad espectral de la corriente que aumenta su amplitud con las altas frecuencias, tiene menos pendiente y podría tratarse de un tipo de corrosión uniforme.





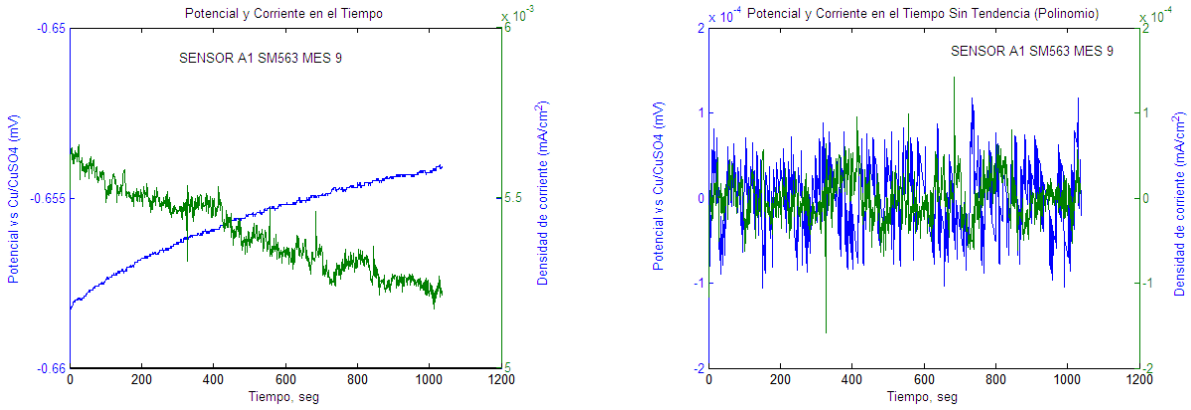
Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del acero de refuerzo AR en concreto de buena calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda) y con remoción de la tendencia (derecha).



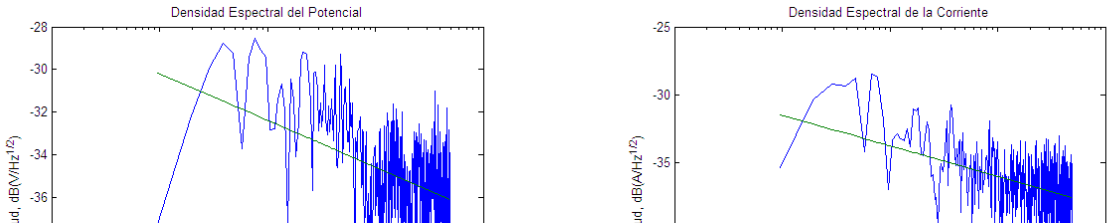
Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del acero de refuerzo (AR) en concreto de buena calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

Figura No. 3.16 *Viga con relación a/c 0.40, expuesta en Salmuera*

Las gráficas A y B, de la figura 16 corresponden al acero de refuerzo AR del sensor 1 para la viga con relación agua-cemento de 0.40, inmersos en salmuera. Las series de potencial y corriente en el tiempo (gráfica A) presentaron frecuencias altas con bajas amplitudes, con transitorios escasos, demostrando en el análisis visual un tipo de corrosión también generalizada. Las densidades espectrales (gráfica B) muestran una pendiente menos pronunciada que los ánodos A1 y A6, aumentando su amplitud con las altas frecuencias. En la densidad espectral de la corriente es muy ligera la pendiente pudiéndose tratar de un ruido blanco.



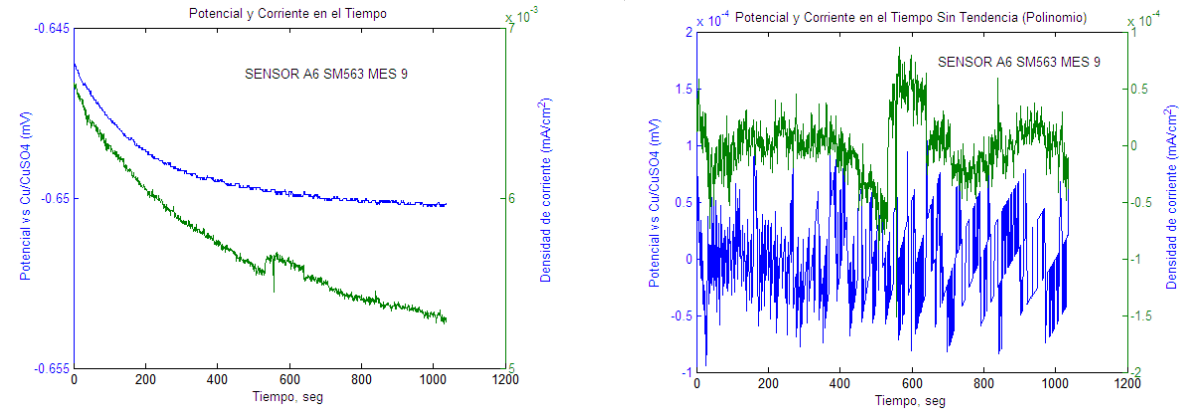
Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del sensor A1 en concreto de baja calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda) y con remoción de la tendencia (derecha).



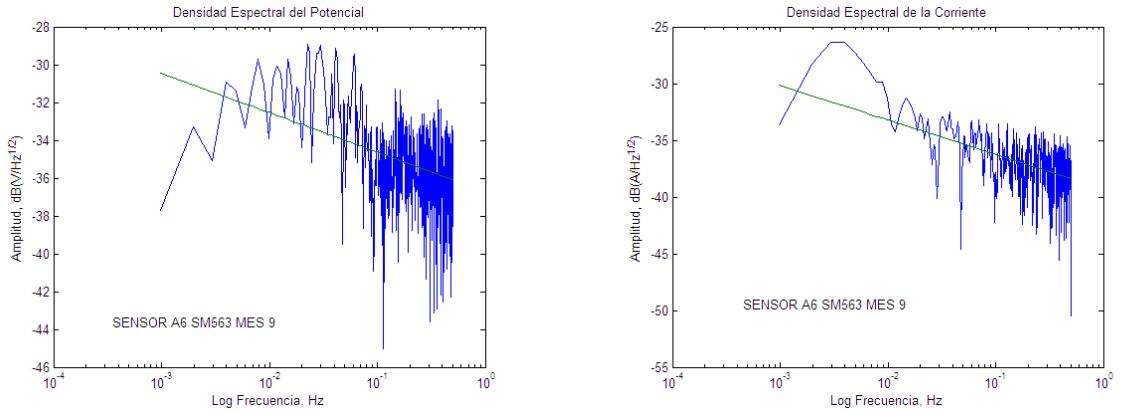
Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del sensor A1 en concreto de baja calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

Figura No. 3.17 *Viga con relación a/c 0.60, expuesta en Salmuera*

Las gráficas A y B, de la figura 17 corresponden al ánodo A1 del sensor 5, para la viga con relación agua-cemento de 0.60, inmersos en salmuera. Las series de potencial y corriente en el tiempo (gráfica A) presentaron frecuencias altas con bajas amplitudes, con ciertos resaltos en la señal de corriente que podría representar un tipo de corrosión generalizada, dado que no corresponde a la señal del ruido en potencial. Las densidades espectrales (gráfica B) muestran una pendiente pronunciada que es señal o presencia de un fenómeno de corrosión como la pasivación para la densidad espectral del potencial, y de la corriente, aumentando su amplitud con las altas frecuencias.



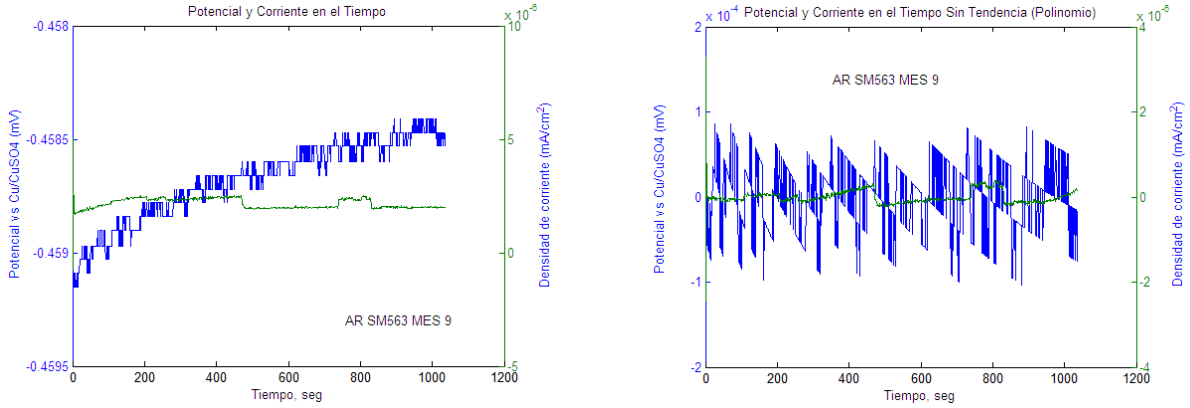
Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidos del sensor (A6) en concreto de baja calidad después de los 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda), sin tendencia (derecha).



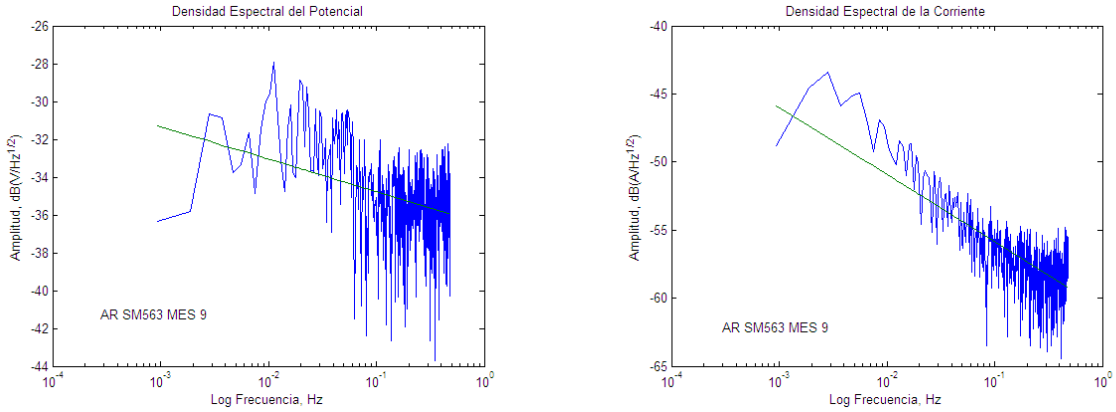
Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del sensor A6 en concreto de baja calidad después de 10 meses de inmersión en salmuera.

