UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS ANTIOXIDANTES COMO INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN EN CONCRETO REFORZADO

POR

OLGA SALINAS MONTFORT

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

DICIEMBRE 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS ANTIOXIDANTES COMO INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN EN CONCRETO REFORZADO

POR

OLGA SALINAS MONTFORT

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
DIRECTOR DE TESIS

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
CO-DIRECTOR DE TESIS

DICIEMBRE 2025

EVALUACIÓN DE MATERIALES ORGÁNICOS ANTIOXIDANTES COMO INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN EN CONCRETO REFORZADO

Aprobación de la tesis:

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

NOMBRE Y FIRMA DEL ASESOR

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

NOMBRE Y FIRMA DEL EVALUADOR 2

DRA. ELIZABETH ALEMÁN HUERTA

NOMBRE Y FIRMA DEL EVALUADOR 3

DR. JOSE MANUEL MENDOZA RANGEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a Dios por la fortuna de la vida y por la bendición de la familia que tengo.

Al Dr. Alejandro Durán Herrera, mi asesor de tesis, por siempre creer en mí para la resolución de este proyecto, por motivarme a seguir avanzando y desarrollarme en diferentes áreas de mi vida profesional y personal. Es un honor haber trabajado con usted.

Al Dr. Gerardo Fajardo, co-director de tesis, por guiarme en los temas desconocidos y motivarme a ser mejor cada día. A la Dra. Elizabeth Alemán Huerta por formar parte del comité de tesis, quien me brindó sus valiosos consejos y experiencias a lo largo de este camino.

A las autoridades de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L y del Instituto de Ingeniería Civil de la U.A.N.L, en especial al Departamento de Tecnología del Concreto por facilitarme los materiales y equipos necesarios para el desarrollo de este proyecto, de igual manera al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción de la F.I.C, al Departamento de Alimentos de la Facultad de Biología de la U.A.N.L y por último al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para la realización de mis estudios.

Al Ing. Sergio Flores Doria de Concretos Tepeyac S.A. de C.V. por la donación del cemento portland compuesto 40 necesario para la fase experimental de este proyecto, así mismo a EUCOMEX S.A. de C.V. que por medio del Ing. Vicente Marín se donaron los aditivos EUCON CIA y Accelguard TGD necesarios para la realización de esta investigación y por último a MIEM S.A. de C.V. por el préstamo de sus instalaciones para maquinar equipo necesario.

Por último, quiero agradecer a los Doctores Lucio Yépez, René Vázquez y al Daniel López por sus sabios consejos para facilitarme la resolución técnica de mi proyecto. ¡Gracias!

Dedicatoria

A Dios

Por darme la fuerza y salud necesaria para concluir este proyecto, por darme sabiduría y tesón ante cada obstáculo que se me presentó a lo largo de este camino, por siempre ayudarme a ver lo bueno dentro de cada experiencia.

A mis Padres

Saúl y Olga, por ser mis pilares, sin ellos no lograría nada. ¡Gracias! por siempre motivarme a aspirar más allá, por siempre apoyarme en todos los aspectos posibles de la vida, el ser su hija es una bendición.

A mi Incondicional

Diego Q., por estar conmigo en etapas importantes de mi camino, por siempre apoyarme en cada decisión, gracias por haber compartido tu vida conmigo.

A mi Familia

Saul, Santiago, Sofía, Victoria y Tío que en estos 2 años me apoyaron en una u otra actividad, me vieron esforzarme cada día en este proyecto, Gracias por ser mi familia.

A mis Amigos

Primero a mis compañeros de posgrado Sunny, Antonio, Ramón y Xilotl, que siempre han estado con un cálido ¿Cómo vas?; a Wilmer por ayudarme con los cloruros y convertirse en mi amigo colombiano; a todos los de Tecno, Beto, Jorge Castro, Alex, Axel, Hiram, e Iván por ayudarme a subir y bajar mis especímenes siempre; a los que me adoptaron de 9:00am a 6:00pm y me decían “ya casi”, Sr. Gumaro, Luis, Dr. Daniel López, Memo, Silvia; y en especial a Mónica, Rebeca, Andrés, Jorge, Jonny, David, Luis Carlos y Julián, que sin tener obligación me ayudaron. Lilia y Lupita por siempre estar. ¡Gracias! No hubiera logrado esto sin ustedes.

Resumen

La corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto es uno de los problemas de durabilidad más desafiantes; además de tener como consecuencia la reducción del período útil de las estructuras de concreto, implica costos elevados de reparación y mantenimiento.

Existen distintas tecnologías para prevenir de la corrosión, dentro de las principales están los aditivos inhibidores comerciales, los cuales han demostrado que tienen efectos negativos en algunas propiedades del concreto. Dentro de las más destacables están la disminución de la resistencia a edades tardías y disminución de la capacidad plástica (aceleran los tiempos de fraguado).

Debido a esto se ha impulsado investigar alternativas de materiales con potencial de inhibir la corrosión; en este trabajo, por su capacidad antioxidante se evaluaron la *Sábila* (*Aloe Vera)* y el *Nopal (Opuntia Ficus-Indica)* como materiales antioxidantes.

Dentro de esta investigación se evaluaron los efectos que tienen en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto reforzado y el potencial de inhibición que proporcionarían en términos de durabilidad, sometidos a un ambiente expuesto a cloruros y dióxido de carbono.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 ..... - 1 -

1.1 INTRODUCCIÓN ..... - 1 -
1.2 CONTEXTO DEL PROBLEMA ..... - 3 -
1.3 ANTECEDENTES ..... - 5 -
1.3.1 Aspectos relacionados con el empleo de Nopal ..... - 5 -
1.3.2 Aspectos relacionados con el empleo de Sábila ..... - 7 -

CAPÍTULO 2 ..... - 9 -

2.1 MARCO TÉORICO ..... - 9 -
2.1.1 Tecnología del concreto ..... - 9 -
2.1.1.1 Naturaleza del concreto ..... - 9 -
2.1.1.2 Porosidad del concreto ..... - 11 -
2.1.1.3 Alcalinidad del concreto ..... - 13 -
2.1.2 Corrosión del acero de refuerzo ..... - 15 -
2.1.2.1 Capa pasiva del acero de refuerzo ..... - 19 -
2.1.2.2 Mecanismos de corrosión ..... - 21 -
2.1.2.2.1 Corrosión del acero de refuerzo por ataque de cloruros ..... - 21 -
2.1.2.2.2 Corrosión del acero de refuerzo por exposición de CO_2 ..... - 24 -
2.1.2.3 Técnicas para protección de la corrosión ..... - 27 -
2.1.2.3.1 Técnicas electroquímicas ..... - 28 -
2.1.2.3.2 Técnicas no electroquímicas ..... - 30 -
2.1.3 Materiales naturales empleados como inhibidores de la corrosión ..... - 40 -
2.1.3.1 Capacidad antioxidante de un material natural ..... - 40 -
2.1.3.2 Determinación de la capacidad antioxidante ..... - 42 -
2.1.4 Evaluación del estado de corrosión en estructuras de concreto reforzado ..... - 44 -
2.1.4.1 Medición del potencial de corrosión de media celda ..... - 45 -
2.1.4.2 Resistencia a la polarización lineal ..... - 45 -
2.1.4.3 Espectroscopía de impedancia electroquímica ..... - 47 -
2.1.4.4 Resistividad eléctrica del concreto ..... - 49 -
2.1.4.5 Contenido de cloruros ..... - 50 -
2.1.4.6 Profundidad de carbonatación ..... - 53 -
2.1.5 Durabilidad de las estructuras de concreto reforzado ..... - 54 -
2.1.5.1 Modelo de Tutti ..... - 55 -

CAPÍTULO 3 ..... - 56 -

3.1 JUSTIFICACIÓN ..... - 56 -
3.2 HIPÓTESIS ..... - 57 -
3.3 OBJETIVOS ..... - 57 -
3.3.1 OBJETIVO GENERAL ..... - 57 -
3.3.2 OBJETIVOS ESPECIFÍCOS ..... - 57 -

CAPÍTULO 4 ..... - 58 -

4.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL ..... - 58 -
4.1.1 Descripción de la materia prima empleada ..... - 58 -
4.1.1.1 Cemento ..... - 58 -
4.1.1.2 Agregados ..... - 59 -
4.1.1.3 Acero de refuerzo ..... - 59 -
4.1.1.4 Materiales naturales ..... - 59 -
4.1.1.5 Aditivos ..... - 60 -
4.1.2 FASE 1.- Caracterización de materiales ..... - 60 -
4.1.2.1 Pruebas fisicoquímicas ..... - 60 -
4.1.2.1.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX) ..... - 61 -
4.1.2.1.2 Difracción de Rayos X (DRX) ..... - 61 -
4.1.2.1.3 Análisis Termogravimétrico (TGA) ..... - 62 -

4.1.2.1.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) - 62 -
4.1.2.1.5 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) - 63 -
4.1.2.1.6 Densidad - 63 -
4.1.2.1.7 Absorción - 65 -
4.1.2.2 Pruebas fitoquímicas - 66 -
4.1.2.2.1 DPPH y ABTS - 66 -
4.1.3 FASE 2.- Diseño experimental - 67 -
4.1.3.1 Configuración de especímenes - 68 -
4.1.3.1.1 Bajo condiciones estándar - 68 -
4.1.3.1.2 Corrosión inducida por cloruros - 69 -
4.1.3.1.3 Bajo exposición de CO_2 - 71 -
4.1.3.2 Preparación previa de material - 72 -
4.1.3.2.1 Fabricación de molde para probetas electroquímicas - 72 -
4.1.3.2.2 Habilitación del acero de refuerzo para pruebas electroquímicas - 73 -
4.1.3.3 Ambientes de exposición - 75 -
4.1.3.3.1 Carbonatación acelerada - 75 -
4.1.3.3.2 Exposición a cloruros - 75 -
4.1.4 FASE 3.- Pruebas en estado fresco del concreto - 76 -
4.1.4.1 Tiempos de fraguado en concreto - 76 -
4.1.4.2 Revenimiento - 77 -
4.1.4.3 Contenido de aire - 78 -
4.1.5 FASE 4.- Pruebas en estado endurecido del concreto - 78 -
4.1.5.1 Resistencia a la compresión - 78 -
4.1.5.2 Resistividad - 79 -
4.1.5.2.1 Resistividad Bruta (Bulk) - 79 -
4.1.5.2.2 Resistividad Superficial (Wenner) - 80 -
4.1.5.3 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) - 80 -
4.1.5.3.1 Especímenes expuestos a cloruros - 80 -
4.1.5.3.2 Especímenes expuestos a CO_2 - 82 -
4.1.5.4 Resistencia a la polarización lineal (RPL) - 83 -
4.1.5.4.1 Especímenes expuestos a cloruros - 83 -
4.1.5.4.2 Especímenes expuestos a CO_2 - 83 -
4.1.5.5 Contenido de cloruros - 83 -
4.1.5.5.1 Cloruros totales - 85 -
4.1.5.5.2 Cloruros libres - 85 -
4.1.5.5.3 Umbral de cloruros - 86 -
4.1.5.6 Profundidad de carbonatación - 86 -
4.1.5.7 Capacidad antioxidante - 87 -

CAPÍTULO 5 - 89 -

5.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN - 89 -
5.1.1 FASE 1.- Caracterización de materiales - 89 -
5.1.1.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX) - 89 -
5.1.1.2 Difracción de Rayos X (DRX) - 89 -
5.1.1.3 Análisis Termogravimétricos (TGA) - 92 -
5.1.1.4 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) - 93 -
5.1.1.5 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) - 94 -
5.1.1.6 Capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) - 98 -
5.1.1.7 Densidad y Absorción - 100 -
5.1.2 FASE 2.- Diseño experimental - 101 -
5.1.3 FASE 3.- Pruebas en estado fresco - 102 -
5.1.3.1 Tiempo de fraguado en concreto - 102 -
5.1.3.2 Revenimiento - 104 -
5.1.3.3 Contenido de aire - 105 -
5.1.4 FASE 4.- Pruebas en estado endurecido - 107 -
5.1.4.1 Resistencia a la compresión - 107 -

5.1.4.2 Resistividad eléctrica del concreto - 108 -
5.1.4.2.1 Resistividad bruta y superficial - 108 -
5.1.4.3 Espectroscopía de Impedancia electroquímica (EIS) - 110 -
5.1.4.3.1 Exposición a cloruros - 110 -
5.1.4.3.2 Exposición a CO_2 - 114 -
5.1.4.4 Resistencia a la polarización (RP) - 117 -
5.1.4.4.1 Potencial de corrosión por exposición a cloruros - 117 -
5.1.4.4.2 Densidad de corriente de corrosión por exposición a cloruros - 119 -
5.1.4.4.3 Resistencia a la polarización por exposición a cloruros - 120 -
5.1.4.4.4 Potencial de corrosión por exposición a CO_2 - 121 -
5.1.4.4.5 Densidad de corriente de corrosión por exposición a CO_2 - 122 -
5.1.4.4.6 Resistencia a la polarización por exposición a CO_2 - 123 -
5.1.4.5 Contenido de cloruros - 124 -
5.1.4.6 Profundidad de carbonatación - 138 -
5.1.4.7 Capacidad antioxidante - 141 -
5.1.4.8 Reporte fotográfico de especímenes para pruebas electroquímicas. - 142 -

CAPÍTULO 6 - 148 -

6.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS - 148 -

CONCLUSIONES - 153 -

RECOMENDACIONES - 156 -

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS - 157 -

APÉNDICE I - 162 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Desglose por sector del PIB de México [4]. - 3 -
Tabla 2. Composición química típica de un cemento portland [15]. - 13 -
Tabla 3. Clasificación de las técnicas de protección contra la corrosión del acero de refuerzo en concreto. - 27 -
Tabla 4. Porcentaje de Trióxido de Aluminio de algunos materiales captadores de cloruros [26]. - 30 -
Tabla 5. Técnicas electroquímicas de protección contra corrosión del acero de refuerzo (Ventajas-Desventajas). - 38 -
Tabla 6. Técnicas no electroquímicas de protección contra corrosión del acero de refuerzo (Ventaja-Desventaja) - 39 -
Tabla 7. Clasificación de los métodos de ensayo para la determinación de la capacidad antioxidante [30]. - 42 -
Tabla 8. Criterios de corrosión para acero de refuerzo según ASTM C 867. - 45 -
Tabla 9. Criterio de relación entre icorr y el estado de corrosión del acero embebido en concreto [17] - 46 -
Tabla 10. Relación entre la resistividad superficial y la penetración del ion cloruro. - 50 -
Tabla 11. Relación entre la resistividad bruta y la probabilidad de corrosión. Adaptación de NMX C 514-19 - 50 -
Tabla 12. Composición química de la materia prima. - 89 -
Tabla 13. Capacidad antioxidante de los materiales y las pastas de cemento. - 99 -
Tabla 14. Propiedades de los materiales empleados en las mezclas de concreto. - 100 -
Tabla 15. Proporcionamiento de mezclas para 1 m^3 de concreto. - 101 -
Tabla 16. Tiempos de Fraguado de las mezclas de concreto. - 103 -
Tabla 17. Revenimiento de las mezclas de concreto. - 104 -
Tabla 18. Contenido de aire de las mezclas de concreto. - 106 -
Tabla 19. Parámetros obtenidos a través de la segunda Ley de Fick para las mezclas de concreto. - 130 -
Tabla 20. Reporte fotográfico de la evolución de la profundidad de carbonatación de las mezclas de concreto. - 139 -
Tabla 21. Capacidad antioxidante para las mezclas de concreto sujetas a un ambiente estándar a 56 días. - 141 -
Tabla 22. Reporte fotográfico de probetas sometidas a exposición de cloruros. - 143 -
Tabla 23. Reporte fotográfico de probetas sometidas a exposición de CO_2 - 145 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección transversal de concreto endurecido, confeccionado con grava redondeada de silicio (izquierda) y calcáreo triturado (derecha). La pasta de cemento y agua cubre completamente cada partícula de agregado y llena todos los espacios entre las partículas [15]. .....- 9 -