Figura No. 3.18 *Viga con relación a/c 0.60, expuesta en Salmuera*

Las gráficas A y B, de la figura 18 corresponden al ánodo A6 del sensor 5, para la viga con relación agua-cemento de 0.60, inmersos en salmuera. Las series de potencial y corriente en el tiempo (gráfica A) presentaron frecuencias altas con bajas amplitudes, con un salto en la señal de corriente que podría representar un tipo de corrosión generaliza. Las densidades espectrales (gráfica B) muestran una pendiente pronunciada, que es señal de un fenómeno de corrosión, para la densidad espectral del potencial, y de la corriente, aumentando su amplitud con las altas frecuencias.



Gráfica A. Serie de tiempo, obtenidas del acero de refuerzo AR en concreto de baja calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera, con tendencia (izquierda), y con remoción de la tendencia (derecha).



Gráfica B. Densidades espectrales de la corriente y potencial, obtenidas del acero de refuerzo AR en concreto de baja calidad, después de 10 meses de inmersión en salmuera.

Figura No. 3.19 *Viga con relación a/c 0.60, expuesta en Salmuera*

Las gráficas A y B, de la figura 19 corresponden al acero de refuerzo AR del sensor 5 para la viga con relación agua-cemento de 0.60, inmersos en salmuera. Las series de potencial y corriente en el

tiempo (gráfica A) presentaron frecuencias altas con bajas amplitudes, con transitorios escasos, demostrando del análisis visual

Relación (a/c)	Electrodo-Mes	Rn	Índice de Localización	Tipo de corrosión	PSD potencial	Tipo de corrosión	PSD corriente	Tipo de corrosión
0.40	A1-10	2.35E+04	0.0058	GENERALIZADA	-3.76	UNIFORME	-1.67	UNIFORME
0.40	A6-10	1.92E+04	0.0294	MIXTA	-3.24	UNIFORME	-0.63	PASIVACIÓN-UNIFORME
0.40	AR-10	1.26E+05	0.0878	MIXTA	-1.72	UNIFORME	-4.92	UNIFORME
0.60	A1-10	1.5E+04	0.0048	GENERALIZADA	-2.19	UNIFORME	-2.24	UNIFORME

un tipo de corrosión también generalizada. Las densidades espectrales (gráfica B) muestran una pendiente pronunciada aumentando su amplitud con las altas frecuencias. Lo que podría tratarse de algún fenómeno como la pasivación. Del análisis estadístico para estas vigas se obtuvieron los siguientes datos, correspondientes al tipo de corrosión obtenida de acuerdo al criterio de varios autores (Tabla II)

Tabla 3.II *Resultados con ruido electroquímico para los meses 10 y 18, en los electrodos A1, A6 y AR, de vigas con relación a/c=0.40 y 0.60 expuestos en salmuera.*

0.60	A6-10	1.4E+04	0.0046	GENERALIZADA	-2.09	UNIFORME	-3.03	UNIFORME
0.60	AR-10	2.26E+05	0.0406	MIXTA	-2.06	UNIFORME	-0.43	PASIVACIÓN-UNIFORME
0.40	A1-18	1.3E+04	0.0325	MIXTA	-2.93	UNIFORME	-3.98	UNIFORME
0.40	A6-18	2.5E+04	0.0175	MIXTA	-2.00	UNIFORME	-1.39	UNIFORME
0.40	AR-18	1.26E+05	0.0878	MIXTA	-1.72	UNIFORME	-4.92	UNIFORME
0.60	A1-18	1.4E+04	0.0246	MIXTA	-3.48	UNIFORME	-3.26	UNIFORME
0.60	A6-18	1.6E+04	0.0469	MIXTA	-3.38	UNIFORME	-2.32	UNIFORME
0.60	AR-18	1.40E+04	0.0548	MIXTA	-2.27	UNIFORME	-0.68	PASIVACIÓN-UNIFORME

Tabla 3.III *Tipos de corrosión en función de la pendiente del espectro de frecuencia* [79].

Tipo de corrosión	PENDIENTE (dB[V/Hz$^{1/2}$]/década)		PENDIENTE (dB[AHz$^{1/2}$]/década)	
	Máx.	***Min.***	***Máx.***	***Min.***
Pasivación	**-15**	**-25**	**1**	**-1**
Picado	**-20**	**-25**	**-7**	**-14**
Uniforme	**0**	**-7**	**0**	**-7**

Tabla 3.IV *Niveles por índice de localización* [80].

Índice de Localización	Tipo de corrosión
0.001-0.01	Generalizada
0.01-0.1	Mixta
0.1-1.0	Localizada
>1	Muy elevada

Las densidades espectrales del potencial en los sensores y el acero de refuerzo en general durante los 9 meses de monitoreo presentaron pendientes del orden -1.72 a -3.76 para las vigas de mejor calidad, y de -2.06 a -3.48 para las vigas de menos calidad. Los espectros de frecuencia en corriente para las vigas de mejor calidad presentaron pendientes del orden de -0.63 a -4.92 y para las de menos calidad -

0.43 y -3.26. Estos valores en función de la pendiente de las densidades espectrales de frecuencia, corresponden a un tipo de corrosión uniforme y de pasivación-uniforme [79]. También se obtuvieron las velocidades de corrosión:

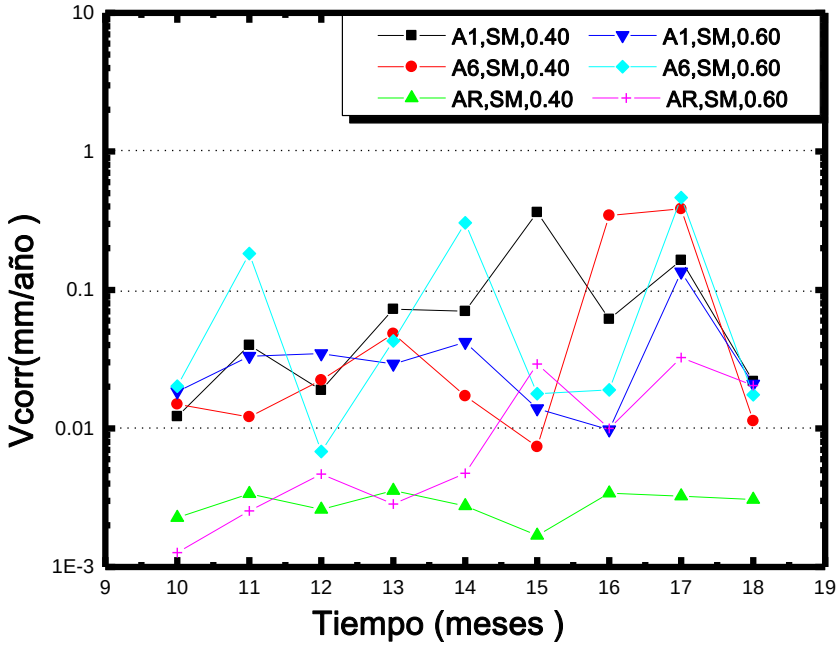


Figura No. 3.20 *Velocidades de corrosión del acero de refuerzo y sensores para ambas calidades del concreto, vigas (SM143, SM563)*

Las velocidades de corrosión del acero de refuerzo fueron de nivel moderado, con valores del orden 2.5 μm/año para las vigas de concreto de buena calidad, y del orden de 2.5 μm/año a un nivel alto con 20 μm/año en las vigas de menos calidad (para los meses 17 y 18). Los sensores presentaron niveles de corrosión relativamente muy altos del orden de 20 μm/año y 200 μm/año para ambas calidades del concreto [81], lo que representa la posible influencia de la relación de áreas de los electrodos del sensor, y del acero de refuerzo sobre el espacio circundante (figura 20). Dado el análisis estadístico de los espectros de frecuencia en los sensores esta velocidad de corrosión alta representa la pasivación del sistema y no de alguna activación por cloruros, no se discuten aquí estos resultados a detalle y solo se da la explicación conforme a los valores obtenidos en la experimentación, debido a la falta de pruebas para su análisis.

3.3 Pruebas químicas de los elementos del sensor

De acuerdo al análisis de la (tabla V), el material anódico usado en esta investigación corresponde a un acero 1017 (UNS G10170), de la

misma composición que la armadura (acero de refuerzo), el cátodo es de una acero inoxidable austenítico tipo 304 (UNS S30400) [82].

Tabla 3.V *Composición química de los elementos del sensor*

Elementos % peso	Cr	Ni	C	Mn	Si	S	P	Fe	Cu	Mo	Co
Acero al carbono	0.041	0.027	0.198	0.429	----	0.021	0.02	Bal	0.021	----	0.014
Acero inoxidable	16.364	7.719	0.072	2.003	0.484	0.032	0.045	Bal	0.356	0.595	0.101

La discusión respecto a este análisis es referente al resultado del acero de refuerzo que resulto ser de un valor menor a lo especificado por la industria de la construcción (acero 1018 comúnmente), es factible observar que representa a un acero más vulnerable al ataque por agentes agresivos y por lo tanto también a esfuerzos de tensión.

3.4 Pruebas de cloruros

Tabla 3.VI *(%) Iones cloruros solubles en agua presentes en el concreto y su equivalente con respecto al cemento*

Mezcla	*% Cl- con respecto al concreto*		*% Cl- con respecto al cemento*	
Ambiente	*Agua Potable*	*Salmuera*	*Agua Potable*	*Salmuera*
a/c: 0.40	*0.0000*	*0.0470*	*0.00*	*0.21*
a/c: 0.60	*0.0035*	*0.0650*	*0.02*	*0.44*

Los resultados de la prueba del contenido de cloruros dentro del concreto (Tabla VI), mostró cantidades despreciables de iones cloruro presentes en el agua del concreto para las vigas expuestas en agua potable. Las expuestas en salmuera tuvieron valores bajos en las vigas de buena calidad, y relativamente más alto (0.44) para las vigas de menor calidad, que de acuerdo con otros estudios, discusiones y resultados publicados, el valor de 0.40, representa el umbral del valor límite, que pueden representar un probable potencial riesgo de despasivación para la armadura y los ánodos del sensor, debido a que los umbrales de cloruros difieren de un medio a otro [83,84].