Figura 2. Modelo simplificado de la estructura de la pasta. Los puntos rellenos (negros) representan las partículas de gel; los espacios intersticiales son poros de gel; los espacios marcados con C son cavidades capilares (sin escala) [22]. .....- 12 -

Figura 3. Elementos que conforman la celda galvánica en concreto reforzado (elaboración propia). .....- 16 -

Figura 4. Volumen relativo de los productos de corrosión generados en el acero de refuerzo embebido en concreto [58]. .....- 18 -

Figura 5. Proceso de deterioro cíclico debido a la corrosión del acero de refuerzo en concreto. .....- 18 -

Figura 6. Diagrama de Pourbaix para hierro a 25 ºC [20]. .....- 20 -

Figura 7. Comportamiento del ion cloro en el concreto [21] .....- 22 -

Figura 8. Mecanismo de corrosión por picadura debido a ingreso de cloruros. .....- 23 -

Figura 9. Clasificación de los inhibidores de corrosión. .....- 32 -

Figura 10. Potencial de corrosión con un inhibidor de tipo anódico. (Ecorr: potencial de corrosión; icorr: velocidad de corrosión) [27] .....- 33 -

Figura 11. Potencial de corrosión con un inhibidor de tipo catódico. (Ecorr: potencial de corrosión; icorr: velocidad de corrosión) [27]. .....- 34 -

Figura 12. Potencial de corrosión con un inhibidor de tipo mixto. (Ecorr: potencial de corrosión; icorr: velocidad de corrosión [27]). .....- 35 -

Figura 13. Donación de electrones de la molécula antioxidante hacia el radical libre. .....- 41 -

Figura 14. Circuito equivalente simple de corrosión [14] . .....- 47 -

Figura 15. Diagrama convencional de Nyquist de EIS para acero embebido en concreto [17] . .....- 48 -

Figura 16. Isotermas de adsorción para la relación entre cloruros libres y cloruros fijados [59]. .....- 52 -

Figura 17. Prueba de fenolftaleína en un corte de concreto [60]. .....- 53 -

Figura 18. Agentes de deterioro en el concreto reforzado (elaboración propia). .....- 55 -

Figura 19. Modelo de Tutti para la estimación de la vida útil de las estructuras de concreto reforzado. .....- 55 -

Figura 20. Planeación experimental del proyecto de investigación. .....- 58 -

Figura 21. Fabricación de pastillas para análisis FRX. .....- 61 -

Figura 22. Prueba visual de solubilidad de la sábila y el nopal. (1.- sábila con agua, 2.- nopal con agua, 3.- sábila con keroseno y 4.- nopal con keroseno) .....- 64 -

Figura 23. Determinación de la densidad. 1.- Sábila, 2.- Nopal, 3.- CPC 40. .....- 64 -

Figura 24. Procedimiento de Tea-Bag para determinar la absorción de la sábila y el nopal. 1.- Inmersión de la sábila, 2.- Inmersión del nopal, 3.- Condición de SSS para la sábila y el nopal. .....- 65 -

Figura 25. Procedimiento de obtención de polvos de pasta de cemento con adición de 3% de sábila y 3% de nopal para posterior análisis de capacidad antioxidante. .....- 66 -

Figura 26. Diseño experimental del proyecto de investigación. .....- 67 -

Figura 27. Configuración de especímenes para resistencia a la compresión y resistividad. .....- 68 -

Figura 28. Configuración de especímenes para la determinación de la capacidad antioxidante. .....- 68 -

Figura 29. Configuración de especímenes para pruebas electroquímicas (EIS y RP). .....- 69 -

Figura 30. Configuración de especímenes para determinar contenido de cloruros. a) Especificaciones de la probeta, b) Dimensiones de los especímenes para contenido de cloruros. ..... - 70 -
Figura 31. Configuración de especímenes para determinación del umbral de cloruros. a) Especificaciones de la probeta, b) Dimensiones del espécimen. ..... - 71 -
Figura 32. Configuración de especímenes para pruebas electroquímicas expuestos a CO_2. a) Especificaciones de la probeta. b) Dimensiones del espécimen. ..... - 71 -
Figura 33. Configuración de especímenes para determinar profundidad de carbonatación. ..... - 72 -
Figura 34. Molde para especímenes de acuerdo con ASTM G 109. ..... - 72 -
Figura 35. Proceso de habilitación de la conexión de la varilla de acuerdo con la noma ASTM G 109. ..... - 73 -
Figura 36. Procedimiento de decapado y recubrimiento con resina epóxica del acero de refuerzo para pruebas electroquímicas. 1.- VR previo a decapado, 2.- VR en solución acida de acuerdo con ASTM G 1, 3.- VR decapadas, 4.- Recubrimiento de VR con resina epóxica, 5.- VR protegidas con cinta de aislar en área de trabajo y cubiertas con resina epóxica. 6.- Vista frontal de VR habilitadas para pruebas electroquímicas expuestas a cloruros. 7.- Vista aérea de VR habilitadas para pruebas electroquímicas expuestas a cloruros. ..... - 74 -
Figura 37. Especímenes de concreto, expuestos a 4% de CO2 en una cámara de carbonatación acelerada al 60% HR. 1.- Probetas para determinar EIS y RP, 2.- Probetas para determinar profundidad de carbonatación. ..... - 75 -
Figura 38. Especímenes bajo exposición de cloruros 3.5% NaCl. 1.- Probetas para determinar EIS y RP, 2.- Probetas para determinar perfil de cloruros, 3.- Probetas para determinar el umbral de cloruros. ..... - 76 -
Figura 39. Toma de lecturas para determinar el tiempo de fraguado en morteros de concreto. ..... - 77 -
Figura 40. Medición de revenimiento de las mezclas de concreto. ..... - 77 -
Figura 41. Ensaye de cilindros a compresión ASTM C 39. ..... - 79 -
Figura 42. Medición de resistividad bruta en cilindros estándar. ..... - 79 -
Figura 43. Medición de resistividad superficial en cilindros estándar. ..... - 80 -
Figura 44. Espécimen para pruebas de EIS y RP, monitoreado durante el período de 28 días de curado, previo a exposición de cloruros. ER: Electrodo de referencia, CE: Contra electrodo, ET: Electrodo de Trabajo ..... - 81 -
Figura 45. Espécimen para pruebas de EIS y RP monitoreado durante exposición a CO_2. ER: Electrodo de referencia (ECS), ET: Electrodo de trabajo (VR #3), CE: Contra electrodo (malla de acero inoxidable). ..... - 82 -
Figura 46. Procedimiento de obtención de polvos para análisis de cloruros totales y libres. 1.- Espécimen original para obtención de cloruros, 75 mm x 75 mm x 300 mm; 2.- Sección de 75 mm x 75 mm x 50 mm por edad; 3.- Corte a 4 profundidades (10 mm, 20mm, 25 mm y 35 mm) para obtención de rodajas; 4.- Molienda y trituración para la obtención de polvo homogéneo para análisis. ..... - 84 -
Figura 47. Procedimiento para titulación de cloruros libres. 1.- Preparación de muestras con agua destilada; 2.- Hervir por 5 minutos las muestras y dejar reposar 24 h; 3.- Hervir solución filtrada con ácido nítrico y peróxido y dejar reposar, 4.- Titulación con potenciómetro. ..... - 85 -
Figura 48. Procedimiento para determinar el umbral de cloruros. 1.- Rompimiento de probetas cilíndricas; 2.- Recolección de polvos en la interfaz acero-concreto; 3.- Elaboración de pastillas de FRX para determinación de contenido total de cloruros. ..... - 86 -
Figura 49. Seguimiento de la profundidad de carbonatación en cortes frescos de concreto. ..... - 87 -
Figura 50. Procedimiento de obtención de polvos para análisis de capacidad antioxidante DPPH y ABTS. 1.- Probeta de Control, probeta sometida a cloruros y probeta sometida a carbonatación; 2.- Corte de sección 75 mm x 75 mm x 50 mm, con extracción de 20 g de polvo a 35 mm de profundidad; 3.- Molienda y homogenizado de polvos para análisis de capacidad antioxidante. ..... - 88 -

Figura 51. Difractogramas de la materia prima. a) CPC 40; b) Nopal deshidratado; c) Sábila deshidratada.....- 91 -
Figura 52. Análisis termogravimétrico de la materia prima. .....- 92 -
Figura 53. Morfología de la materia prima. a) CPC 40; b) Nopal deshidratado; c) Sábila deshidratada. .....- 93 -
Figura 54. Espectros de Infrarrojo para la materia prima. a) CPC 40; b) Nopal deshidratado; c) Sábila deshidratada; d) Aditivo inhibidor de la corrosión EUCON CIA.....- 97 -
Figura 55. Determinación del tiempo de fraguado inicial y final de la mezcla de referencia (MR) del proyecto de investigación.....- 104 -
Figura 56. Evolución de la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto. .....- 108 -
Figura 57. Evolución de la resistividad bruta de las mezclas de concreto.....- 109 -
Figura 58. Evolución de la resistividad superficial de las mezclas de concreto. .....- 109 -
Figura 59. Circuito equivalente empleado para evaluar la respuesta electroquímica.....- 111 -
Figura 60. Diagramas de Nyquist para las mezclas de concreto expuestas a cloruros. .....- 112 -
Figura 61. Diagrama de Nyquist comparando comportamiento de las mezclas de concreto expuestas a cloruros a 196 días.....- 113 -
Figura 62. Diagramas de Nyquist para las mezclas de concreto expuestas a carbonatación.....- 115 -
Figura 63. Diagrama de Nyquist comparando comportamiento de las mezclas de concreto expuestas a carbonatación durante 196 días.....- 116 -
Figura 64. Evolución de potencial de media celda (Ecorr) durante proceso de curado y corrosión por cloruros. ..- 117 -
Figura 65. Evolución de la velocidad de corrosión (icorr) de las mezclas de concreto durante el curado y exposición a cloruros.....- 119 -
Figura 66. Evolución de la resistencia a la polarización de las mezclas de concreto durante el periodo de curado y de exposición a cloruros.....- 120 -
Figura 67. Evolución del potencial de media celda (Ecorr) para las probetas sometidas al 4% de CO_2.....- 121 -
Figura 68. Evolución de la velocidad de corrosión (icorr) medida durante el periodo de curado estándar y exposición a dióxido de carbono. .....- 122 -
Figura 69. Evolución de la resistencia a la polarización de las mezclas de concreto durante el periodo de curado y sometidas a dióxido de carbono al 4%. .....- 123 -
Figura 71. Evolución de la velocidad de corrosión (icorr) medida para las probetas de umbral de cloruros.....- 125 -
Figura 70. Evolución del potencial de media celda (Ecorr) para las probetas de umbral de cloruros.....- 125 -
Figura 72. Perfiles de cloruro de las mezclas de concreto, 1er ciclo (56 días), 2do ciclo (90 días), 3er ciclo (180 días). a) Perfil de cloruros de MR; b) Perfil de cloruros de MR+CIA; c) Perfil de cloruros para MR+N1%; d) Perfil de cloruros para MR+N2%; e) Perfil de cloruros para MR+N3%; f) Perfil de cloruros para MR+S1%; g) Perfil de cloruros para MR+S2%; h) Perfil de cloruros para MR+S3%.....- 128 -
Figura 73. Comportamiento del coeficiente de difusión a lo largo del tiempo de exposición a cloruros.....- 131 -
Figura 74. Tiempo de iniciación de la corrosión a diferentes edades de exposición a cloruros. .....- 132 -
Figura 75. Contenido crítico de cloruros de las mezclas de concreto.....- 133 -
Figura 76. Determinación de los isotermas de fijación para la mezcla de referencia.....- 135 -
Figura 77. Fijación de cloruros de la mezcla de referencia a 56 días de edad.....- 136 -
Figura 78. Coeficiente de fijación "K" de las mezclas de concreto expuestas a cloruros. .....- 136 -
Figura 79. Cantidad de cloruros límite de fijación de las mezclas de concreto a diferentes edades de exposición.- 137 -
Figura 80. Evolución de la profundidad de carbonatación de las mezclas de concreto.....- 138 -

GLOSARIO

Abreviatura	Definición
SEM	Scanning electron microscope
CO_2	Dióxido de carbono
NaCl	Cloruro de sodio
HCl	Cloruro de hidrógeno
FHWA	Federal Highway Administration
CSE	Electrodo saturado de calomel

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más empleado alrededor del mundo. Desde la antigüedad en las construcciones romanas del sigo I d.C., como el Coliseo Romano, el panteón de Agripa ubicados en Roma, Italia y el Acueducto Pont Du Gard en Nimes Francia.

Sin embargo, debido a la constante evolución, el hombre ha requerido satisfacer nuevas necesidades. Debido a esto se han creado nuevos materiales con la finalidad de mejorar sus propiedades y comportamientos; un claro ejemplo es el concreto reforzado con acero.

En cuestión de resistencia estructural la unión de estos dos materiales (acero y concreto) es extraordinaria, ya que el concreto presenta excelente resistencia ante los esfuerzos de compresión que se generan en las estructuras; y debido a que su principal debilidad son los esfuerzos a tensión, la unión con el acero lo convierte en el material perfecto para trabajar en conjunto por su gran ductilidad.

No obstante, una de las principales desventajas del concreto reforzado es el deterioro de las estructuras donde la corrosión del acero de refuerzo (ya sea por cloruros o carbonatación y las reacciones álcali-agregado, que suelen presentarse por las condiciones ambientales, afectan la durabilidad de las construcciones.

La corrosión del acero de refuerzo es un problema que presentan todas las estructuras en mayor o menor grado, afectando su vida de servicio.

Ante esta problemática surgen técnicas de protección del acero de refuerzo ante la corrosión. Dentro de las más empleadas por su disponibilidad, facilidad de aplicación y menor costo (en comparación a otras técnicas), se encuentran los aditivos inhibidores de la corrosión. Dentro de la clasificación que existe de inhibidores de corrosión cabe

destacar que los aditivos químicos base nitrito de calcio son frecuentemente los más utilizados en la industria. Sin embargo, pese a su gran combate contra la corrosión del acero presentan disminución en el revenimiento y aceleración de los tiempos de fraguado del concreto (ACI-212.3R, 2016).

Por tal motivo surge la necesidad dentro del campo de la ingeniería civil con enfoque en los materiales de construcción brindar alternativas que no conlleven tales efectos negativos en las propiedades del material, tratando de utilizar recursos viables en cuestión de producción y accesibilidad.

En este sentido se optó por realizar una investigación con materiales naturales endémicos del territorio mexicano (sábila y nopal) mismos que de acuerdo con la literatura científica han demostrado un buen comportamiento de inhibición de la corrosión del acero de refuerzo [1], [2]; sin embargo, se desea conocer el "¿Por qué?" tienen esa capacidad de inhibición.

En el presente proyecto de investigación se pretende evaluar el comportamiento de inhibición de la corrosión del acero de refuerzo en base a la capacidad antioxidante que poseen de manera intrínseca los materiales naturales como el nopal y la sábila.

1.2 CONTEXTO DEL PROBLEMA

México es un país que se encuentra en vías de desarrollo y con abundantes zonas de urbanización e industrialización, teniendo por consiguiente altas concentraciones de CO_2, lo cual propicia la carbonatación del concreto, reduciendo su pH alcalino y favoreciendo la corrosión del acero de las estructuras de concreto reforzado.

Con una longitud de 11,122 km y 17 entidades colindantes a zonas marítimas, la geografía de México [3] hace que la corrosión de las estructuras sea un tema importante de estudio, debido a la susceptibilidad al daño ocasionado por los cloruros presentes en la brisa marina y en el agua de mar.

Desde el año 1950, diversos países han considerado las consecuencias económicas de la corrosión. Estudios realizados en esos tiempos indican que el costo de la corrosión hacia la sociedad es significativo [4].