3.5 Resultados del ensaye a compresión

Conforme a un promedio de tres especímenes probados, por cada relación agua-cemento, del ensaye a compresión se obtuvieron los siguientes resultados promedio (Tabla VII). Estos valores resultaron

ser relativamente alto comparado con resultados obtenidos en otros ensayes y revisión de resultados en la literatura, lo que podría significar lo lento del proceso a pesar de estar en un ambiente agresivo del 5% NaCl. Así mismo se puede decir que los concretos elaborados bajo normativa y empleando la tecnología de laboratorio garantizan buena resistencia a la penetración de agentes agresivos, caso contrario se si elabora sin supervisión y sin normativa en teoría se registraría valores muy bajos, debido a la mala calidad del proceso empleado.

Tabla 3.VII *Resultados del ensaye a compresión simple*

Relación a/c	f´c = kg/cm^2
0.40	476
0.60	358

CAPÍTULO CUATRO

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Los potenciales de macrocelda del sensor (acero al carbono/ acero inoxidable) presentó muy buena correlación con respecto a los potenciales de corrosión, obteniendo un comportamiento aceptable y recomendable para la detección del daño por corrosión del acero de refuerzo.

- ✓ Las corrientes de macrocelda de las vigas expuestas en salmuera fueron más altas para las vigas de menor calidad que las de buena calidad, esto se debe a que los concretos más densos son más lentos para llevar a cabo el flujo de corriente iónica. Las vigas expuestas en agua potable tuvieron casi nula corriente para ambas calidades del concreto, sin ninguna señal de activación del sistema.

- ✓ La prueba de cloruros cerca del sensor revela un porcentaje de iones cloruro de 0.44% para la viga de menor calidad expuesta en salmuera; con una probabilidad suficiente para lograr despasivar el acero de refuerzo, o en su caso a los sensores de la macrocelda, que aumentarían su señal en potencial y corriente. Las vigas expuestas en agua potable, y la de mayor calidad expuesta en salmuera, presentaron despreciable y baja cantidad de iones cloruro, las cuales no tienen ningún problema del riesgo de ataque por estos.

- ✓ La información obtenida con la técnica de ruido electroquímico, demuestra que las vigas tienen corrosión uniforme y/o mixta sobre al acero de refuerzo y los sensores debido a la pasivación del sistema durante la formación de los óxidos, en el tiempo de exposición; excepto para la viga de menor calidad, que presenta en los meses 17 y 18 indicios de corrosión más altos, pero todavía sin presentar corrosión localizada.

- ✓ La utilización de la técnica electroquímica de medición de potenciales a circuito abierto es de gran ayuda para evaluar el funcionamiento de los sensores de macroceldas embebidos en concreto reforzado.

- ✓ Sobre las pruebas químicas y físicas resultaron de gran utilidad para detectar las mala calidad en el caso del acero de refuerzo

y la buena calidad de elaboración de la mezcla de concreto lo cual resulto acorde a los resultados esperados.

Recomendaciones:

- Hacer evaluaciones electroquímicas al cátodo del sensor para observar la evolución del oxigeno, o determinar la cantidad de oxigeno en el sistema para diferentes ambientes o situaciones.

- Probar los sensores en diferentes ambientes acuosos y concretos contaminados con diferentes cantidades de sales, o con diferentes conductividades.

- Probar diferentes arreglos variando la geometría y cantidades tanto de cátodos como de ánodos

- Al momento de generarse la corrosión por picaduras será necesario realizar otra prueba de cloruros a la profundidad del sensor y del acero de refuerzo.

- Hacer pruebas de absorción y resistencia del concreto.

- Probar otros métodos de ensayos acelerados, como el de humectación y secado. Así también podría probarse en un sistema dinámico para mayor aireación del ambiente utilizado.

- Probar si se trabaja con aceros los esfuerzos a tensión y microscopia de barrido de las fracturas.

- Si el concreto es el problema resultaría interesante hacer petrografía de muestras del concreto.

REFERENCIAS

INTRODUCCION

1. E.D. Verink. Economics of Corrosion. Uhlig´s Corrosion Handbook, Second Edition, Edited by R. Winston Revie. ISBN 0-471-15777-5. © 2000 John Wiley & Sons, Inc.

2. E.F. Gundaker. "Corrosion monitoring and protection for infrastructure proyects", 2nd Latin American Region Corrosion Congress, NACE, 1996

3. COMETT Project 7352 Cb Concrete repair technology, Proceedings of the short course at Taywood Engineering on 12 and 13 Sept 1995, Southall, UK.

4. J.M. Wong, F.P. Glasser, M.S. Imbabi. Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction. Cement & Concrete Composites; 29(2007), pp. 647-655.

5. Mindness S, Young JF, Darwin D. Concrete. 2nd ed. Pearson Education, Inc.; 2002.

6. Alhozaimy A, Soroushian P, Mirza F. Effects of curing conditions and age on chloride permeability of fly ash mortar. ACI Mater J 1996; 93(1): 87-95.

7. Corrosion Basic, An Introduction, National Association of Corrosion Engineers (NACE), USA, 1984, p.p 23, 40, 41.

8. R.J. Kessler, R. G. Powers and I. R. Lasa, "Cathodic Protection Using Zinc Sheet Anodes and an Ion Conductive Gel Adhesive", NACE Corrosion Congress ´97, Paper No. 234.

9. Dunker, K.R. and Rabbat, B.G. "Why America´s bridges are crumbling. *Scientific American,* 1993 (March), pp. 66-72.

10. A. del Valle, T. Pérez, y M. Martínez, "El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado", IMT, Publicación Técnica no. 182, Sanfandila Qro, 2001.

11. Schiessl P. y Raupach M. (1992). Monitoring System for the Corrosion Risk of Steel in Concrete Structures. In: Concrete International, pp. 52-55.

12. F. Almeraya, C. Gaona, y A. Martínez, "Monitoreo y Control de la Corrosión en Estructuras de Concreto", Publicación Técnica, Chihuahua, Chih.

13. Raupach M. (1996). Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete-theoretical background and practical consequences, Construction and Building Materials 10, pp. 329-338.

14. Raupach M. y Schiebl P. (2001). Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures, NDT&E International 34,6, pp. 435-442.

15. McCarter W.J., Chrisp T.M., Butler A. y Basheer P.A.M. (2001) Near-Surface Sensors for Condition Monitoring of Cover-Zone Concrete, Construction and Building Materials 15, pp. 115-124.

16. S. Ahmad, B. Bhattacharjrr, R. Watson. ACI Mater. J.94 (1997): p. 311.

17. ASTM G109. "Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Enviroments" (West Conshohocken, P.A: ASTM International, 1993).

Capítulo 1

18. Peguin, P., Rubaud, M., Longuet, P. y Zelwer, A.: (1972), Cahiers du Centre Scient. Et Tech. Du Bat., no. 130; Cahier no. 1109.

19. Andrade, C., Alonso, M.C., y Gonzalez, J.A.,(1990) "An Initial Effort to Use the Corrosion Rate Measurements for Estimating Rebar Durability," en Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, eds. N.S. Berke, V. Chaker, y D. Whiting, (Philadelphia, USA: ASTM, 1990), pp. 29-37.

20. Fontana, M. G., (1986), "Corrosion Engineering," 3ra Ed., (New York, New York, USA: Mc GrawHill, 1986), pp. 556.

21. Kosmatka, S., Panarese, W. (1992) Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Instituto Mexicano del cemento y del concreto, A.C. Primera Edición, México.

22. NMX-C-414-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Prueba.

23. "Cemento". Enciclopedia Microsoft® Encarta® Online 2007 http://es.encarta.msn.com © 1997-2007 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

24. ASTM C 150-99a. Standard Specification for Portland Cement. American Society for Testing and Materials (ASTM).

25. Flinn, R.A. and Trojan, P.K. (1990). Mild Steels. Houghton Mifflin Company. 4th Ed. Engineering Materials and Their Applications. Boston, USA. Pp. 410-425.

26. ASM HANDBOOK. (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Vol. 1, USA.

27. Ashby, M.F. and Jones, D.R.H. (1980). An Introduction to Their Properties and Aplications, Pergamon Press, Inc., Engineering Materials. Elmsford, N.Y. pp. 270-310.

28. Mangonon, P.T. (2001). Selección de Materiales Ferrosos. Prentice-Hall, Inc. Ciencia de Materiales-Selección de Materiales. Melbourne, FL. USA. Pp. 502-512.

29. Castro, P., Sanjuán, M.A. (2001) Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del concreto, A.C. Primera Edición. Capítulo 1. pág. 1-3.

30. ACI Committee 201, "Guide to durable concrete". Report ACI 201R, American Concrete Institute, Detroit, EUA, 1982

31. Tuutti, K. Corrosion of steel in concrete. CBI forskning/research, April, 1982.

32. S.C. Dexter and C.H. Culberson, Mater. Perform., 19(9), 16 (1980).

33. S.C. Dexter, in Metals Handbook, 9th ed., American society of Metals, Metals Park, OH, 1978, Vol. 1, p. 893.

34. Committee on Corrosion of Marine Structures, Kozai Club, Tokyo, Japan, Report on Corrosion of Marine Structures, 1974.

35. M.G. Richardson, "Carbonation of Reinforced Concrete-Its Causes and Management," Citis Ltd, New York, 1988.

36. González, M., (2000) "Guía Introductora a la durabilidad del concreto", Revista Ingeniería Civil, Parte I, v. 5 (20, 21, 22) Universidad Nacional de Ingeniería. Perú

37. Mehta, P. Kumar., (1986), "Concrete, Structure, Properties and Materials", Prentice-Hall, Inc., New Jersey

38. Bogue R.H.,Lerch W. (1993) "Hydration of Portland cement compounds" Industrial and engineering chemistry V. 26, Nº8.

39. Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. and Castro, P. (2001). Reply to the discussion by T.U. Mohammed and H. Hamada of the paper "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar". Cement and Concrete Research 31, pp. 839-840.

40. J.P. Broomfield "Corrosion of steel in concrete", E. and F.N. Spon, London, UK. (1997).

41. F. Mansfeld and J.V. Kenkel, Corros. Sci., Vol.16, p. 111 (1976).

42. Schiessl P. y Raupach M. (1992). Monitoring System for the Corrosion Risk of Steel in Concrete Structures. In: Concrete International, pp. 52-55.

43. Basic Corrosion. (2004). An Introduction. National Association of Corrosion Engineers. USA. pp. 5:25-5:27.

44. McCarter W.J. and Vennesland O. (2004). Sensor systems for use in reinforced concrete structures, Construction and Building Materials 18, pp. 351-358.

45. Arya C. y Vassie O. (1995). Influence of cathode-to-anode area ratio and separation distance on galvanic corrosion currents of steel in concrete containing chlorides. Cement and Concrete Research 25, pp. 989-998.

46. Pfeifer, D.W., Landgren, J.R., LeClaire, P.J. Zoob, A. (1984). Protective Systems for New Prestressed and Substructure Concrete – Pilot Time to Corrosion Studies. Technical Report, Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc., sponsored by the Federal Highway Administration.

47. González, J.A. (1989). "Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas". Consejo superior de investigaciones científicas, centro nacional de investigaciones metalúrgicas, Madrid, España

48. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelpia, USA. (1991).

49. Dawson J.L. (2005). Electrochemical noise measurement. In: Kearns JR, Scully JR, editors. Electrochemical noise measurement for corrosion applications, ASTM STP 1277. Annual Book of ASTM Standards, p.3.

50. W.P. Iverson, J. Electrochem. Soc., 115(6), 617 (1968)

51. K. Hladky, U.S. Patent No. 4,575,678.

52. D.A. Eden. Electrochemical noise. Uhlig´s Corrosion Handbook, Second Edition, Edited by R. Winston Revie. ISBN 0-471-15777-5. © 2000 John Wiley & Sons, Inc.

53. Uruchurtu, CH.J. Ph.D. Thesis UMIST. Manchester England, 1984.

54. Cottis, R. and Turgoose, S. (1999) Introduction. B.C.Syrett. Electrochemical Impedance and Noise. Corrosion Testing Made Easy. NACE International (Eds.) Houston, TX. pp. 1-7.

55. Uruchurtu, J. y Malo, J.M. (1992). La Técnica de Ruido Electroquímico para el Estudio de la Corrosión. UNAM.

56. R.A. Cottis. Corrosion, 2001. 73 p. 265.

57. HLADKY K., LOMAS J.P., JOHN D.G., EDEN D.A. and DAWSON J.L., "Corrosion Monitoring Using Electro-chemical Noise: Theory and Practice" Corrosion and Protection Center Industrial Services UMIST, England, 1988, pp. 227-230.

58. DAWSON J.L., COX W.M., EDEN D.A., HLADKY K. y JOHN D.G. "Corrosion Monitoring in Process Plant Using Advanced Electrochemical Techniques" First International Conference On-Line Surveillance and Monitoring. Venice. May.

59. Uruchurtu, CH.J. Ibidem.

60. R.A. Cottis. Ibidem.

61. Cottis, R. and Turgoose. Ibidem.

62. A.N. Rothwell and D.A. Eden. CORROSION/92, 1992. Paper no. 223. Houston, TX.

63. Sagües, A.A. (1991). Critical Issues in Electrochemical Corrosion Measurement. Techniques for Steel in Concrete. CORROSION/91, NACE. Paper 141.

64. Kelly, Inman and Hudson. ASTM (1996) "Electrochemical Noise Measurement for Corrosion applications", ASTM SPT-1277.

65. Uruchurtu, J. y Malo, J. Ibidem

66. Legat, A. and Dolecek, V. (1995) "Corrosion monitoring system based on measurement and analysis of electrochemical noise." Corrosion Science (Houston). Vol 51, No. 4.

Capítulo 2

67. NMX-C-414-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Prueba.

68. Kosmatka S. y Panarese W. (1992). Diseño y control de mezclas de concreto, Instituto Mexicano del Cemento A.C., 13 edición, ISBN-968-464-074-9, México.

69. NMX-C-159-ONNCCE Industria de la construcción – Concreto- Elaboración y curado en el laboratorio de especímenes.

70. ASTM C 192/C 192M-98. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

71. Wolf S. y Smith R. F.M. (1992) Guía para Mediciones Electrónicas y Prácticas de Laboratorio, © MCMXC by Prentice Hall Inc., ISBN 0-13-855776-4, 1ª edición en español por Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.

72. PROCEDIMIENTO LAQ03. (2005). Determinación del contenido de Al, C, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Si, Ti y Zn, de aceros al carbono y aceros inoxidables por ICP-AAE y CHNS-O, CIMAV-EMA, BAJO NORMA ISO/IEC-17025-2005, Méx.

73. ASTM D 1411-99. Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixtures in Graded Aggregate Road Mixes.

74. ASTM C-39-96. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

Capítulo 3

75. ASTM C876-91. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

76. Alonso, C., Andrade, C. and García A.M. (1998). The role of oxygen in the kinetic of the corrosion of reinforcements. In: Proceedings of Eurocorr´98.

77. Raupach M. y Schiebl P. (2001). Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures, NDT&E International 34,6, pp. 435-442.

78. Elsener, B. (2002). Macrocell corrosion of steel in concrete-implications for corrosion monitoring. Cement & Concrete Composites 24, pp. 65-72.

79. Legat y Dolecek. Corrosión Science (Houston). Vol 51, No. 4. 1995

80. Kelly, Inman and Hudson. ASTM SPT-1277. ASTM (1996)

81. Troconis. DURAR. CYTED. 1991

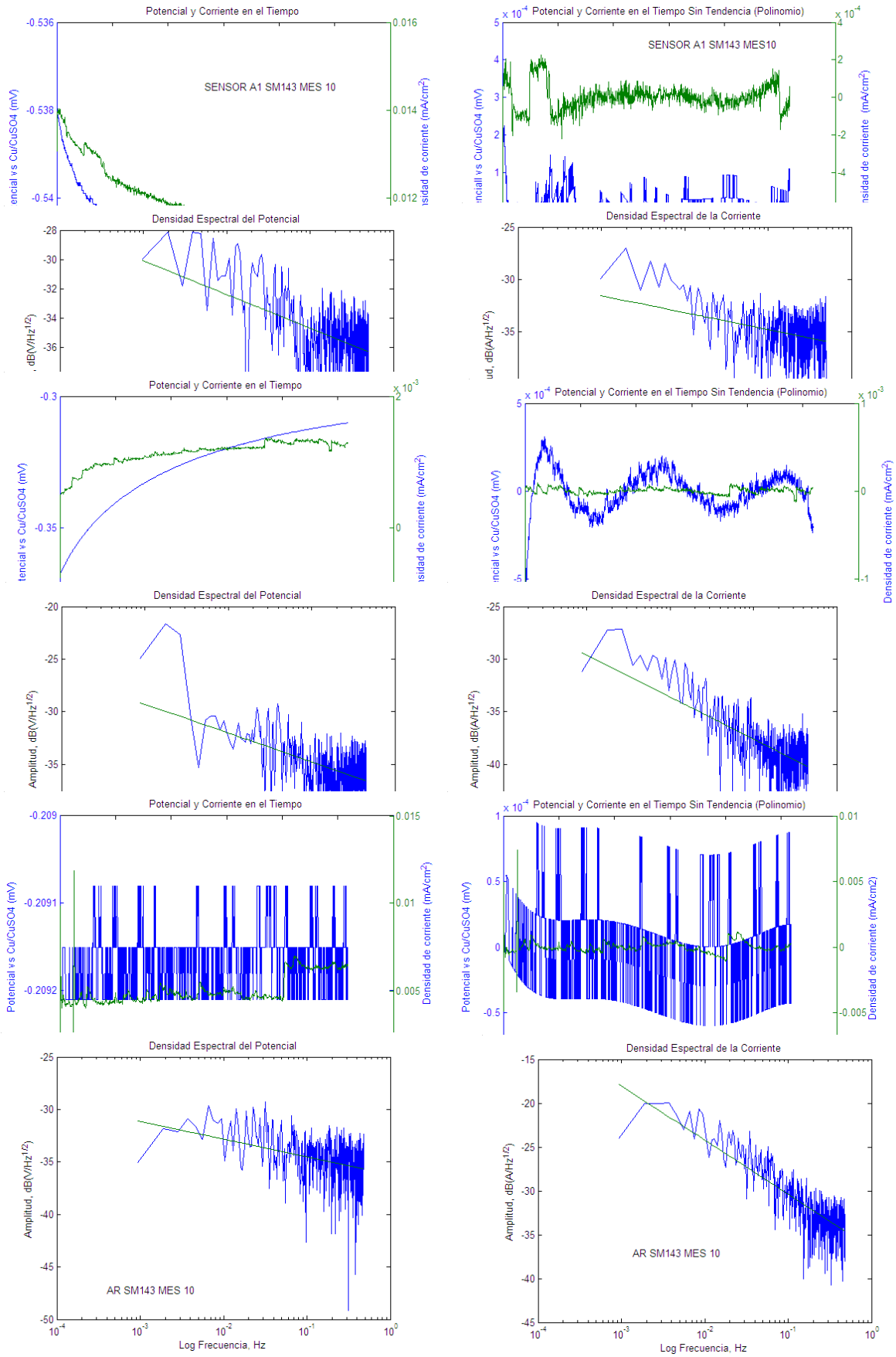
82. ASM HANDBOOK. (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Vol. 1, USA.