Se estima que el costo global de corrosión es de $2,505.00 billones de dólares, lo que equivale al 3.4% del PIB (Producto Interno Bruto) mundial. Al usar las prácticas disponibles para el control de la corrosión, se estima que se ahorraría entre el 15 y 35% de los costos que esta provoca [4]. A continuación, en la Tabla 1 se presenta el desglose del PIB de México ya que es el de interés para el proyecto. El estudio fue realizado en el 2013.

Tabla 1. *Desglose por sector del PIB de México [4].*

País	PIB (USD billones)	Agricultura		Industria		Servicios	
México	$ 1,327.00	3.6%	$ 47.77	36.6%	$ 485. 68	59.8%	$ 793.55

Debido a los costos económicos que genera la corrosión es importante atender los efectos que tiene sobre las estructuras de concreto reforzado, para esto existen diversos procedimientos de aplicación para contrarrestar esta problemática.

En este trabajo de investigación se abordarán los aditivos inhibidores de corrosión como método de protección, debido a que su empleo es menos costoso en comparación con otras técnicas como la realcalinización electroquímica, extracción electroquímica de cloruros o recubrimientos epóxicos. Dichas técnicas son aplicadas generalmente bajo condiciones específicas cuando se espera una corrosión severa o cuando se requiere una acción inmediata. Mientras que los aditivos inhibidores se emplean como una acción preventiva [5].

Los aditivos inhibidores de la corrosión se utilizan en el diseño de estructuras marinas, estacionamientos y puentes, donde las sales de cloruro pueden estar presentes. La principal función de los aditivos inhibidores de la corrosión es detener químicamente la reacción de corrosión que se esté generando.

De manera comercial, la mayoría de los aditivos inhibidores de corrosión tienen base química de nitrito de calcio, nitrito de sodio, dimetiletanolamina, aminas, fosfatos y esteraminas [5]. Sin embargo, algunos tienen efectos secundarios como la aceleración del fraguado, disminución del revenimiento del concreto y disminución de la resistencia en un rango de 5 a 20% (Ficha técnica de MasterLife CI 222, Master Builders Solutions, 2020).

Según fuentes consultadas el nitrito de calcio provoca disminución del revenimiento, acelera el tiempo de fraguado y el desarrollo de resistencia temprana, así como una disminución de la resistencia a edades tardías (ACI-212.3R-16).

Los inhibidores base nitrito de calcio, aminas y monofluorfosfatos tienen impactos negativos en el medio ambiente además de ser tóxicos en el proceso de síntesis del compuesto o durante su aplicación, lo que puede causar daño temporal o permanente en órganos del cuerpo humano como pulmones o hígado [6].

Se han propuesto investigaciones con inhibidores verdes, es decir naturales, que cuenten con capacidad de inhibición de la corrosión del acero de refuerzo sin presentar impactos negativos en el sector medio ambiental como en la salud del ser humano [7].

1.3 ANTECEDENTES

Es necesaria la búsqueda de alternativas que cumplan con la función de prevenir o contrarrestar la acción de deterioro de las estructuras de concreto reforzado. Enfocando la problemática en la corrosión del acero por ataque de ambientes ricos en cloruros y CO_2 se realizó una búsqueda bibliográfica sobre inhibidores verdes que han sido empleados o investigados en años pasados; encontrando principalmente que el Nopal *(Opuntia Ficus Indica)* y la Sábila *(Aloe Vera)* son estudiados como posibles inhibidores de corrosión.

1.3.1 Aspectos relacionados con el empleo de Nopal

En el 2010, Antonio et al. [1] emplearon porcentajes de adición de nopal deshidratado en 0.10%, 0.25%, 0.5% y 1.0% con relación al peso del cemento. Encontrando que se obtuvieron mejorías en cuanto a las propiedades físicas, en particular la resistividad eléctrica, en adiciones menores al 1%, no mostró diferencias con respecto al concreto sin adiciones. La resistencia a la compresión a los 30 días mostró que hay una leve mejoría del 4% en concreto con 1% de adición con respecto al control sin nopal. El potencial de media celda mostró que, si hay una mejoría en el tiempo de iniciación de la corrosión en concretos con 1% de adición de nopal, estos tiempos mejoraron hasta 80 días. Con estos resultados recomiendan el empleo de este producto como adición del cemento, pero en concentraciones por arriba del 2%.

En el 2019, Díaz Blanco et al. [8] utilizaron mucílago de nopal en relaciones 1:1, 1:2 y 1:3 (nopal:agua). Las muestras con concentraciones 1:3 lograron los valores más altos de resistencia a la compresión teniendo en cuenta que este aditivo actúa como un retardante del fraguado del concreto. Con la medición del potencial a circuito abierto, se apreció que el aditivo puede retrasar la corrosión del acero de refuerzo en concreto.

Afirmaron que el mucílago de nopal dentro de la matriz de concreto mantiene las condiciones ideales para que el acero adquiera un estado de pasivación. El mucílago puede mantener una velocidad de corrosión entre insignificante y baja hasta el final del periodo de prueba (270 días) en una solución de cloruro de sodio al 3%.

En el 2020, Torres-Acosta y Alejandra Díaz [9] emplearon concretos con derivados del nopal: nopal exudado, nopal cocido y nopal deshidratado en polvo, en diferentes porcentajes cada uno, y se evaluaron desde el punto de vista de durabilidad. Dentro de los ensayes que se realizaron se encuentran la resistividad eléctrica, el porcentaje total de vacíos, absorción por capilaridad, resistencia a la compresión, la permeabilidad rápida de cloruros y análisis por micrografía SEM, evaluados a 30, 90, 180 y 400 días. Las adiciones de nopal deshidratado en polvo no mejoraron sustancialmente la durabilidad del concreto, excepto en el transporte de cloruros, adiciones menores al 2% redujeron los valores de la permeabilidad rápida de cloruros en un 10%. Mencionan que los derivados del nopal pueden actuar como una esponja obstructora (semejante a un biopolímero) con los poros de la matriz de concreto en donde detienen el transporte de agua y cloruros.

En el 2021, Torres-Acosta y González-Calderón [10] estudiaron el comportamiento de morteros expuestos a un ambiente de CO_2 con adiciones de mucílago de nopal en 0%, 15%, 4%, 8%, 42% y 95% con sustitución a la masa de agua. Fueron expuestos por 14 años (5110 días). Se realizaron mediciones de resistencia a la polarización lineal en ciclos de humedecimiento y secado, para determinar los posibles efectos de inhibición de la corrosión de estas adiciones. Los resultados electroquímicos mostraron eficiencias inhibidoras de corrosión para el acero en el mortero carbonatado en adiciones de mucílago del 40% al 70%, para concentraciones bajas de (1.5 y 4%), una eficiencia del 70% al 90% para concentraciones medias de mucílago (8%, 42% y 95%). Sugieren que el mucílago de nopal es útil como inhibidor de corrosión ya que las tasas de corrosión y agrietamiento, (iniciación y propagación) disminuyeron.

1.3.2 Aspectos relacionados con el empleo de Sábila

En el 2015, Faustino y Moratto [11] realizaron una evaluación del extracto de sábila adicionada a mezclas de concreto en 0%, 15% y 30% con respecto a la relación agua-cemento. Observaron una disminución considerable de la resistencia del concreto, a mayor concentración del extracto de sábila se obtienen menores resistencias. En el potencial eléctrico, con la concentración del 30%, se observa un estado pasivo de corrosión. La resistividad eléctrica indica que el acero presentó poco riesgo de corrosión, y en el 30% de adición la velocidad de corrosión disminuyó. El extracto de sábila como aditivo natural al concreto garantiza la disminución de la velocidad de corrosión del acero estructural embebido. Sin embargo, no se recomienda su empleo debido a que genera pérdidas de resistencia en más del 50% para el caso más crítico. Recomiendan realizar ensayos en concentraciones menores a las empleadas.

En el 2015, Herrera et al. [12] estudiaron electroquímicamente un gel de aloe vera como posible inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo estructural del concreto. Utilizaron la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica y se evaluó la resistencia a la corrosión. Los diagramas mostraron que la adición en diferentes proporciones (2 a 16 ml) a una base de 5 ml de HCl 1M, inhibe notablemente el proceso de corrosión del acero inmerso en la solución ácida, y se determinó que las moléculas del gel presentan un mecanismo de fisisorción sobre la superficie del metal de acuerdo con el modelo del isoterma de Langmuir. El gel fue clasificado como un inhibidor orgánico del tipo mixto.

En el 2021, Alberto [13] empleo el gel de aloe vera para mejorar las propiedades fisicomecánicas del concreto con resistencia de 245 kgf/cm^2. Utilizó porcentajes de 1%, 1.5%, 2%, 2.5% y 3% con respecto al volumen de agua. Encontró que el aloe vera reduce el asentamiento para todas las dosificaciones, el de adición 2% mejora la resistencia a la compresión y a la tracción.

En el 2014, Bodian et al. [14] estudiaron el comportamiento de extractos del aloe vera en 10%, 20%, 30% y 40% como inhibidor de la corrosión para acero de refuerzo en

un ambiente expuesto al 5% de NaCl. Usando métodos electroquímicos, líneas Tafel, intensidad cero de crono-potenciometría y espectroscopía de impedancia electroquímica. Los resultados mostraron que los extractos de aloe vera tienen una eficacia del 86% encontrando como concentración optima 20%.

De acuerdo con las investigaciones consultadas se identifica la necesidad de brindar una caracterización química más exhaustiva de los materiales naturales que se emplean dado que en la mayoría no se reporta; así como aportar a la comunidad científica bases para poder definir si las adiciones de nopal y sábila en polvo deshidratados son recomendables para su uso como posibles inhibidores de corrosión del acero de refuerzo.

En este proyecto se evaluó el comportamiento electroquímico y las propiedades mecánicas de las adiciones de nopal y sábila deshidratadas en polvo dosificadas en 1%, 2% y 3% cada una con respecto al peso del cemento. Comparadas con una mezcla de concreto de referencia sin adiciones y la adición de un aditivo inhibidor de la corrosión comercial (EUCON CIA) sometidos a ambientes con concentraciones de 3.5% de NaCl y 4% de concentración de CO_2.

CAPÍTULO 2

2.1 MARCO TÉORICO

2.1.1 Tecnología del concreto

2.1.1.1 Naturaleza del concreto

El concreto se considera una mezcla de dos componentes principalmente: pasta y agregados. En donde la pasta está compuesta por un material cementante conocido como cemento portland y agua, mientras que los agregados suelen ser arena y grava, dando como resultado una masa parecida a una roca [15].

La calidad de este material considerado como el más importante en la industria de la construcción depende sumamente de la calidad de los agregados y la pasta, así como la unión adecuada de ambos. Un concreto elaborado de manera satisfactoria deberá de tener todas las partículas de los agregados cubiertas por pasta, así como los espaciamientos entre cada agregado deberán estar rellenos. En la Figura 1 se muestra cómo debería de visualizarse un concreto confeccionado de manera adecuada.

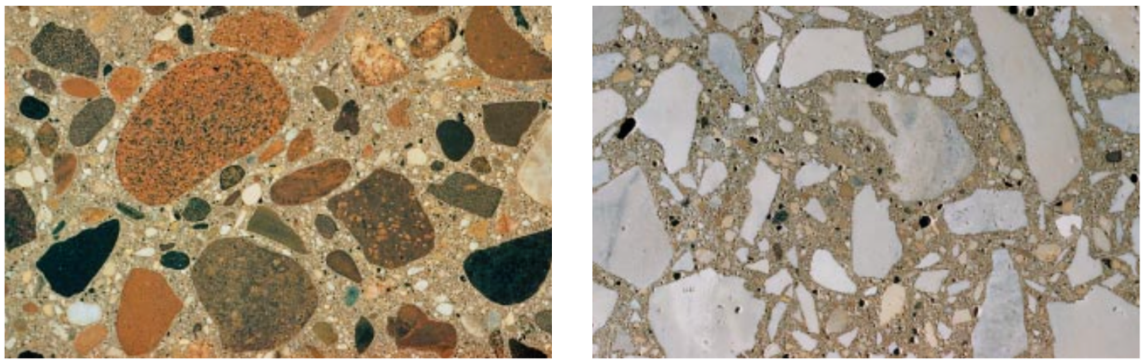


Figura 1. *Sección transversal de concreto endurecido, confeccionado con grava redondeada de silicio (izquierda) y calcáreo triturado (derecha). La pasta de cemento y agua cubre completamente cada partícula de agregado y llena todos los espacios entre las partículas [15].*

La selección y empleo de los agregados es muy importante debido a que constituyen entre el 60 al 75% del volumen total del concreto, mientras que la pasta ocupa entre el 40 y 25% [15]. Algunas de las consideraciones que se deben tener al momento de realizar una mezcla de concreto son que los agregados no contengan materiales que puedan causar algún deterioro del concreto. La normativa ASTM C 33 restringe las

cantidades de sustancias dañinas a pequeños porcentajes, dentro de las más comunes se encuentran: 1) los terrones de arcilla y partículas friables (no sanas), que incrementan la demanda de agua y afectan la resistencia al desgaste y durabilidad; 2) material más fino que la malla No. 200 (75μm) ya que incrementa la demanda de agua de mezclado y afecta la adherencia de la pasta de cemento al agregado; 3) el carbón y lignito pueden causar manchas dañinas en la superficie, causando burbujas e interferir con la capacidad de los aditivos inclusores de aire; y 4) la presencia de materiales orgánicos, ya que una pequeña cantidad de estos materiales puede causar retraso o evitar el endurecimiento, así como disminuir drásticamente la resistencia a compresión del concreto.

De la misma forma el agua que funge como medio para propiciar la cohesión de los agregados y reacción de los cementantes, debe de cumplir con criterios de calidad dictados por la ASTM C 94 o NMX C 122. Por lo general se deberá conocer la presencia de impurezas dañinas como álcalis, ácidos, materia vegetal degradada, cantidades de sedimentos y porcentaje de cloruros y minerales.

Por otro lado, el avance en la tecnología del concreto ha permitido comprender el comportamiento y propiedades de este material, qué por sí solo, si se elabora de acuerdo con las normativas mencionadas y con la calidad de los materiales adecuados, presenta como la mayoría de los agregados pétreos un excelente comportamiento ante esfuerzos de compresión, logrando así una alta resistencia. Sin embargo, no es un material dúctil, por lo cual no resiste de manera adecuada los esfuerzos de tensión, éstos generalmente se consideran como el 10% del f’c [16].

Ante esta desventaja surge el concreto reforzado que es una combinación de concreto con acero, en la que el acero proporciona la resistencia a la tensión de la que carece el concreto. Aproximadamente las varillas de acero tienen una resistencia a la tensión 100 veces mayor a la del concreto [16]. Cabe destacar que no todo es perfecto, el acero por su composición está expuesto a la corrosión, pero el concreto le provee una capa protectora, siempre y cuando no ingresen agentes degradantes hasta el refuerzo.

2.1.1.2 Porosidad del concreto

Según la física un poro es el "espacio que existe entre las moléculas de un cuerpo", también puede definirse como el "intersticio que hay entre las partículas de los sólidos de estructura discontinua".

Durante el proceso de mezclado de los materiales para la fabricación del concreto, existe un porcentaje de aire con rango de 4 a 8% que queda atrapado en la masa. Debido a que el material cementante comienza a reaccionar con el agua dando paso a las reacciones de hidratación, comienza el fraguado de la mezcla qué con el transcurso del tiempo comenzará a perder su capacidad plástica hasta llegar a un estado endurecido. Durante ese lapso (plástico – rígido), por acción de la gravedad, las partículas más densas se sedimentarán mientras que las más livianas buscarán flotar, por lo que el aire tratará de buscar la superficie, sin embargo, no en todos los casos se logra extraer o escapar dejando así huecos denominados como poros.