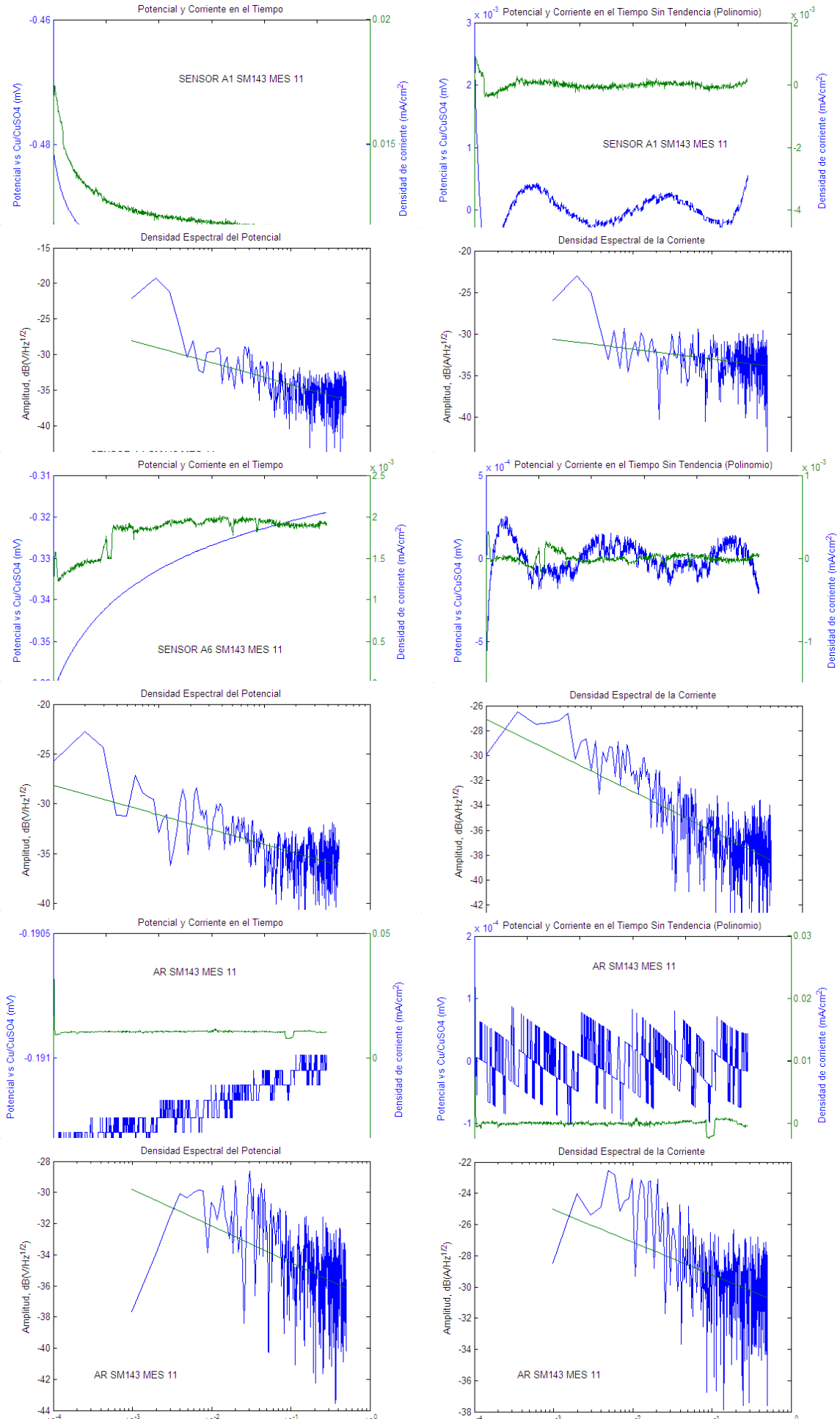
83. Mohammed, T.U. and Hamada, H. (2001). A discussion of the paper "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar" by C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, and P. Castro. Cement and Concrete Research 31, pp. 835-838.

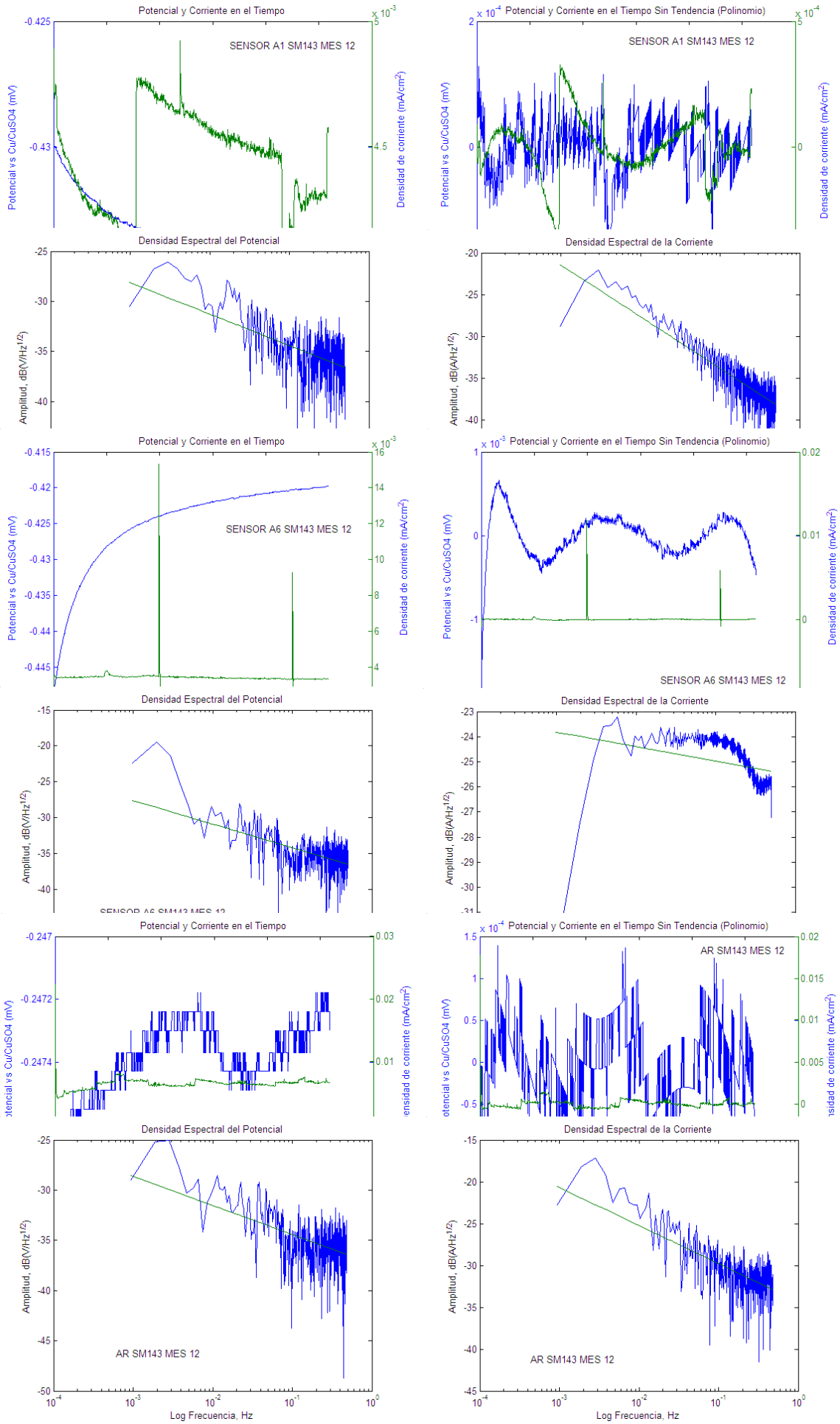
84. Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. and Castro, P. (2001). Reply to the discussion by T.U. Mohammed and H. Hamada of the paper "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar". Cement and Concrete Research 31, pp. 839-840.

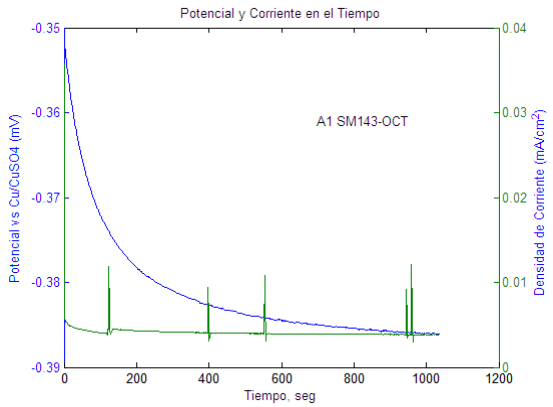
ANEXO A

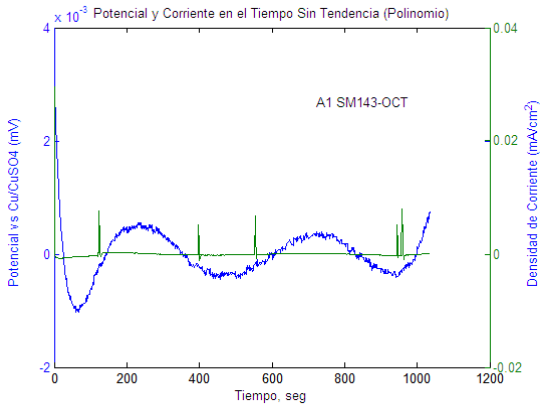
En este apartado se integran las gráficas restantes del monitoreo de Ruido Electroquímico correspondientes a los meses 10, 11,12,13,14,15,16 y 17 de los 9 meses de monitoreo, para los meses 9 y 18 son los que se mostraron con anterioridad dentro del capítulo tres de análisis de resultados.

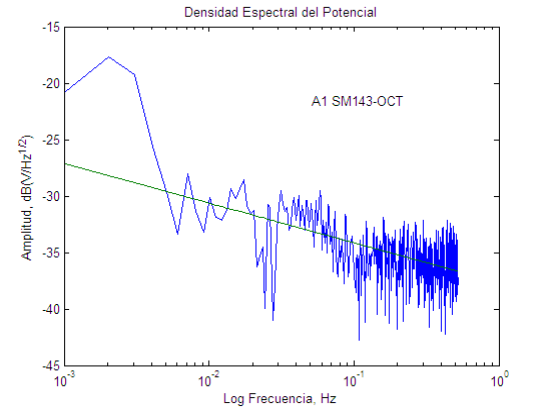


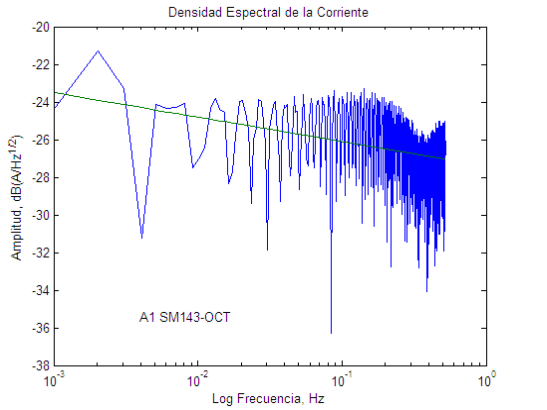

Potencial y Corriente en el Tiempo
SENSOR A1 SM143 MES 11
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm2)
Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
Densidad Espectral del Potencial
Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(V/Hz1/2)
Amplitud, dB(A/Hz1/2)
SENSOR A6 SM143 MES 11
AR SM143 MES 11