Por consiguiente, la pasta de cemento que se forma contiene una red de poros que puede ser interconectada o abierta. La estructura porosa del concreto dependerá de la compactación del material, de la relación agua/cementante, del contenido de cemento y del grado de hidratación [17].

De acuerdo con la Unión Internación de Química Pura y Aplicada (IUPAC) los poros se clasifican en:

- ***Microporos***, conocidos como "*poros de gel*" con tamaño de diámetro nominal $\varnothing < 2$ nm, ocupan alrededor de 28% del volumen total del gel C-S-H. Dicho porcentaje no afecta considerablemente la durabilidad del concreto debido a que el diámetro es demasiado pequeño para permitir el transporte de agente agresivos.

- ***Mesoporos,*** conocidos como "*poros capilares*" con tamaño de diámetro nominal entre 50 nm a 1μm, donde estos poros representan la parte del

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, y forman un sistema interconectado con distribución aleatoria a través de la pasta de cemento. Estos poros son la principal causa de permeabilidad de la pasta de cemento endurecida.

- ***Macroporos***, conocidos como "*huecos*" con tamaño de diámetro nominal $\varnothing > 10$ μm, la formación de estos macroporos proviene de las burbujas de aire que quedan atrapadas durante el proceso de mezclado, y debido a una mala compactación no logran escapar y se quedan embebidos en la masa.

En la Figura 2 se observa una estructura de la pasta de cemento con la presencia de poros de manera simplificada.

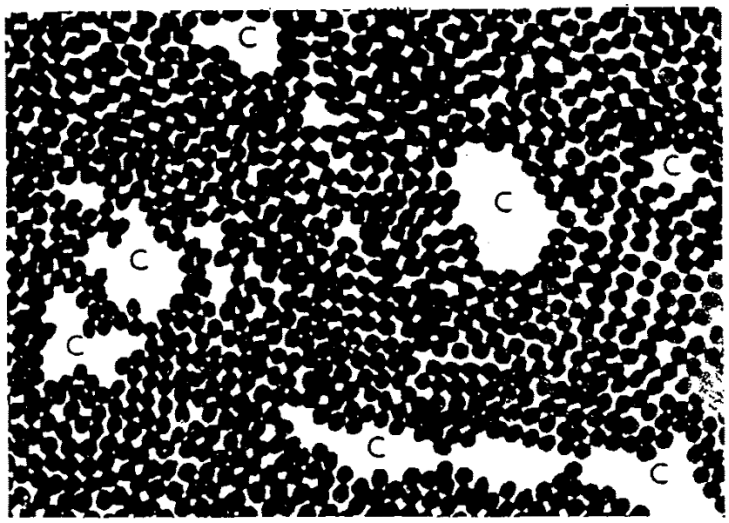


Figura 2. *Modelo simplificado de la estructura de la pasta. Los puntos rellenos (negros) representan las partículas de gel; los espacios intersticiales son poros de gel; los espacios marcados con C son cavidades capilares (sin escala) [22].*

Con lo anteriormente demostrado, debido a la naturaleza porosa del concreto es inevitable la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto. Por la interconexión de la red de poros, especies degradantes como los iones de Cl^- y CO_2 pueden penetrar en la superficie del concreto y avanzar de manera gradual haciendo a su paso la solución de poros más corrosiva para el acero de refuerzo, hasta llegar al punto de iniciación de la corrosión.

2.1.1.3 Alcalinidad del concreto

El clinker del cemento portland es fabricado mediante la calcinación y sinterización de una mezcla de materias primas, dentro de las principales se tienen CaO, SiO_2 y Al_2O_3, otros materiales como el óxido de hierro (FeO) son adicionados para reducir la temperatura de clinkerización, asi como la presencia de yeso que suele agregarse para controlar el tiempo fraguado de la mezcla. Véase la Tabla 2 para la composición química típica de un cemento portland.

***Tabla 2**. Composición química típica de un cemento portland [15].*

Compuesto	%	Fase	Composición	%
CaO	67	Alita (C_3S)	$3CaO \cdot SiO_2$	50-70
SiO_2	22	Belita (C_2S)	$2CaO \cdot SiO_2$	15-30
Al_2O_3	5	Aluminato Tricálcico (C_3A)	$3CaO \cdot Al_2O_3$	5-10
Fe_2O_3	3	Ferrita (C_4AF)	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	5-15

La hidratación del cemento es el proceso mediante el cual el cemento en presencia de agua reacciona químicamente entre los minerales del clinker, y el sulfato de calcio para desarrollar propiedades aglutinantes y transformarse en un agente de enlace para los agregados.

De manera simultánea ocurren reacciones de hidratación entre los compuestos del cemento; el mecanismo de reacción se puede analizar mediante las curvas de evolución de calor de hidratación. Los productos de las reacciones son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfoaluminatos de calcio hidratados. Descritos a continuación.

La alita es el silicato de calcio más inestable, al reaccionar con el agua se convierte en silicato de calcio hidratado, conocido como (gel de tobermorita) y en hidróxido de calcio.

$$3CaO \cdot SiO_2 + 3H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (1)$$

El silicato dicálcico (belita) al hidratarse también se convierte en gel de tobermorita y en hidróxido de calcio, pero a diferencia de la ecuación (1) se produce en menor cantidad.

$$2CaO \cdot SiO_2 + 2H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2 \qquad (2)$$

La celita (aluminato tricálcico), al combinarse con yeso y agua produce etringita.

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O \ + 15H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O \qquad (3)$$

El aluminato de calcio con la etringita al mezclarse con agua se convierte en monosulfato, de la misma manera combinado con el hidróxido de calcio y agua se convierte en aluminato de calcio hidratado.

Cada uno de los productos de hidratación generados tiene una función dentro del sistema. El gel de C-S-H (tobermorita) suele ocupar entre el 60 y 50% del volumen de la pasta de cemento, no tiene una forma estequiométrica definida, se puede visualizar como un material con muchas imperfecciones e irregularidades cristalinas. Es el responsable de la adherencia de los agregados con la pasta, así como otorgar propiedades de resistencia y durabilidad. La etringita y los monosulfatos, ocupan una fracción del volumen entre 0.15 a 0.20%, teniendo una morfología en forma de agujas hexagonales, son importantes debido a que controlan los tiempos de fraguado de los aluminatos de calcio altamente reactivos. Y por último el producto de hidratación responsable de la alcalinidad del concreto es el hidróxido de calcio conocido como portlandita, la cual comúnmente ocupa entre el 20 y 25% del volumen de la pasta de cemento, presentando una forma definida, tendiendo a formar cristales alargados con morfología de prisma hexagonal. La portlandita no aporta beneficios mecánicos, sin embargo, mantiene el ambiente alcalino con un pH entre 12.5 a 13, manteniendo protegido el acero de refuerzo contra la corrosión electroquímica [18].

2.1.2 Corrosión del acero de refuerzo

El acero es una aleación proveniente del mineral de hierro (Fe) con pequeñas cantidades de carbón, generalmente < 1%. Dicha aleación se funde a temperaturas superiores a 1500 ºC; almacenando así una gran cantidad de energía, por lo que tenderá a regresar a su estado más estable, la oxidación. La energía se libera en productos de corrosión ocupando un volumen mayor que el del acero original.

Por consiguiente, se puede definir a la corrosión como una reacción termodinámica inevitable de los metales, la cual es adversa al proceso de producción metalúrgico de metales a partir del mineral sin procesar. Según la ASTM G 15-04 la corrosión es la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente que produce un deterioro del material y sus propiedades.

De acuerdo con el medioambiente en el que se encuentre el metal, se pueden presentar dos tipos de corrosión: química y electroquímica. En donde la corrosión química (seca) es aquella que ocurre por reacción directa con el entorno, por ejemplo, ataque de gases y vapores a temperaturas que impiden su condensación sobre la superficie del metal, así como por líquidos no conductores de la corriente eléctrica y no implica la transferencia de electrones. Por otro, lado la corrosión electroquímica (húmeda) es una reacción química que frecuentemente se da en un medio acuoso en donde los átomos del metal pierden electrones y se convierten en iones.

El ambiente en el que se encuentra el acero de refuerzo en el concreto es de alta alcalinidad, proporcionado por la portlandita; la barrera de recubrimiento que proporciona el concreto contra agentes agresivos del medio ambiente de manera natural presenta porosidad. Por consiguiente, el concreto actúa como un medio especial para que las reacciones de corrosión del acero de refuerzo ocurran.

Para el acero que se emplea como refuerzo en las estructuras de concreto, la corrosión que se desarrolla es de tipo electroquímico porque cumple con el medio acuoso. Dando pie a la formación de una celda galvánica, mostrada en la figura 3.

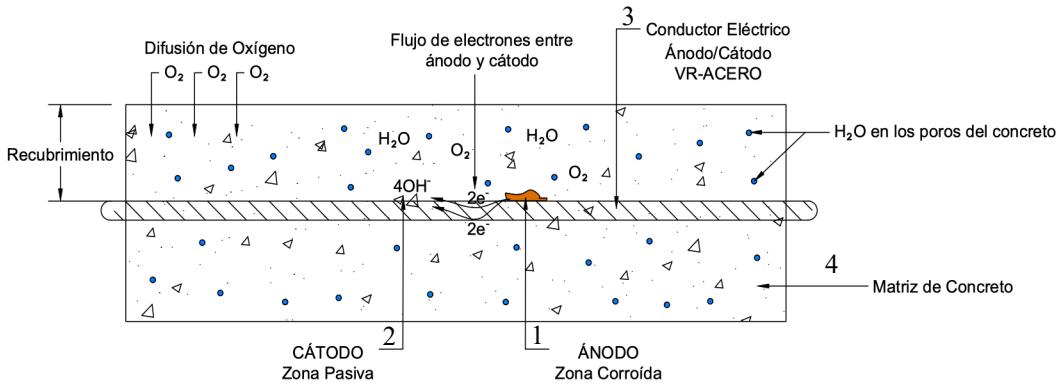


***Figura 3**. Elementos que conforman la celda galvánica en concreto reforzado (elaboración propia).*

Para que la reacción electroquímica (reducción-oxidación) del acero se genere, se requiere básicamente la presencia de: oxígeno, agua y hierro, que con la combinación de estos 3 agentes se generarán productos de corrosión. Por lo tanto, se puede decir que la corrosión del acero de refuerzo consiste en básicamente 4 procesos ilustrados previamente en la celda galvánica:

1. **Proceso Anódico:** es donde ocurre la oxidación del hierro y se liberan electrones en la fase metálica dando lugar a la formación de iones de hierro.

2. **Proceso Catódico:** ocurre la reducción del oxígeno, consume los electrones liberados produciendo alcalinidad. En el proceso se puede involucrar la absorción del oxígeno o agua para formar hidróxidos.

3. **Elemento Conductor:** permite el transporte de electrones dentro del metal desde las regiones anódicas hasta las regiones catódicas. Se considera a la varilla de acero como conductor.

4. **Electrolito:** conduce la corriente eléctrica desde las regiones anódicas a las catódicas mediante un flujo de iones contenidos en la solución de poros del concreto. La matriz de concreto funge como electrolito.

Debido a la porosidad del concreto el O_2 puede ingresar al concreto disolviéndose en la solución de poros hasta llegar a la superficie del acero. Una vez en la superficie, en el área catódica el oxígeno se reduce a iones de hidróxido [17]. Generando la siguiente reacción catódica:

$$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^- \quad (4)$$

En algunos casos especiales, por ejemplo, cuando se tiene un potencial muy negativo o una densidad de corriente catódica muy alta, la reacción catódica se puede presentar en forma de hidrógeno [17]:

$$2H_2O + 2e \rightarrow H_2 + 2OH^- \quad (5)$$

Dado que el metal es un ánodo sufre una reacción de oxidación mediante la cual los átomos se ionizan, éstos entran a la solución electrolítica, mientras que los electrones salen del ánodo a través del conductor. [17] Los iones del metal se disuelven en el área anódica dando lugar a la siguiente reacción:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \quad (6)$$

El caso más crítico es que la corrosión del acero se desarrolle a una velocidad alta, y que los productos de corrosión generados por la reacción anódica no se puedan mover a otro sitio y se acumulen en la superficie del acero como una capa de óxido. El Fe^{2+} disuelto podría oxidarse y transformarse en óxido férrico hidratado ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) conocido como herrumbre el cual se deposita con otros óxidos ferrosos o hidróxidos en la interfaz acero-concreto. El volumen que generan los productos de corrosión es de 2 a 6 veces mayor que el propio volumen del hierro [17], en la figura 4 se puede observar esquemáticamente el volumen de los productos de corrosión.

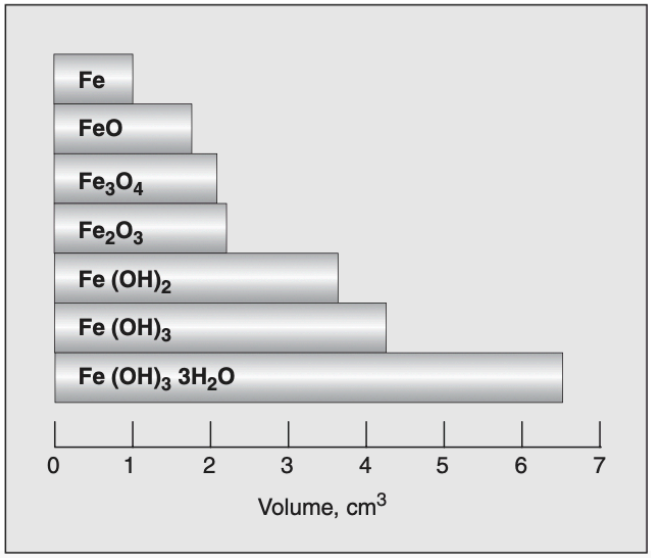


Figura 4. *Volumen relativo de los productos de corrosión generados en el acero de refuerzo embebido en concreto [58].*

Como los volúmenes de los productos generados son mayores al volumen inicial que tiene el acero, significa que se generarán esfuerzos de tensión queriendo lograr una expansión en la interfaz del concreto y el acero. Dichos esfuerzos comienzan a fisurar el concreto con microgrietas hasta que llegan a la superficie y en casos exagerados de corrosión severa se dan desprendimientos de concreto. Con este planteamiento podemos decir que se tiene un proceso de deterioro cíclico como se observa en la figura 5.

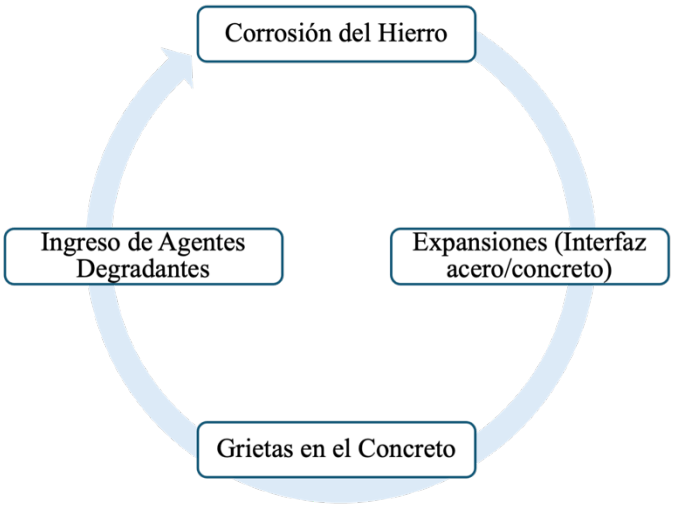


Figura 5. *Proceso de deterioro cíclico debido a la corrosión del acero de refuerzo en concreto.*

El proceso se cumple, hasta llegar un punto en donde el acero de refuerzo queda expuesto a la superficie y si no se toman medidas de reparación seguirá corroyéndose hasta llegar a la desintegración del elemento.

2.1.2.1 Capa pasiva del acero de refuerzo

La ASTM G 15 define la pasividad como el estado de la superficie metálica caracterizado por bajas velocidad de corrosión, en una región de potencial fuertemente oxidante para el metal.

Se conoce como "capa pasiva" a la presencia de una película adherente, invisible, densa y estable sobre la superficie del acero, con un espesor entre 2-3 nm, que aísla al acero [19]. Sin embargo, existen sustancias que se encuentran de manera natural en al medio ambiente que pueden destruir esa capa pasiva.

Cuando sucede la reacción anódica se genera un producto de corrosión Fe^{2+} el cual se puede trasformar a Fe^{3+} bajo condiciones de oxidación, pudiendo acumularse en la superficie o disolviéndose en la solución de poro. Normalmente la solución de poro tiene un alto valor de pH y es rica en O_2, permitiendo así que el Fe^{2+} permanezca en $Fe(OH)_2$ o Fe(OH) debido a la hidrólisis, formando una capa pasiva en la superficie del acero [17]. Si la capa pasiva se mantiene intacta y no existe algún agente que la destruya se podría decir que el acero se encuentra protegido dentro del concreto.

Sin embargo, en las etapas iniciales después de la fabricación del concreto, cuando se encuentra en la etapa de curado, la capa pasiva del acero no se forma de manera rápida si el concreto está sumergido en agua. Otras condiciones que intervienen en la formación de dicha capa protectora, suelen ser la penetración de agentes como dióxido de carbono (CO_2) y iones de cloro (Cl^-). Donde los primeros ocasionan la disminución de la alcalinidad de la matriz a valores de $pH < 9$, y los iones de Cl^- al llegar al umbral rompen la capa formada.

Para poder predecir el estado que tiene el metal se emplea el diagrama de Pourbaix, el cual establece que para que suceda la corrosión se necesita una energía que impulse a los electrones y fluyan entre el ánodo y el cátodo. A la energía impulsora se le conoce como diferencia de potencial entre las zonas anódicas y catódicas.

En el diagrama de equilibrio desarrollado por Pourbaix, la diferencia de potencial comparada con el pH de un elemento permite analizar las relaciones de corrosión y poder localizar la zona en la que se encuentra el material [20] En la figura 6 se localizan 3 regiones:

- **La zona de pasividad:** aplica cuando el metal posee películas de óxidos o hidróxidos sobre la superficie que inhiben la corrosión.

- **La zona de corrosión:** en donde el metal se disuelve activamente, siendo los productos de corrosión solubles.

- **La zona de inmunidad:** el metal se encuentra preservado y estable.

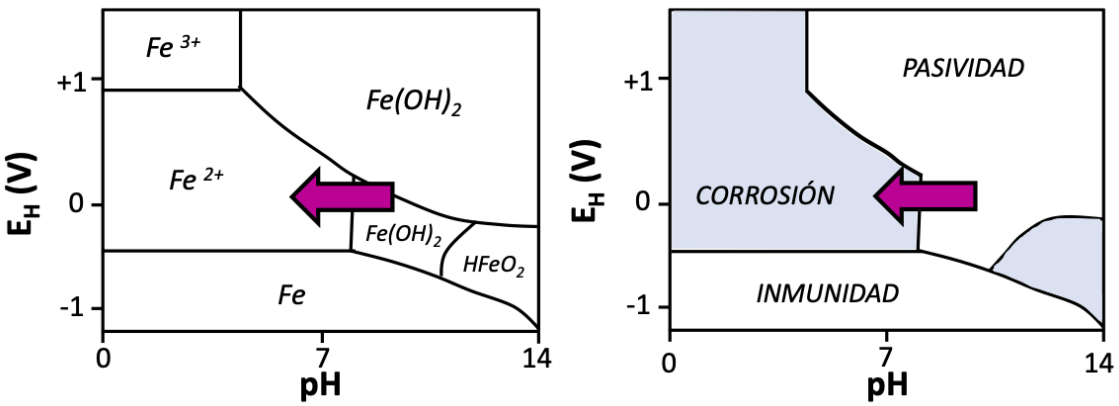


Figura 6. *Diagrama de Pourbaix para hierro a 25 ºC [20].*

2.1.2.2 Mecanismos de corrosión

De acuerdo con lo planteado con anterioridad se puede concluir que la corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto ocurre por la destrucción de la capa pasiva que se forma naturalmente sobre el acero embebido en el concreto. Donde la destrucción de esta capa se debe principalmente a dos mecanismos:

- La presencia de una cantidad suficiente de cloruros u otros iones des-pasivantes en contacto con el acero de refuerzo.

- La disminución de la alcalinidad del concreto cuando éste reacciona con sustancias ácidas del medio ambiente.

Los iones des-pasivantes provocan una corrosión de tipo localizado (picaduras) mientras que la reducción de la alcalinidad del concreto permite la disolución completa de la capa pasivante, generando una corrosión generalizada.

2.1.2.2.1 Corrosión del acero de refuerzo por ataque de cloruros

El panorama más agresivo y común que desencadena la corrosión localizada en el acero de refuerzo del concreto es la presencia del ion de cloro. Existen otros iones des-pasivantes como los sulfuros y sulfatos, sin embargo, son menos frecuentes y peligrosos que los cloruros [21].

El ingreso de cloruros pude ocurrir de distintas formas: del exterior de la superficie a través de la red de poros del concreto, por la adición durante la fabricación en aditivos o por el uso de materiales contaminados. Generalmente los aditivos acelerantes del fraguado o reductores de agua contienen cloruros en su composición química [21].

En las regiones tropicales de México la principal fuente de contaminación de cloruros es la sal proveniente del aerosol marino en las costas.

Los cloruros pueden penetrar por succión capilar en el concreto seco a través de la red de poros. En aquellas estructuras de concreto reforzado que se encuentren sumergidas el ingreso de los cloruros es por medio de difusión, debido al gradiente de concentración de la solución de poros que se genera [21]. Es posible modelar este fenómeno mediante la segunda ley de difusión de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial^2 x} \tag{7}$$

En la ecuación 7 la concentración de la solución de poro esta dado por “c”, se considera el tiempo de difusión como “t”, la distancia de difusión es “x” y “D” es el coeficiente de difusión.

El transporte de los cloruros en el concreto es un proceso complejo que implica distintos procesos como la difusión, la succión capilar, permeabilidad, e ingreso por la red de poros. Una vez que estos han llegado a la barra de refuerzo en cantidades suficientes (conocido como el umbral de cloruros) pueden destruir la pasividad natural del refuerzo provocando su corrosión.

Los iones de cloruro pueden estar presentes en el concreto de tres formas distintas:

1. Enlazados químicamente.
2. Adsorbidos físicamente.
3. Disueltos en la solución de poros (libres).

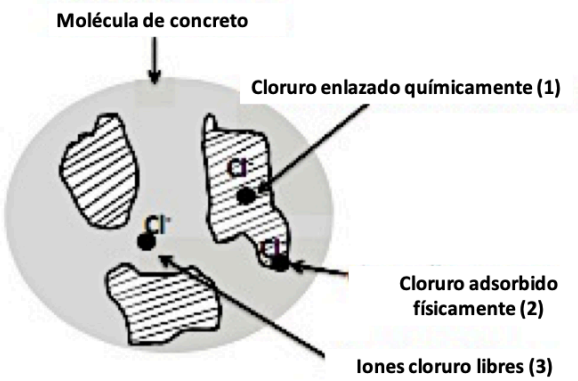


Figura 7. *Comportamiento del ion cloro en el concreto [21] .*

Los cloruros libres son los que representan más daño para el acero de refuerzo, debido a que están disponibles para reaccionar; sin embargo, es posible que los cloruros adsorbidos se incorporen a la disolución debido a los equilibrios que se generan en la matriz de concreto, tornándose peligrosos.

El mecanismo de ataque de cloruros propuesto en diversas teorías es el de "formación de compuesto" en donde se plantea que los cloruros libres forman un compuesto soluble con los iones de hierro:

$$2Fe + 6Cl^- \rightarrow 2FeCl_3^- + 4e^- \quad (8)$$

Donde estos se difunden hacia otra zona alejada del ánodo, donde el pH y la concentración de oxígeno disuelto son altos. En consecuencia, el compuesto se disocia precipitando el hidróxido de hierro liberando los iones de cloruro:

$$FeCl_3^- + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 3Cl^- \quad (9)$$

Debido a que los cloruros no se agotan en este proceso y la corrosión no se detiene por la alta concentración de hierro, el proceso puede continuar por sí mismo emigrando los iones de hierro desde el acero y reaccionando con el oxígeno para formar óxidos o hidróxidos. Por lo tanto, en lugar de que la corrosión se propague a lo largo de la barra de refuerzo, continúa en las zonas anódicas, desarrollando picaduras profundas en el acero [21]. Véase la figura 8.

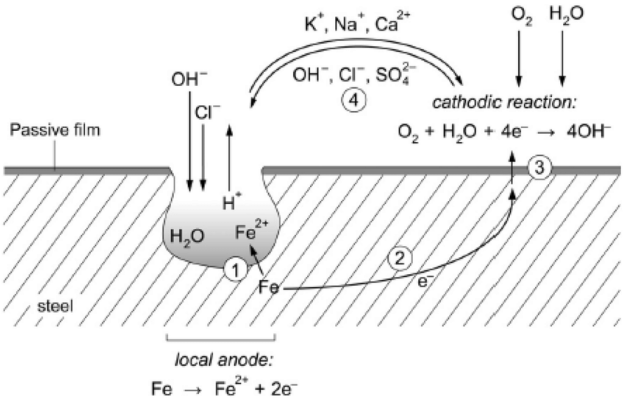


***Figura 8**. Mecanismo de corrosión por picadura debido a ingreso de cloruros.*

Para que los iones de cloro tengan la capacidad de romper la capa pasivante del acero de refuerzo se requiere que se encuentren en una concentración llamada “nivel iniciador de la corrosión / umbral de cloruros”. Este valor depende de diversos factores, entre los más destacables están:

- La relación agua/cemento (a/c)
- El tipo de cemento
- Condiciones de curado, edad, exposición ambiental
- Rugosidad y limpieza de la barra de refuerzo

Normalmente el límite de cloruros se expresa en porcentaje por peso de cemento (%Cl^- ppc), en porcentaje por peso de concreto (%Cl^- pp concreto) o en kg de Cl^- por m^3 de concreto. Varios investigadores opinan que el umbral de cloruros está en función de la cantidad de hidroxilos que se encuentren en la solución de poro y que el cociente [Cl^-] / [OH^-] es el factor más importante para determinar si el acero de refuerzo se encuentra en estado pasivo [21].

2.1.2.2.2 Corrosión del acero de refuerzo por exposición de CO_2

Al estudiar el comportamiento del concreto generalmente se hace la suposición de que el medio ambiente es aire, el cual no reacciona con la pasta de cemento hidratada. Sin embargo, la realidad es que el aire contiene CO_2 el cual en presencia de humedad reacciona con el cemento hidratado, generando así ácido carbónico, pues el CO_2 en estado gaseoso no es reactivo [22].

La concentración típica de CO_2 en la atmósfera es de 0.03% [21]. Existen estructuras con altos niveles de exposición a este gas, como lo son los revestimientos interiores de los túneles vehiculares. Donde la acumulación de la combustión de los automóviles se hace presente.

Al proceso por el cual el dióxido de carbono penetra por la red de poros del concreto y reacciona con los hidróxidos de calcio para formar carbonatos se le conoce como carbonatación.

La carbonatación del concreto endurecido en la mayoría de las ocasiones no genera algún daño a la matriz de concreto. Sin embargo, dicho proceso reduce considerablemente la alcalinidad del concreto y sí se tiene acero de refuerzo conlleva al rompimiento de la capa pasiva, dando inicio a un proceso de corrosión.

El mecanismo de carbonatación se da de la siguiente manera: el aire que está en contacto con la superficie del concreto penetra por los poros capilares y el CO_2 que contiene reacciona rápidamente con los hidróxidos en la solución de poro:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (10)$$

El aire que penetra por los poros ya no contiene dióxido de carbono, creándose de esta manera una diferencia de concentración de CO_2 entre el aire del exterior y el del interior. Esta diferencia produce la difusión de más dióxido de carbono atmosférico hacia el interior de los poros [21].

Los productos precipitados durante la reacción de carbonatación disminuyen la permeabilidad del concreto y reducen los valores del pH normalmente situados entre 12.6 – 13.5 hasta un valor de 9 [22]. La caída abrupta del pH en la solución del poro crea un "frente de carbonatación" separándolo en dos zonas: la primera zona es hacia la superficie del concreto con pH menor a 9 y la segunda zona hacia el interior del concreto directo a la interfaz acero refuerzo con pH arriba de 12.

Cuando el frente de carbonatación llega al acero de refuerzo la capa pasiva se vuelve inestable debido a la disminución del pH, rompiendo así la protección que le confiere de manera natural al acero y dando inicio al proceso de corrosión.

El tipo de corrosión que se da en los elementos sometidos a una exposición de carbonatación es generalizada y homogénea sobre toda el área de acero. Se puede idealizar como si el acero se encontrara expuesto al medio amiente sin ningún tipo de protección.

Sin embargo, el acero se encuentra embebido en el concreto, el cual contiene humedad lo que a largo plazo produce la reducción de la sección transversal de manera significativa. Debido al proceso de corrosión del acero, se forma en la superficie una capa de óxidos y productos de corrosión que inducen esfuerzos de tensión en el concreto logrando así agrietamientos en el recubrimiento.

La carbonatación ocurre progresivamente desde el exterior al interior por medio de difusión a través del sistema de poros. El proceso de difusividad es lento si los poros están saturados de agua, debido a que la difusión de CO_2 en el agua es cuatro órdenes de magnitud más lenta que en el aire [22].

La rapidez de la carbonatación depende del contenido de humedad en el concreto, el cual varía con la distancia desde la superficie. A causa de esta variable no es posible determinar con facilidad el frente de carbonatación con la ecuación de difusión. A una concentración de humedad entre 50 y 70% ocurre la carbonatación más rápida [22]. Por consiguiente, en condiciones higrométricas constantes, la profundidad de carbonatación aumenta en proporción a la raíz cuadrada del tiempo, lo cual es característico de la absorción más que de la difusión, pero la carbonatación comprende la acción reciproca entre el dióxido de carbono y el sistema de poros. La fórmula matemática que modela el fenómeno de carbonatación está dada por la ecuación 11.

$$x\ (mm) = k\sqrt{t} \tag{11}$$

Donde “x” representa la profundidad de carbonatación, “k” es el coeficiente de carbonatación en mm/año, dicho valor depende de variables como el tipo de cemento, la relación a/c, características del ambiente etc, y “t” es el tiempo de exposición en años. La ecuación 11 no es aplicable cuando las condiciones de exposición no son estacionarias.

2.1.2.3 Técnicas para protección de la corrosión

Antes o después de detectar el daño por corrosión en una estructura de concreto reforzado es necesario emprender acciones de reparación o prevención para alargar la vida residual del elemento.

Los métodos de protección de la corrosión están basados en eliminar cualquiera de los 4 elementos que conforman la celda galvánica mostrada en la figura 3. Existe una inmensidad de clasificaciones para los métodos de protección de la corrosión, pueden clasificarse según su aplicación ya sea sobre el revestimiento del acero o adicionados a la mezcla, de acuerdo con la facilidad y economía de aplicación o se pueden clasificar en técnicas electroquímicas y no electroquímicas. El presente trabajo se enfocará en la última clasificación, específicamente en los inhibidores de corrosión, mostrada en la tabla 3.

***Tabla 3**. Clasificación de las técnicas de protección contra la corrosión del acero de refuerzo en concreto.*

Técnicas Electroquímicas	Técnicas No-Electroquímicas
Protección Catódica	Materiales captadores de cloruros
Re-alcalinización	Recubrimientos y Morteros de reparación
Extracción de iones cloruro	Inhibidores de Corrosión

Cuando un concreto se diseña de acuerdo con los códigos correspondientes del ACI 211 y ACI 318 considerando los aspectos de resistencia y durabilidad que requiere la estructura, es poco probable que el concreto falle o no cumpla con su objetivo inicial. Sin embargo, en la práctica parece muy complicado lograr cumplir con los requisitos que se indican en las normativas y por consiguiente cada vez es más recurrente dar le mantenimiento a las estructuras en periodos cortos entre 20-25 años de servicio. Cuando se supone que una estructura con un buen diseño puede estar en servicio aproximadamente 50 años.