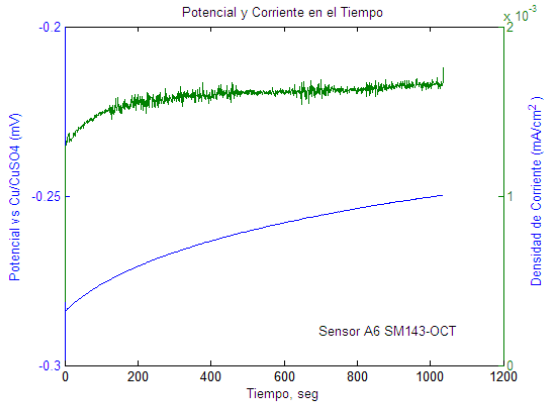

Potencial y Corriente en el Tiempo
SENSOR A1 SM143 MES 12
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm²)
Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
SENSOR A1 SM143 MES 12
Densidad Espectral del Potencial
Amplitud, dB(V/Hz^1/2)
Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(A/Hz^1/2)
Potencial y Corriente en el Tiempo
SENSOR A6 SM143 MES 12
Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
SENSOR A6 SM143 MES 12
Densidad Espectral del Potencial
Densidad Espectral de la Corriente
Potencial y Corriente en el Tiempo
Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
AR SM143 MES 12
Densidad Espectral del Potencial
AR SM143 MES 12
Densidad Espectral de la Corriente
AR SM143 MES 12
Log Frecuencia, Hz
Log Frecuencia, Hz

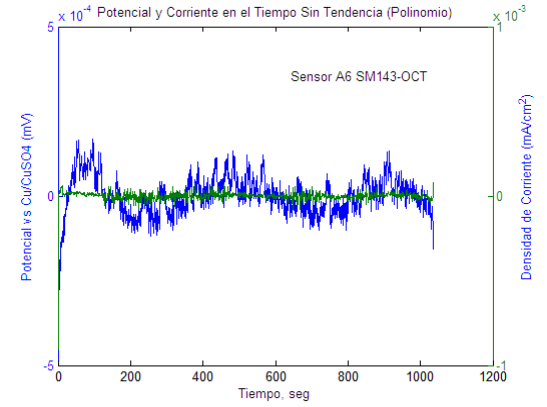

Potencial y Corriente en el Tiempo
A1 SM143-OCT
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de Corriente (mA/cm2)
Tiempo, seg

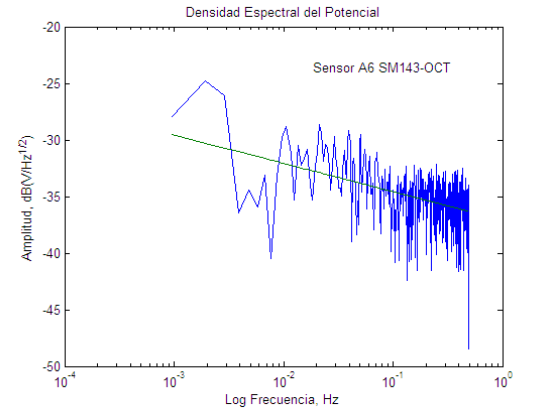

x 10-3 Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
A1 SM143-OCT
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de Corriente (mA/cm2)
Tiempo, seg

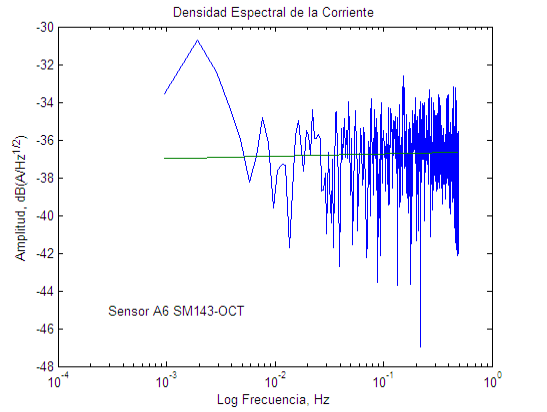

Densidad Espectral del Potencial
A1 SM143-OCT
Amplitud, dB(V/Hz1/2)
Log Frecuencia, Hz

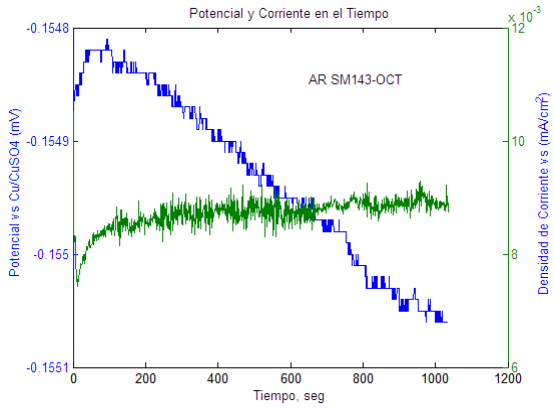

Densidad Espectral de la Corriente
A1 SM143-OCT
Amplitud, dB(A/Hz1/2)
Log Frecuencia, Hz

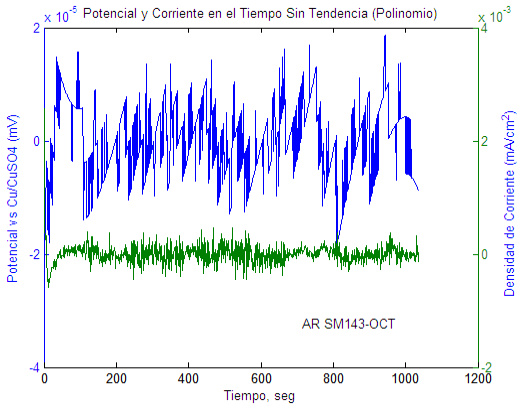

Potencial y Corriente en el Tiempo
Sensor A6 SM143-OCT
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de Corriente (mA/cm2)
Tiempo, seg

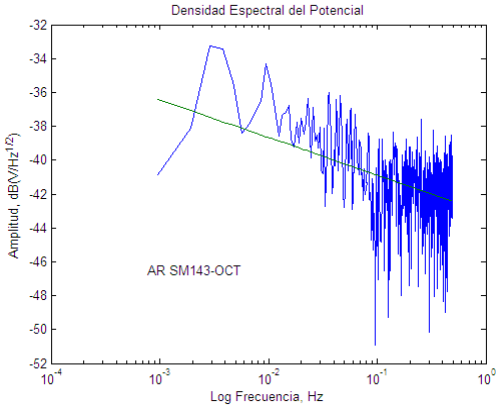

x 10-4 Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
Sensor A6 SM143-OCT
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de Corriente (mA/cm2)
Tiempo, seg

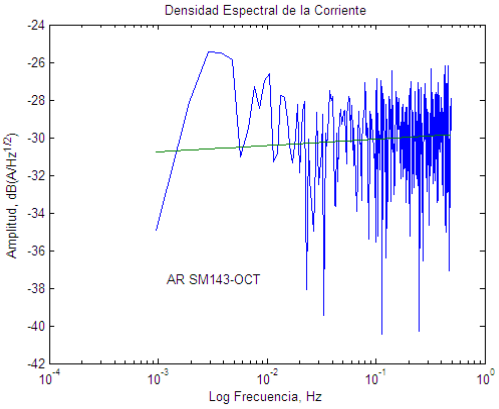

Densidad Espectral del Potencial
Sensor A6 SM143-OCT
Amplitud, dB(V/Hz1/2)
Log Frecuencia, Hz

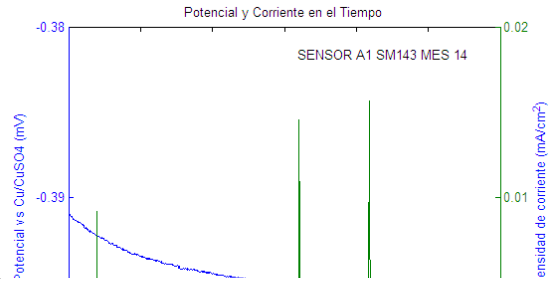

Densidad Espectral de la Corriente
Sensor A6 SM143-OCT
Amplitud, dB(A/Hz1/2)
Log Frecuencia, Hz

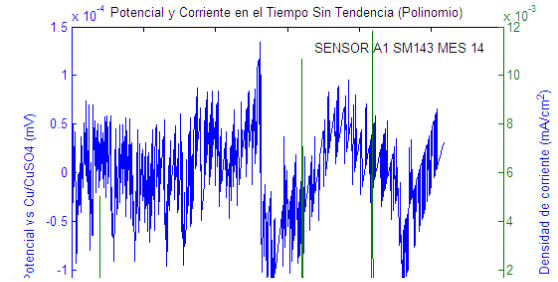

Potencial y Corriente en el Tiempo
AR SM143-OCT
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de Corriente vs (mA/cm2)
Tiempo, seg

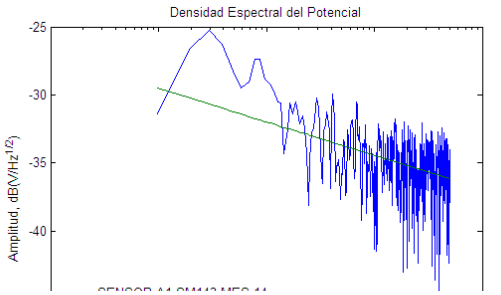

Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
AR SM143-OCT
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de Corriente (mA/cm2)
Tiempo, seg

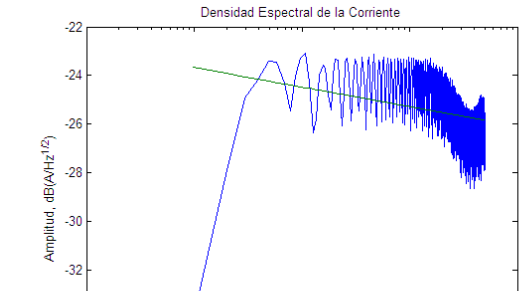

Densidad Espectral del Potencial
AR SM143-OCT
Amplitud, dB(V/Hz1/2)
Log Frecuencia, Hz

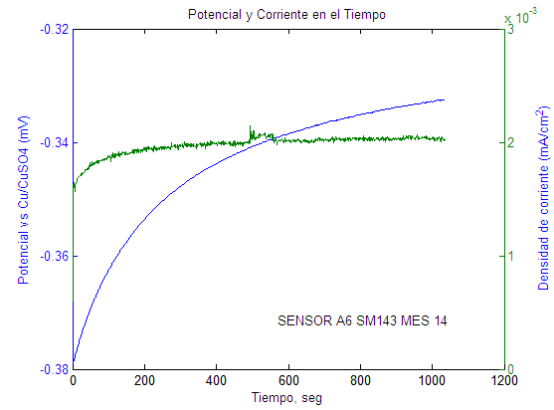

Densidad Espectral de la Corriente
AR SM143-OCT
Amplitud, dB(A/Hz1/2)
Log Frecuencia, Hz