Ante esta problemática surgen métodos preventivos para contrarrestar las patologías de las estructuras, los cuales de acuerdo con la técnica pueden ser empleados antes o después de la fabricación del concreto.

De acuerdo con la clasificación de las técnicas electroquímicas son métodos más complejos de emplear, no tan convencionales a comparación de las técnicas no electroquímicas. Las primeras requieren de un conocimiento técnico para poder realizar la reparación o solucionar la problemática, equipo más especializado y por tanto el aspecto económico incrementa sustancialmente en comparativa con los otros métodos. A continuación, se tratará de manera general las características de cada técnica.

2.1.2.3.1 Técnicas electroquímicas

- **Protección catódica**

Esta técnica se emplea desde el siglo antepasado (XIX), cuando el Sr. Humpherey Davy desarrolló una forma de proteger los cascos de cobre de los barcos, empleando ánodos de hierro. Sin embargo, fue hasta 1970 cuando este método se comenzó a emplear en estructuras de concreto reforzado, ya que se considera el único capaz de detener el proceso de corrosión, aún en concentraciones elevadas de cloruros y con deterioros muy avanzados en los elementos; la FHWA declaro que actualmente en Estados Unidos de América el método de protección catódica es el más utilizado tanto en reparaciones como en estructuras nuevas [23].

Este sistema de protección permite que la estructura adquiera el comportamiento de cátodo, consiguiendo con esto la completa protección del acero de refuerzo embebido en el concreto. Dicho comportamiento opera al producir un flujo de corriente directa de una fuente externa hacia la estructura metálica que se requiere proteger (cátodo). Para que el sistema funcione adecuadamente la corriente debe descargarse del ánodo al electrolito, el ánodo se corroe al descargarse la corriente.

Esta protección puede implementarse por dos vías: por medio de ánodos de sacrificio, o por un sistema de corriente impresa. Donde los primeros implican la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como ánodo. Comúnmente se ha empleado el magnesio, aluminio, zinc y aleaciones como ánodos, ya que tienen un potencial muy negativo que protege la varilla, tienen poca

tendencia a la polarización y además presentan corrosión uniforme. Mientras que la protección catódica se logra aplicando una corriente externa a partir de un rectificador que suministra corriente continua de bajo voltaje. La terminal positiva de la fuente de corriente se conecta al ánodo auxiliar localizado a cierta distancia de la estructura a proteger y la terminal negativa se conecta a la estructura metálica que se desea proteger. Es indispensable la existencia del electrolito que completa el circuito [23].

- **Re-alcalinización electroquímica**

La técnica de re-alcalinización es relativamente reciente, en 1988 cuando Miller realizó la patente del proceso electroquímico para transportar una solución alcalina al interior de concreto. El nombre proviene de la acción por el cual el sistema poroso del concreto recobra la alcalinidad perdida durante el proceso de carbonatación [24].

El principio de aplicación está basado en la recuperación de la alcalinidad del concreto, debido principalmente a la generación de OH^- en la superficie del acero que actúa como cátodo. Donde se requiere el paso de una corriente directa a través del concreto, entre el acero de refuerzo y un ánodo colocado sobre la superficie del concreto. Esta técnica es empleada en concretos con alto grado de carbonatación.

La re-alcalinización del concreto se puede dar por diversos mecanismos; la electrólisis en los electrodos (alrededor del acero reforzado) se generan iones hidróxido por medio de la electrólisis del agua y reducción del oxígeno que se difunde en el concreto y la electroósmosis, donde se genera un movimiento del electrolito en el concreto hacia el cátodo [19].

- **Extracción de iones cloruro**

Las primeras pruebas con esta técnica fueron realizadas en Estados Unidos Americanos desde 1973. El método consiste en aplicar una corriente eléctrica continua entre la armadura que actúa como cátodo y un ánodo exterior que se coloca de forma temporal sobre la superficie del concreto. Los iones con carga negativa, como lo son los

de cloruro, migran en el campo formado por la corriente eléctrica desde el acero de refuerzo hasta la superficie, donde está situado el ánodo exterior [25].

2.1.2.3.2 Técnicas no electroquímicas

- **Materiales captadores de cloruros**

La capacidad de captación de cloruros del concreto varía de acuerdo con el tipo y contenido de material captador. Por lo tanto, el seleccionar un material con alta capacidad de captación de cloruros será benéfico para el concreto. El mecanismo de la captación química de los iones de cloro libres en la solución de poro, se le atribuye a la formación de cloro-aluminato de calcio, comúnmente conocido como sal de Friedel que resulta de la reacción química entre los iones de cloruro libres y el aluminato tricálcico.

$$C_3A + Ca(OH)_2 + 2Cl^- + 10\,H_2O \rightarrow\ C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10\,H_2O + 2OH^- \qquad (12)$$

El producto de la reacción química representada en la ecuación 12 es la Sal de Friedel que es más estable químicamente que la unión física, está relacionada con la disponibilidad de las fases de calcio y aluminato en el concreto. Debido al bajo contenido de C_3A el cemento portland resistente a los sulfatos (Tipo II) tiene menor capacidad de enlazar o captar los cloruros efectivamente.

Por su alto contenido de aluminatos representados en la tabla 4, la ceniza volante (CV), el metacaolín (MK) y la escoria granulada de alto horno (EGAH) son materiales cementantes suplementarios que pueden captar adecuadamente los iones de cloro, aún más que el cemento portland (CP) [26].

Tabla 4. *Porcentaje de Trióxido de Aluminio de algunos materiales captadores de cloruros [26].*

Material Captador	% de Al_2O_3
CP	3 – 8
EGAH	14 – 18
CV	10 – 30
MK	35 – 50

- **Recubrimientos y morteros de reparación**

Se han investigado muchas opciones para cubrir al acero de refuerzo con la finalidad de ralentizar el fenómeno de la corrosión, siendo los recubrimientos un método de empleo. Dentro de la clasificación de los recubrimientos se tienen: metálicos, inorgánicos y orgánicos (pinturas, barnices y resinas).

La finalidad del recubrimiento es aislar el cátodo y el ánodo, uno de los métodos metálicos más empleados es el acero galvanizado, que consiste en una capa continua que aísla el acero del electrolito, generalmente el zinc es utilizado como ánodo de sacrificio por ser más anódico y por lo tanto se corroe primero que el acero. Dentro de los recubrimientos orgánicos se encuentran las resinas epóxicas que tienen la capacidad de aislar la superficie metálica del ambiente, creando un ambiente incompatible con el mecanismo de corrosión.

Dentro de los recubrimientos orgánicos algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta es que las pinturas deberán ser resistente al agua, que posea una excelente impermeabilidad y adhesión. Las pinturas pueden ser aplicadas sobre la estructura de concreto o sobre la superficie de metal.

Los morteros y lechadas son una posibilidad de reparación de las áreas dañadas. El mortero de reparación es un material dosificado para presentar tixotropía en el estado plástico, posibilitando su aplicación de manera sencilla, y en el estado endurecido tener baja permeabilidad y alta resistencia. Cuya función principal será la de restaurar el ambiente alcalino y disminuir el acceso de agentes agresivos al concreto [21].

- **Inhibidores de corrosión**

Según la ISO 8044 1989, un inhibidor de corrosión es una sustancia química que disminuye la velocidad de corrosión cuando está presente en el sistema de corrosión en una concentración adecuada, sin cambiar significativamente la concentración de ningún otro agente de corrosión.

Dichos inhibidores de corrosión se disuelven en el electrolito; pueden ser adicionados con el agua de mezcla o colocarse sobre el concreto en estado endurecido. Tienen la capacidad de actuar en el proceso de corrosión en dos formas: retrasando la despasivación del acero de refuerzo es decir fortaleciendo la capa pasiva, o reduciendo la velocidad de corrosión después de la despasivación [27].

El uso de los inhibidores de corrosión se ha incrementado a lo largo de los años, debido a que proveen un nivel de protección aceptable, así como longevidad de acción difícil de obtener con otras técnicas [28].

La clasificación de los inhibidores de corrosión puede ser de diferentes maneras, a grandes rasgos puede ser de acuerdo con los métodos de aplicación, al mecanismo de protección, o el tipo de contenido, en la figura 9 se ilustra un panorama amplio de los inhibidores de corrosión para una mejor comprensión.

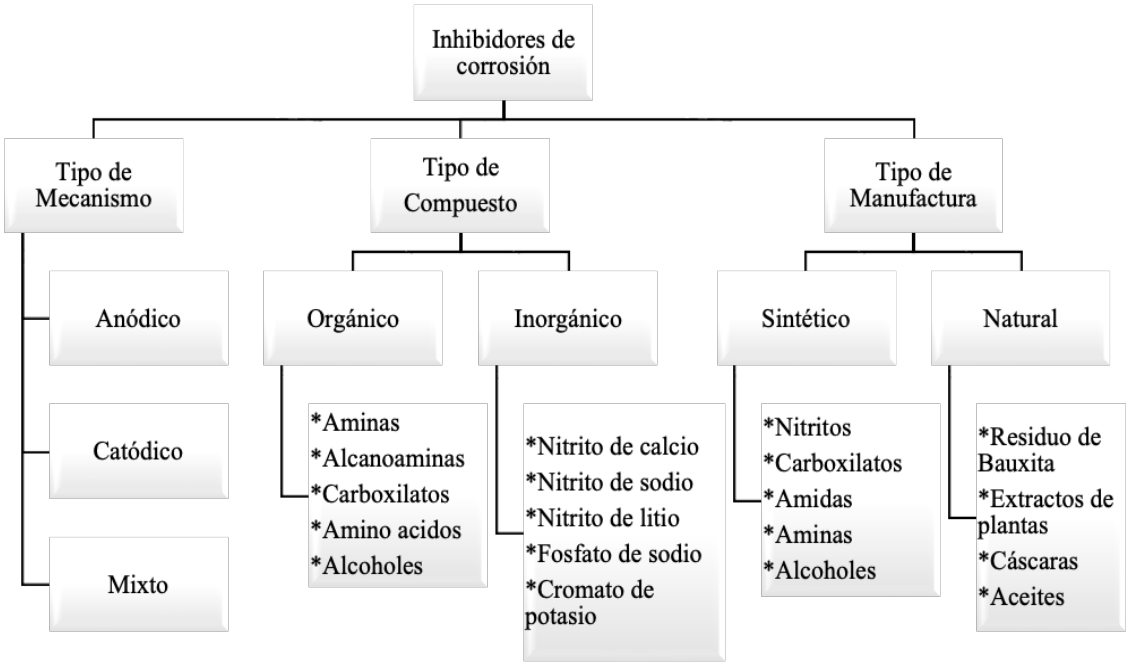


***Figura 9**. Clasificación de los inhibidores de corrosión.*

A continuación, se hará una descripción del tipo de mecanismo que presentan los inhibidores de corrosión.

- **Inhibidores de corrosión anódicos**

A este tipo de inhibidores también se les conoce como inhibidores pasivantes, que actúan como agentes oxidantes, aceptadores de electrones [27]. Dichos inhibidores trabajan en la disolución del acero promoviendo así la oxidación de los iones ferrosos en iones férricos. Los iones se precipitan formando una película densa en la superficie del acero de refuerzo reduciendo así el proceso de corrosión en la reacción anódica (véase ecuación 6) mediante un incremento del potencial de corrosión.

En la figura 10 se ilustra el potencial de corrosión con un efecto anódico de inhibición en donde las curvas anódicas y catódicas interceptan con una corriente de corrosión menor y un potencial de corrosión mayor.

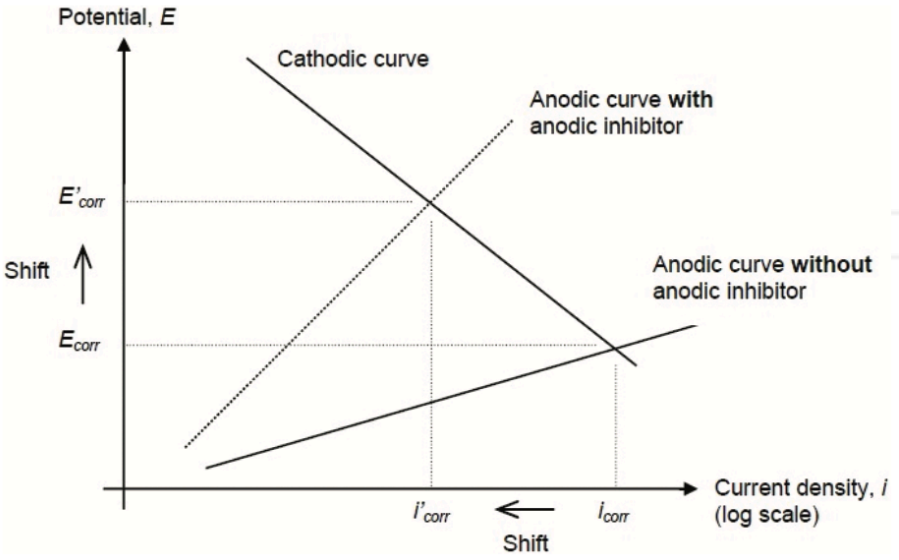


Figura 10. *Potencial de corrosión con un inhibidor de tipo anódico. (Ecorr: potencial de corrosión; icorr: velocidad de corrosión) [27] .*

Comúnmente el nitrito de calcio, nitrito de sodio, cromato de sodio, y benzoato de sodio son empleados como inhibidores anódicos [29].

- **Inhibidores de corrosión catódicos**

Este tipo de inhibidores actúan durante el proceso de corrosión en la región catódica y previenen dicha reacción en el acero de refuerzo. El objetivo de éstos es retardar la reacción de reducción del oxígeno (representada en la ecuación 4) ya que produce compuestos insolubles que se precipitan formando una barrera superficial en la interfaz del metal-concreto, la cual restringe la difusión de oxígeno y la conducción de electrones [27].

Al reducir la fuente de oxígeno, el proceso de corrosión se reduce y el potencial de corrosión se reduce a valores menos negativos con una corriente de corrosión menor, lo cual se puede observar en la figura 11. En el diagrama de Pourbaix (figura 6) se puede notar que entre menor sea el potencial, mayor será la probabilidad de que el acero se encuentre en una zona de inmunidad.

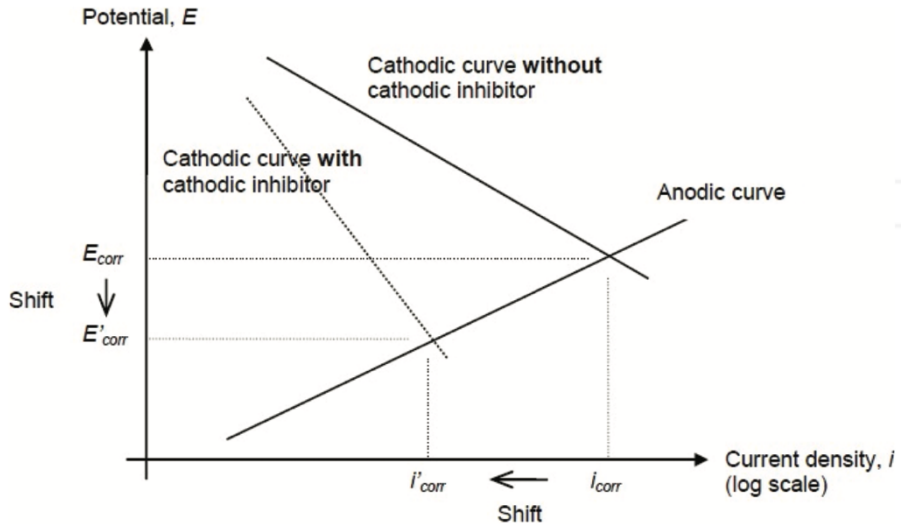


Figura 11. *Potencial de corrosión con un inhibidor de tipo catódico. (Ecorr: potencial de corrosión; icorr: velocidad de corrosión) [27].*

Dentro de los inhibidores catódicos más empleados se encuentran los carbonatos, fosfatos, silicatos, hidróxido de sodio polifosfatos [29].