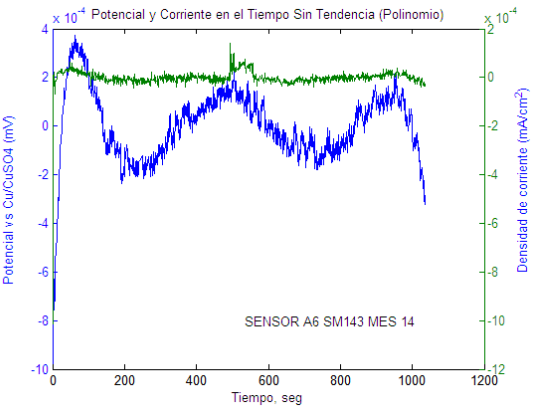

Potencial y Corriente en el Tiempo
SENSOR A1 SM143 MES 14

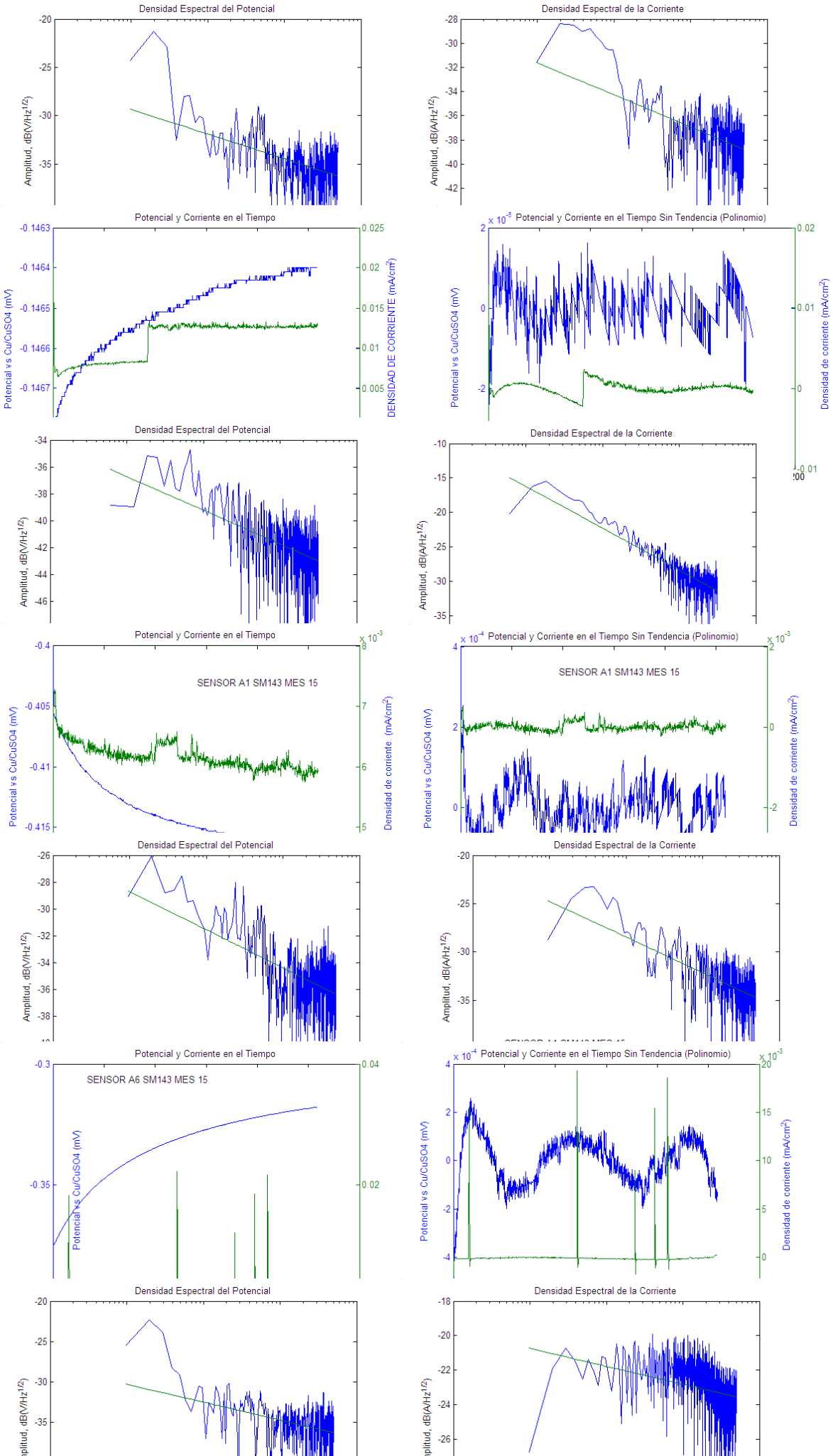

Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
SENSOR A1 SM143 MES 14
Densidad de corriente (mA/cm2)

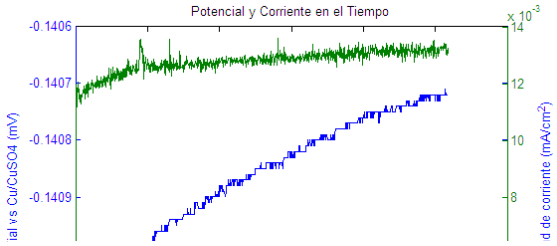

Densidad Espectral del Potencial
Amplitud, dB(V/Hz1/2)

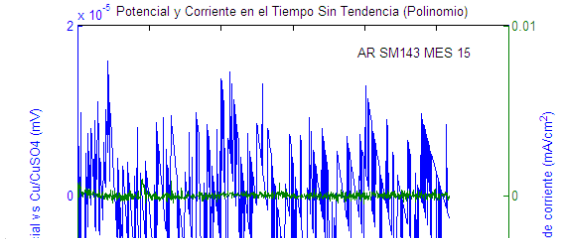

Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(A/Hz1/2)

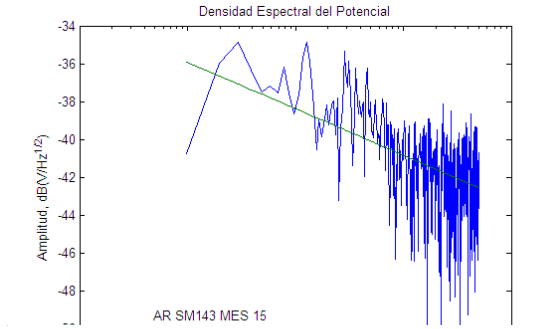

Potencial y Corriente en el Tiempo
SENSOR A6 SM143 MES 14
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm2)
Tiempo, seg

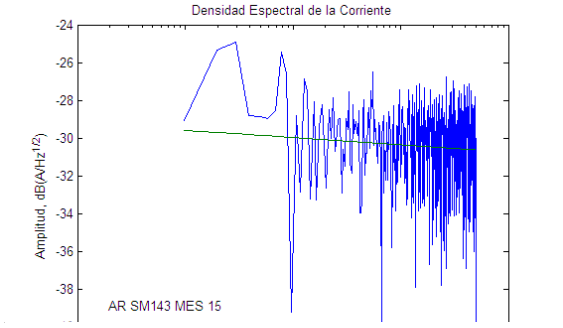

Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
SENSOR A6 SM143 MES 14
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm2)
Tiempo, seg

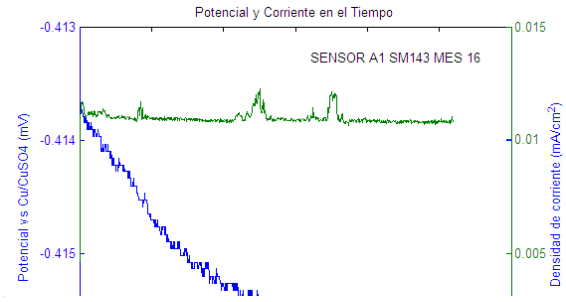

Densidad Espectral del Potencial
Amplitud, dB(V/Hz^1/2)
Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(A/Hz^1/2)
Potencial y Corriente en el Tiempo
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/cm^2)
Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
Densidad de corriente (mA/cm^2)
SENSOR A1 SM143 MES 15
SENSOR A6 SM143 MES 15

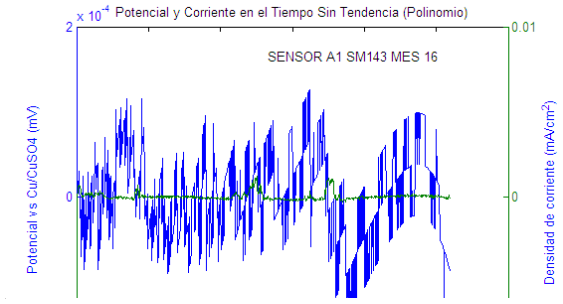

Potencial y Corriente en el Tiempo
ial vs Cu/CuSO4 (mV)
d de corriente (mA/cm²)

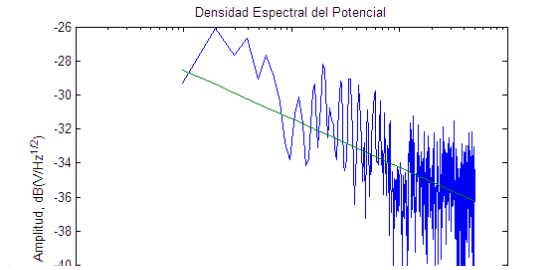

Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
AR SM143 MES 15
ial vs Cu/CuSO4 (mV)
de corriente (mA/cm²)

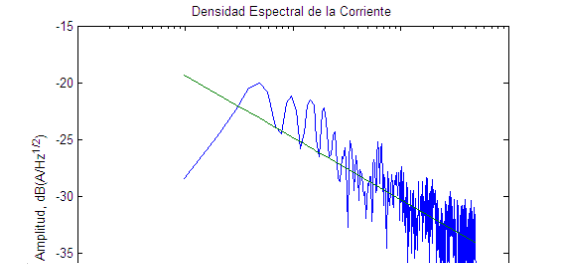

Densidad Espectral del Potencial
Amplitud, dB(V/Hz^1/2)
AR SM143 MES 15

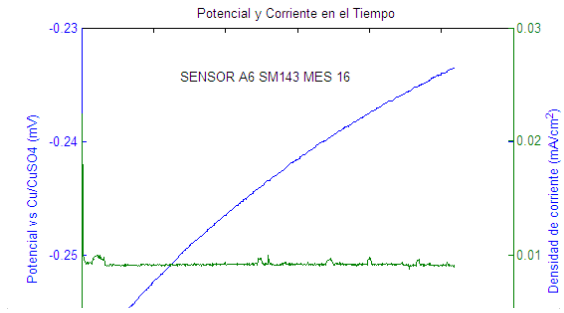

Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(A/Hz^1/2)
AR SM143 MES 15

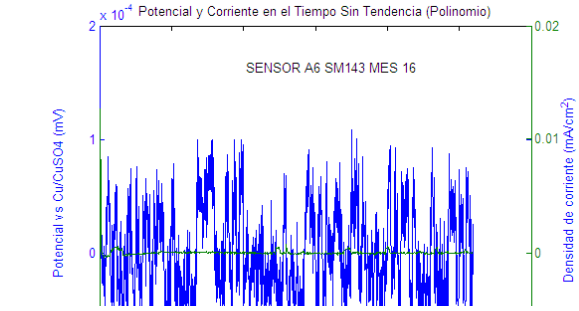

Potencial y Corriente en el Tiempo
SENSOR A1 SM143 MES 16
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm²)