- **Inhibidores de corrosión mixtos**

Este tipo de inhibidores actúan en ambas reacciones tanto anódicas como catódicas, generalmente actúan por adsorción sobre la superficie de acero formando una capa protectora. Estos aditivos no causan cambios significantes en los potenciales de corrosión anódicos o catódicos por lo que independientemente de la reacción que alteren, solo es efectivo en la reducción de la velocidad de corrosión (icorr) [27], véase figura 12.

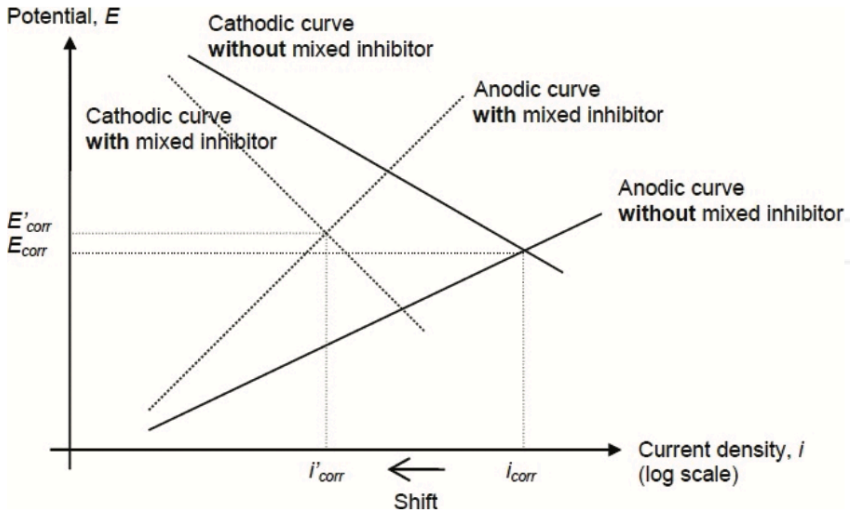


Figura 12. *Potencial de corrosión con un inhibidor de tipo mixto. (Ecorr: potencial de corrosión; icorr: velocidad de corrosión [27]).*

Materiales con grupos hidrofóbicos que tienen grupos polares como N, S, OH son efectivos, así como las aminas y alcanoaminas [29].

Una vez expuesto el mecanismo de acción se puede identificar el tipo de compuesto químico.

- **Inhibidores de corrosión inorgánicos**

Dentro de los compuestos inorgánicos, el nitrito de calcio es el más empleado y comercializado a gran escala. Sin embargo, se debe de tener precaución al momento de estimar la cantidad a emplear ya que si se utiliza menos de lo necesario tendrá impactos

negativos tanto en el acero como en el concreto [27]. Los nitritos son inhibidores de tipo anódico los cuales compiten con los iones de cloro por los iones de hierro en el ánodo. Por lo tanto, se consideran como efectivos inhibiendo la corrosión del acero a causa de la exposición a cloruros o CO_2.

A pesar de que se consideran eficientes al combatir la corrosión, tienen efectos en el concreto como la aceleración del fraguado y el incremento de la ganancia de resistencia. Sin olvidar que son tóxicos y cancerígenos [27], [6]. Con esta desventaja se han investigado alternativas de inhibidores.

- **Inhibidores de corrosión orgánicos**

Generalmente los compuestos orgánicos que se suelen emplear en este tipo de inhibidores son las aminas, alcanoaminas y otras sales que tienen la capacidad de donar o recibir electrones de la superficie del metal, formando así enlaces covalentes y funcionando, así como excelentes inhibidores de la corrosión.

Las aminas y alcanoaminas son ampliamente usadas debido a que tienen una gran solubilidad en agua y poca influencia en las propiedades del concreto en estado fresco o endurecido. Comúnmente se les conoce a estos inhibidores como volátiles o inhibidores migratorios por la capacidad que tienen de mezclarse. Estos compuestos orgánicos, específicamente las aminas tienen la habilidad de absorberse en la superficie del metal, previniendo así el contacto del acero de refuerzo con el ambiente corrosivo, formando una capa protectora al acero [27].

Otro grupo orgánico usado como inhibidor son los carboxilatos, que son capaces de donar protones caracterizados por la presencia del grupo carboxílico (teniendo carbón en sus enlaces con el oxígeno). Donde el anión carboxílico en el concreto se convierte rápidamente en la sal de calcio insoluble del ácido graso. Estas formaciones proveen una capa hidrofóbica en los poros [29] .

Finalmente, dentro de la clasificación de los inhibidores se encuentra el tipo de manufactura, es decir si su elaboración es sintética (en un laboratorio) o si de manera natural se encuentran en el medio ambiente y proveen esa capacidad.

- **Inhibidores de corrosión sintéticos**

Básicamente este tipo de inhibidores son de grupo activo inorgánico u orgánico con compuestos como los nitritos, aminas, carboxilatos, amidas y heterocíclicos. Son fabricados a partir de una síntesis química, es decir la combinación o adición de sustancias simples para la obtención de compuestos.

- **Inhibidores de corrosión naturales (verdes)**

Este tipo de inhibidores surgen a partir de la identificación de los daños que producen los inhibidores sintéticos orgánicos en la salud de los humanos y al medio ambiente [27]. Por consiguiente, se puede decir que los inhibidores verdes son amigables con el ambiente ya que están basados en productos naturales y extractos de plantas que cuentan con propiedades o compuestos que proveen una protección al acero de refuerzo.

Es importante mencionar que la capacidad de inhibición de estos materiales depende de muchos factores, dentro de los primordiales es el pH del ambiente corrosivo, los iones agresivos que se encuentren en el medio, y el estado molecular de los inhibidores. El reto es identificar cuáles compuestos activos en los materiales naturales son los responsables de la reducción de la actividad corrosiva en el acero de refuerzo [5]. Dentro de las investigaciones revisadas en el artículo de Zomorodian [5] se plantea que la eficiencia de inhibición se les atribuye a grupos funcionales como hidróxilos, carboxilos y carbonilos, que existen en los componentes fenólicos o basados en fenoles, así como en los taninos.

Abarcado de manera amplia el tema de las técnicas de protección contra la corrosión del acero de refuerzo, en las tablas 5 y 6 se sintetizó la información de cada técnica mostrando las ventajas-desventajas que poseen respectivamente.

***Tabla 5**. Técnicas electroquímicas de protección contra corrosión del acero de refuerzo (Ventajas-Desventajas).*

	Técnica		Ventajas	Desventajas
ELECTROQUÍMICAS	**Protección Catódica**	**Ánodos de Sacrificio**	*No requiere potencia externa. *Voltaje fijo. *Nula interferencia con estructuras enterradas. *Mantenimiento simple. *Duración permanente de aplicación.	*Amperaje limitado *Útil en medios de baja resistividad. *Solo se utiliza en resistividades de 5000 Ω-cm.
		Corriente Impresa	*Cubre áreas amplias. *Aplica en cualquier medio. *Resistividad eléctrica ilimitada. *Duración permanente de aplicación.	*Amperaje variable. *Voltaje de aplicación variable. *Mantenimiento difícil. *Alto costo de instalación *Posibles interferencias con la estructura.
	Re-alcalinización		*Recuperación del pH alcalino del concreto. *La efectividad de la técnica se evalúa mediante la correlación de otras técnicas. (indicador de fenolftaleína)	*Aplica para corrosión por medio de carbonatación. *Favorece la reacción álcali-agregado (migración de iones alcalinos Na^+, K^+). *Duración de días o semanas de aplicación. *Pérdida de adherencia entre acero y concreto.
	Extracción de Cloruros		*La remoción del ion cloro permite reestablecer la pseudopasivación del acero de refuerzo. *Amplio campo de aplicación en estructuras donde los niveles de concentración de cloruros no exceden a los críticos.	*El recubrimiento del concreto es una variable importante para la efectividad de la técnica. *La superficie no deberá tener defectos (grietas, poros, burbujas etc). *No todos los cloruros son extraídos completamente. *Duración de semanas o meses de aplicación.

***Tabla 6**. Técnicas no electroquímicas de protección contra corrosión del acero de refuerzo (Ventaja-Desventaja)*

	Técnica		Ventajas	Desventajas
NO ELECTROQUÍMICAS	**Materiales Captadores de Cloruros**		*Son materiales sub-productos de la industria. *Se incorporan en la mezcla en sustitución del cemento. (menores emisiones de CO_2).	*El porcentaje de captación es relativamente bajo. *No en todas las regiones del mundo se encuentran disponibles en cantidades abundantes.
	Recubrimientos o Morteros de Reparación		*Fácil aplicación en la superficie del material. *Crean un ambiente no compatible con el mecanismo de corrosión.	*Los álcalis son componentes del concreto y dañan el recubrimiento de pintura. *Las sales forman eflorescencias en la superficie del concreto y daña la durabilidad de la pintura. *El costo de los aceros galvanizados y las pinturas epóxicas son muy altos.
	Inhibidores de Corrosión	**Sintéticos**	*Comercialmente disponibles. *Fácil y amplio rango de aplicación. *Aceptación en el mercado. *Producción a nivel industrial. *Proporcionan alta protección de la corrosión.	*No son amigables con el medio ambiente. *Altos riesgos en la salud y seguridad, riesgo de dispersión de material toxico en el medio ambiente, en especial marino. *Se obtienen sub-productos no deseados en su síntesis. *Algunos son muy costos.
		Naturales	*Los extractos generalmente contienen múltiples grupos funcionales que aseguran una efectividad. *Sustentables, no tóxicos para el ambiente y el ser humano. *Localmente accesibles *Más económicos.	*La mayoría no se encuentran disponibles comercialmente. *Proceso de obtención difícil o tedioso. *Algunos solventes para la extracción son costosos. *Variación en la efectividad de mitigar la corrosión.

2.1.3 Materiales naturales empleados como inhibidores de la corrosión

Para que un material se considere como inhibidor efectivo de la corrosión, aunque sea dosificado en pequeñas cantidades, deberá tener una estabilidad longeva, así como una distribución homogénea sin lixiviarse del concreto y afectar las propiedades de este.

Al sustituir los inhibidores de corrosión sintéticos por los naturales, se pretende conducir al desarrollo inhibidores menos tóxicos, benignos para el medio ambiente, más económicos y rentables.

Los extractos de plantas, las hojas, tallos, aceites, frutos o cáscaras permiten satisfacer estos requisitos, debido a que en su composición natural cuentan con compuestos como alcaloides, flavonoides, polifenoles, entre otros, que son aptos para la donación de electrones del grupo hetero (S, N, O).

En el proceso de corrosión del acero de refuerzo existe la donación de electrones de la zona anódica y aceptación de ellos en la zona catódica, al emplear un inhibidor de la corrosión se pretende detener ese proceso ya que los compuestos orgánicos que contienen tienen la capacidad de aceptación o donación de electrones. Hay materiales naturales que contienen esa capacidad debido a la presencia de grupos funcionales. Generalmente ese comportamiento se le atribuye a la capacidad antioxidante de los materiales.

2.1.3.1 Capacidad antioxidante de un material natural

Un antioxidante es una molécula capaz de neutralizar / retardar la acción oxidante de los radiales libres mediante la liberación de electrones e intercepción del oxígeno libre, (actúan como donadores de electrones).

Para poder comprender el funcionamiento de los antioxidantes se tiene que definir lo que es un radical libre; conocidos por átomos o grupos de átomos que tienen un electrón libre en su último orbital, por lo que son muy reactivos ya que tienden a captar un electrón

de moléculas estables, con el fin de alcanzar su propia estabilidad electroquímica. Una vez que el radical libre ha conseguido sustraer el electrón que necesita, la molécula estable que se lo cedió se convierte a su vez en un radical libre, generando así una reacción en cadena. En la figura 13 se ilustra esquemáticamente este fenómeno.

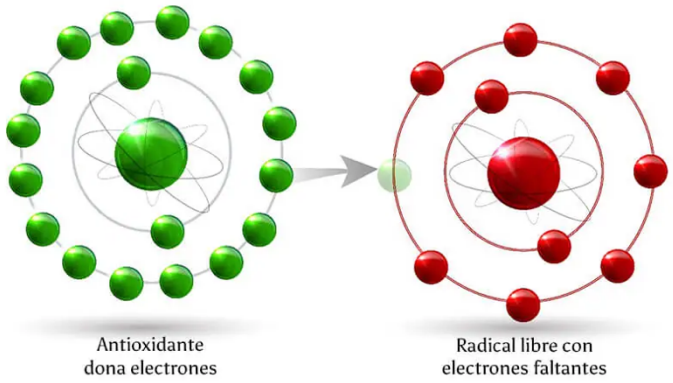


Figura 13. *Donación de electrones de la molécula antioxidante hacia el radical libre.*

Los antioxidantes son compuestos sintetizados por las plantas en sus diferentes partes, ya sea frutos, hojas, ramas, raíces etc; y se caracterizan por poseer grupos hidróxidos (OH) unidos entre sí por anillos bencénicos (C_6H_6). Dentro de los antioxidantes más comunes se encuentran los taninos, lignanos, quinonas, ácidos fenólicos, flavones, flavonoles, que cuentan con propiedades redox y pueden actuar como donadores de hidrógenos [30]. Suelen clasificarse en tres grandes grupos: polifenoles, carotenoides, vitaminas E y C.

Dentro de los materiales de interés para este proyecto se encuentran la sábila de la familia *Aloe Vera* que dentro de su composición fitoquímica contiene compuestos fenólicos que son una subdivisión de los polifenoles, los cuales son responsables de la actividad antioxidante [31], [32], [33]. Así mismo, el nopal proveniente de la familia *Opuntia Ficus-Indica* dentro de su composición contiene carotenoides, fenoles y vitamina C [34], [35], [36].

2.1.3.2 Determinación de la capacidad antioxidante

La actividad antioxidante no puede ser medida directamente, pero puede determinarse por los efectos del compuesto antioxidante en un proceso de oxidación controlado.

Con base a las reacciones químicas, la gran mayoría de los ensayos para determinar la capacidad antioxidante pueden ser divididos en dos categorías: la primera son ensayos basados en la reacción por transferencia de átomos de hidrógeno (HAT) y la segunda categoría en ensayos basados en la reacción por transferencia de electrones (ET) [30], (véase tabla 7).

***Tabla** 7. Clasificación de los métodos de ensayo para la determinación de la capacidad antioxidante [30].*

Ensayo	Categoría
Acido 2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolin-6-sulfonico (ABTS) 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo (DPPH) Poder de reducción antioxidante del hierro (FRAP) N,N-dimetil-p-fenilendiamina (DMPD) Capacidad de reducción antioxidante del cobre (CUPRAC)	Ensayos basados en la transferencia de electrones (ET).
Capacidad de absorción del radical oxígeno (ORAC) Parámetro antioxidante de captura de radicales (TRAP) Inhibición de la oxidación del ácido linoleico Inhibición de la oxidación de los lípidos de baja densidad (LDL)	Ensayos basados en la transferencia de átomos de hidrógeno (HAT).

Los ensayos basados en ET involucran una reacción redox con el oxidante como un indicador del punto final de reacción. La mayoría de los ensayos basados en HAT monitorean una reacción cinética competitiva, generalmente están compuestos de un generador de radicales libres sintético, una prueba molecular oxidable y un antioxidante.