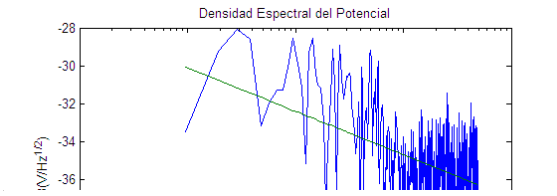

Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
SENSOR A1 SM143 MES 16
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm²)

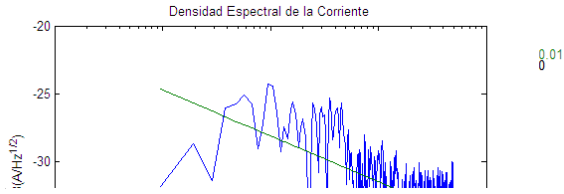

Densidad Espectral del Potencial
Amplitud, dB(V/Hz^1/2)

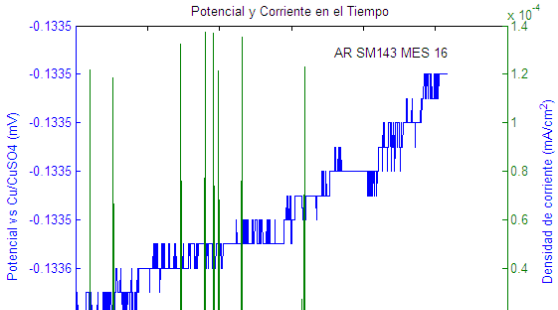

Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(A/Hz^1/2)

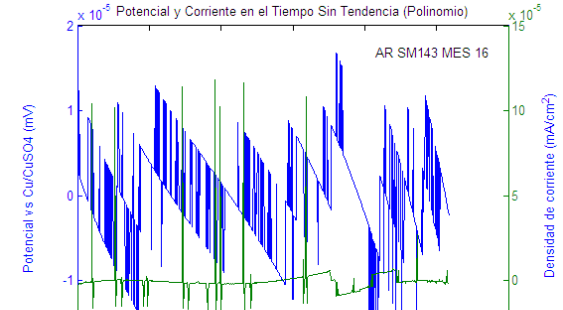

Potencial y Corriente en el Tiempo
SENSOR A6 SM143 MES 16
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm²)

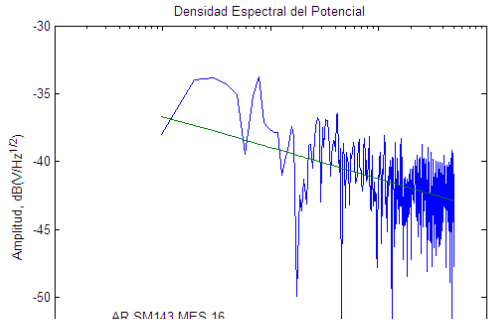

Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
SENSOR A6 SM143 MES 16
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm²)

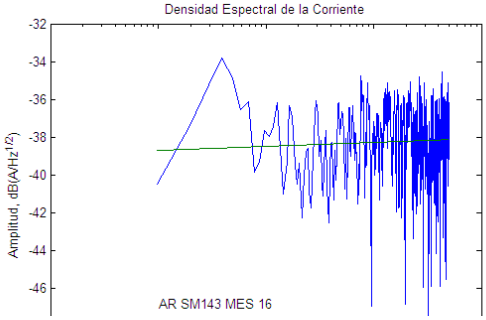

Densidad Espectral del Potencial

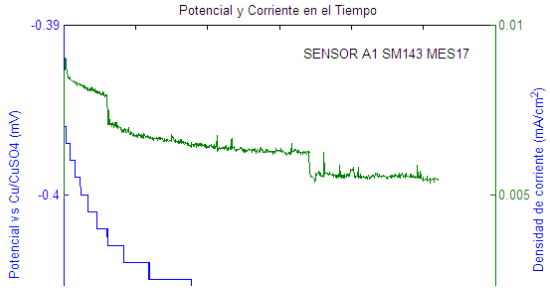

Densidad Espectral de la Corriente

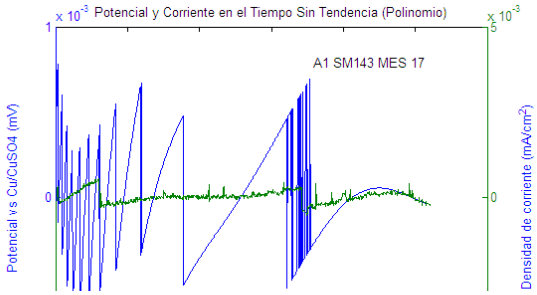

Potencial y Corriente en el Tiempo
AR SM143 MES 16
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm²)

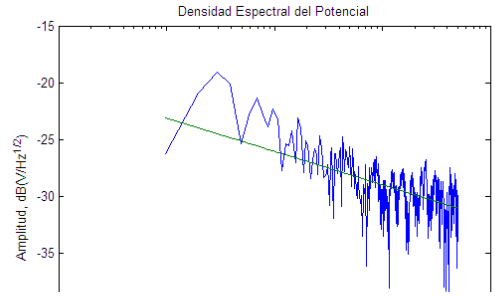

Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
AR SM143 MES 16
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm²)

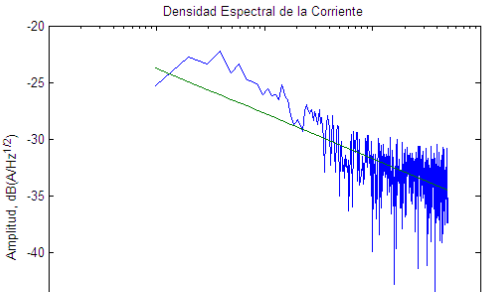

Densidad Espectral del Potencial
Amplitud, dB(V/Hz^1/2)
AR SM143 MES 16

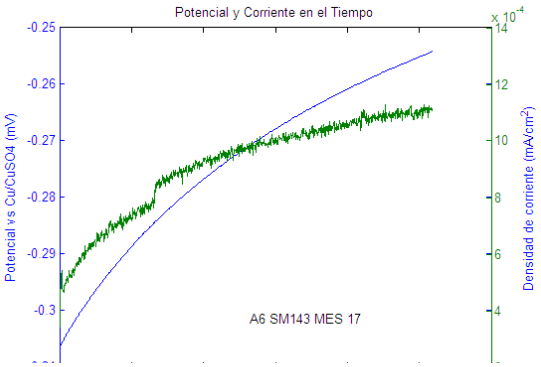

Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(A/Hz^1/2)
AR SM143 MES 16

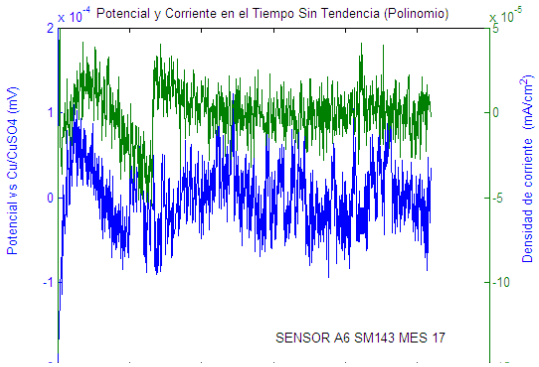

Potencial y Corriente en el Tiempo
SENSOR A1 SM143 MES17
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm^2)

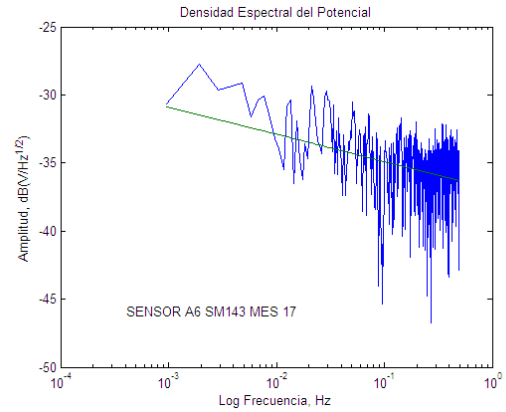

x 10^-3 Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
A1 SM143 MES 17
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm^2)

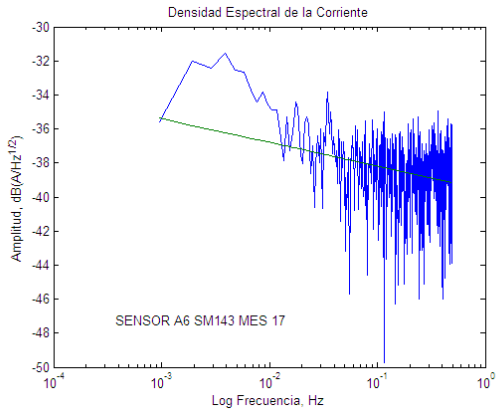

Densidad Espectral del Potencial
Amplitud, dB(V/Hz^1/2)


Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(A/Hz^1/2)


Potencial y Corriente en el Tiempo
x 10^-4
A6 SM143 MES 17
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm^2)


x 10^-4 Potencial y Corriente en el Tiempo Sin Tendencia (Polinomio)
x 10^-5
SENSOR A6 SM143 MES 17
Potencial vs Cu/CuSO4 (mV)
Densidad de corriente (mA/cm^2)


Densidad Espectral del Potencial
Amplitud, dB(V/Hz^1/2)
SENSOR A6 SM143 MES 17
Log Frecuencia, Hz


Densidad Espectral de la Corriente
Amplitud, dB(A/Hz^1/2)
SENSOR A6 SM143 MES 17
Log Frecuencia, Hz