Entre los ensayos de captación de radicales libres, el método DPPH, es el más rápido, simple y de menor costo, en comparación con otros modelos. Por otro lado, el ensayo de decoloración ABTS se puede aplicar a antioxidantes hidrofílicos y lipofílicos,

por lo tanto, son los 2 métodos más empleados. Sin embargo, en este tipo de ensayos donde el resultado también depende del tipo de análisis que se le dé, es conveniente realizar un tercer ensayo para tener el valor por triplicado, y en esos casos se emplea el ensaye de fenoles totales. A continuación, se describirá brevemente en que consiste cada método.

- **Ensayo DPPH**

Este método fue propuesto por Blois en 1958 [30], en el cual se demostró por primera vez la capacidad del radical libre DPPH para aceptar un átomo de hidrógeno proveniente de una molécula de cisteína. La molécula DPPH es conocida como un radical libre estable debido a la deslocalización de un electrón desapareado sobre la molécula completa, por lo cual la molécula no se dimeriza, como es el caso de la mayoría de los radicales libres.

La deslocalización del electrón también intensifica el color violeta intenso típico del radical, el cual absorbe en metanol a 517 nm. Cuando la solución de DPPH reacciona con el sustrato antioxidante que puede donar un átomo de hidrógeno, el color violeta se desvanece. El cambio de color es monitoreado espectrofotométricamente y es utilizado para la determinación de los parámetros de las propiedades antioxidantes.

La mayoría de los estudios expresan los resultados como el valor de la concentración máxima de la media inhibitoria (IC_{50}), definido como la cantidad de antioxidante necesario para disminuir la concentración inicial de DPPH al 50%. Este valor se calcula graficando el % de inhibición contra la concentración del extracto.

- **Ensayo ABTS**

La generación del radical ABTS constituye la base de uno de los métodos espectrométricos que han sido aplicados para medir la actividad antioxidante total de soluciones o sustancias puras y mezclas acuosas. La técnica implica la producción directa del cromóforo ABTS verde-azul a través de la reacción entre ABTS y el persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$). La adición de los antioxidantes al radical pre-formado lo reduce a

ABTS, donde este presenta tres máximas de absorción a las longitudes de onda de 645 nm, 734 nm y 815 nm. De esta manera, el grado de decoloración como % de inhibición del radical catión ABTS está determinado en función de la concentración y el tiempo.

- **Ensayo de Fenoles Totales (FT)**

El ensayo de Folin-Ciocalteu (FC) es un método comúnmente utilizado en el área de agroquímica e industrias alimenticias por su simplicidad, por la disponibilidad comercial del reactivo y por ser un procedimiento ya estandarizado. El reactivo FC utiliza un mecanismo de reacción de oxidación/reducción, que no es específico para fenoles. El método implica la oxidación de fenoles en solución alcalina y la medición colorimétrica.

2.1.4 Evaluación del estado de corrosión en estructuras de concreto reforzado

Cuando una estructura sufre un daño, la primera acción que se realiza es una inspección visual. Con la finalidad de identificar la falla, las causas que lo originaron y la magnitud de la problemática. En términos coloquiales sería como realizarle una autopsia a la estructura de concreto reforzado para saber, ¿Cómo?, ¿Por qué?, ¿Cuánto? y ¿Cuándo? para así brindar un diagnóstico. Para lograr esto es necesario el empleo de técnicas que nos permitan saber qué es lo que está ocurriendo con nuestro elemento.

Como es conocido el principio de la corrosión es de comportamiento electroquímico, por consiguiente, surgen técnicas electroquímicas que nos permiten cuantificar la magnitud del fenómeno. Como la resistencia a la polarización, la espectroscopia de impedancia electroquímica, ruido electroquímico, por mencionar algunas. Asimismo, existen otras técnicas no electroquímicas como la resistividad eléctrica, inspección visual, pérdida de masa, contenido de cloruros, y profundidad de carbonatación que nos proporcionan información para conocer el comportamiento del material. Cabe mencionar que las técnicas mencionas anteriormente son de carácter semi destructivo y no suponen un riesgo para la estructura, sin embargo, es importante conocer sus limitaciones y los principios, para emplearlas de manera adecuada. A continuación, se detallarán las técnicas empleadas en este proyecto de investigación.

2.1.4.1 Medición del potencial de corrosión de media celda

Esta técnica es una de las más simples, el principio está basado en el supuesto de que la capa pasiva se rompe en la superficie del acero donde la corrosión severa ocurre, así que el potencial es mucho menor que en el área en donde no se ha corroído.

La ASTM C 867 ha establecido un criterio para indicar la probabilidad de corrosión en las estructuras de concreto reforzado, basado en la medición del potencial. Mostrado en la tabla 8.

Tabla 8. *Criterios de corrosión para acero de refuerzo según ASTM C 867.*

Potencial medido (mV/CSE) (Ecorr)	**Condición de corrosión**
> - 200	Bajo (10% de probabilidad de corrosión)
-200 a -350	Intermedio (riesgo incierto de corrosión)
< -350	Alto (90% de probabilidad de corrosión)

Cabe mencionar que el criterio mencionado en la tabla es aplicable cuando se emplea un electrodo de referencia de Calomel saturado (CSE). Los potenciales negativos se pueden encontrar cuando un concreto se encuentra saturado, donde no existe oxígeno para iniciar la corrosión [17].

2.1.4.2 Resistencia a la polarización lineal

La resistencia a la polarización (Rpl) es la única técnica capas de cuantificar la velocidad instantánea de corrosión. Para poder obtener la Rp es necesario observar la linealidad de la curva de polarización justo alrededor del potencial de corrosión. El principio electroquímico está basado en la ecuación de Stern-Geary (1957) mostrada en seguida [24].

$$icorr = \frac{B}{Rp} \tag{13}$$

Donde “Rp” está definida por la pendiente de la curva generada entre el potencial (Ecorr) y la densidad de corriente (icorr), las unidades son $\Omega \cdot cm^2$ o solamente Ω cuando no se toma en cuenta el área de exposición. Por otro lado “B” es una constante con unidades de mV ó V, que está en función de las pendientes anódicas y catódicas de Tafel, las cuales pueden ser determinadas por el método de pérdida de masa. La constante “B” se puede determinar con la ecuación 14.

$$B = \frac{\beta a * \beta c}{2.303(\beta a + \beta c)} \tag{14}$$

Los valores aceptados de la constante B para acero de refuerzo embebido en concreto fueron propuestos por [37] con 26 y 52 mV para estado activo y pasivo, respectivamente. Para esté proyecto se consideró un estado activo de la varilla cuando la medición del potencial (Ecorr) fuera < -270 mV, y un estado pasivo de la varilla cuando Ecorr > -220 mV.

Se han propuesto algunos criterios para relacionar el icorr con la situación de corrosión del acero embebido en el concreto. En la tabla 9 se muestran estas relaciones.

Tabla 9. *Criterio de relación entre icorr y el estado de corrosión del acero embebido en concreto [17] .*

Situación de corrosión del acero de refuerzo	**icorr (μA/cm²)**	
	Broomfield (1993, 1994)	Clear 1989
Pasivo	< 0.1	< 0.2
Corrosión Baja a Moderada	0.1 – 0.5	0.2 – 1
Corrosión Moderada a Alta	0.5 -1	1 – 10
Corrosión Alta	> 1	> 10

Cuando el mecanismo de corrosión es de tipo localizado se calcula la penetración local máxima del ataque, multiplicando por 10 el valor medio medido. Cuando la corrosión es uniforme se consideran los valores normales [19].

2.1.4.3 Espectroscopía de impedancia electroquímica

La EIS por sus siglas en inglés es una técnica de corriente alterna capaz de cuantificar la corrosión del acero embebido en el concreto. La impedancia (Z) es la relación de voltaje y corriente alterna; generalmente se aplica un voltaje alterno de 10 a 20 mV al acero de refuerzo y la resultante de corriente y ángulo de fase es medida para varias frecuencias.

La respuesta a una corriente alterna es una impedancia compleja que tiene una componente real (resistiva) y otra imaginaria (capacitiva o inductiva) con valores de Z y Z' respectivamente [24] .

Para simplificar el análisis se utilizan circuitos equivalentes para simular el proceso de corrosión electroquímico del acero en el concreto. El circuito equivalente más empleado es una conexión de tres elementos: una resistencia a la solución (Rs), en paralelo con una capacitancia de doble capa (CPE) y una resistencia a la polarización (Rp) [38], mostrado en la figura 14.

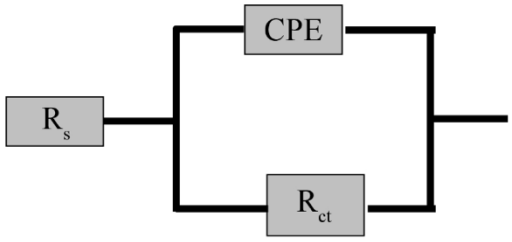


Figura 14. *Circuito equivalente simple de corrosión [14] .*

El típico diagrama de Nyquist para la EIS puede ser dividido en 3 regiones, en la figura 15 se representa esquemáticamente. Cabe mencionar que este diagrama no es completamente real de una espectroscopia de impedancia electroquímica, ya que se combinan diferentes posibilidades espectroscópicas en un solo diagrama. En algunas ocasiones las altas o bajas frecuencias pueden faltar en la experimentación debido a la limitación de la capacidad del equipo con el que se realizan las mediciones. Asimismo, ninguno o más de un semicírculo pudiera obtenerse de manera experimental, dependiendo del proceso de corrosión del acero de refuerzo. El rango típico de frecuencias empleadas es de 10^4 Hz a 10^{-2} Hz [17].

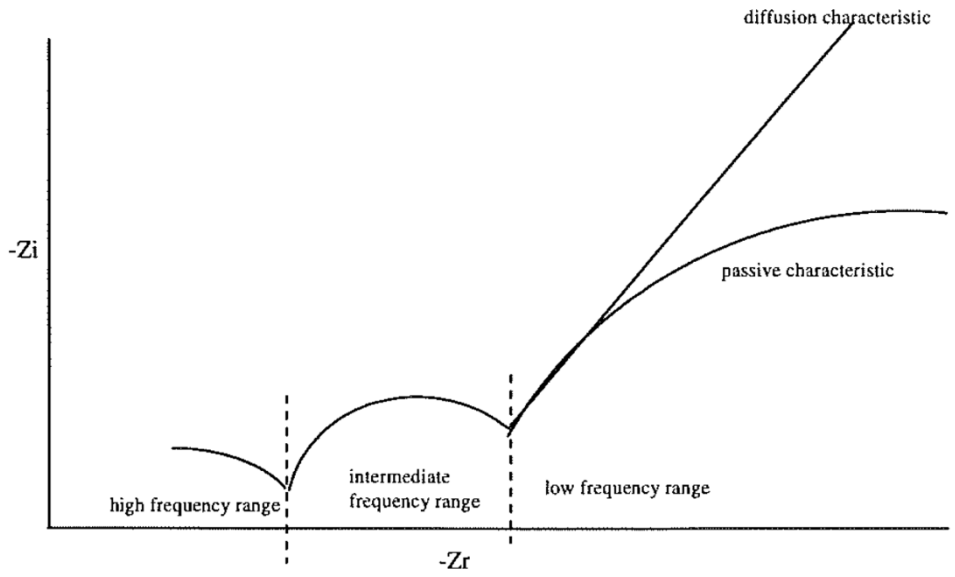


Figura 15. *Diagrama convencional de Nyquist de EIS para acero embebido en concreto [17] .*

En las frecuencias altas se tiene un bucle capacitivo el cual generalmente se le asocia con la resistencia del concreto a la capacitancia distributiva de las paredes porosas de este. Sin embargo, algunas investigaciones le atribuyen esta alta frecuencia a la interfaz acero-concreto que es la capa pasiva o los productos de corrosión [17].

En el rango de baja frecuencia se tienen dos tipos de comportamiento espectroscópico: el primero es una característica controlada de difusión y el segundo es una característica de pasivación. Se encontró que, si el acero estaba sufriendo corrosión, la característica de difusión con una región linear aparecería en una frecuencia baja; en contraste cuando se presenta una espectroscopía se muestra una capacitancia amplia a una frecuencia muy baja exhibida como un sistema pasivo, donde el acero está en estado pasivo [17].

Por último, en la zona de frecuencia intermedia se tienen diferentes espectroscopias. Generalmente se media un solo semicírculo, pero en ocasiones se presentan dos bucles capacitivos. Comúnmente la espectroscopia en este rango de frecuencias se relaciona con los procesos de la capa pasiva o los productos de corrosión de la barra de refuerzo [17].

2.1.4.4 Resistividad eléctrica del concreto

La resistividad del concreto refleja la dificultad para la corriente de fluir en el camino iónico de una celda de corrosión galvánica. La resistividad eléctrica es una propiedad física de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el Ω·cm u Ω·m.

Por lo que, el concreto puede ser considerado como un material semiconductor donde su resistividad varía sustancialmente dependiendo de muchas variables. Dentro de las más destacadas se encuentran el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas/orgánicas, la relación a/c, la porosidad de la estructura, entre otras [39]. Normalmente la corriente eléctrica es llevada por la red de poros gracias a los iones de Na^{+}, K^{+}, Ca^{++}, OH^{-}, SO_4^{-}, Cl^{-} los cuales se encuentran disueltos en la solución de poro.

Este parámetro puede ser usado para obtener información útil sobre el comportamiento de corrosión del acero embebido en el concreto. Se encontró que la resistividad guarda una relación relativamente proporcional con la velocidad de corrosión.

Se pueden tomar valores de resistividad superficial con el método de Wenner en donde las puntas que aplican la corriente se colocan de manera superficial, sin considerar toda el área del elemento en estudio; en la norma AASHTO TP 95-11 se establecen los criterios del método. Sin embargo, también se puede determinar la resistividad bruta del elemento, mediante la prueba de Bulk en la norma mexicana NMX C 514 aparecen los criterios para la ejecución de la prueba. En la tabla 10 se establecen los criterios de relación entre la resistividad superficial medida y la penetración del ion cloruro. Por otro lado, en la tabla 11 se muestran los criterios de la probabilidad de corrosión relacionados con la medición de la resistividad bruta.

Tabla 10. *Relación entre la resistividad superficial y la penetración del ion cloruro. AASHTO 95-11, (a= espaciamiento entre las puntas de la sonda Wenner).*

Penetración del Ion Cloruro	**Resistividad Superficial (kΩ·cm)**	
	100 mm x 200 mm Cilindros (**4in x 8 in**) a= 1.5	150 mm x 300 mm Cilindros (**6 in x 12 in**) a= 1.5
Alta	< 12	< 9.5
Moderada	12 – 21	9.5 – 16.5
Baja	21 – 37	16.5 – 29
Muy Baja	37 – 254	29 – 199
Despreciable	> 254	> 199

Tabla 11*. Relación entre la resistividad bruta y la probabilidad de corrosión. Adaptación de NMX C 514-19*

Probabilidad de corrosión	**Resistividad Bruta (kΩ·cm)**
Alta	< 10
Moderada	10 – 50
Baja	50 – 100
Despreciable	> 100 – 200

2.1.4.5 Contenido de cloruros

El ingreso de los cloruros es más complicado que el proceso de carbonatación. No es uniforme y no hay un "frente" de cloruros definido claramente como en el caso de la carbonatación. Los cloruros pueden penetrar en el concreto y alcanzar la superficie del acero de refuerzo mediante, difusión, succión capilar o migración eléctrica. A pesar de que se han estudiado un sin número de modelos para describir el ingreso de los cloruros en el concreto, estos son regidos por el mecanismo de difusión que se presentó en la reacción 7. Y con este principio se obtiene la ecuación para determinar la concentración de cloruros a cierta profundidad en un tiempo estimado, mostrados en la siguiente ecuación.

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_o) erf \frac{X}{2\sqrt{Dt}} \quad (15)$$

Donde “Cx” representa el umbral de cloruros, “Cs” es la concentración de iones cloruro en la superficie de concreto, “Co” equivale a la concentración inicial de iones cloruro, “X” es la distancia que recorren los iones cloruro para llegar al acero de refuerzo (recubrimiento), “t” es el tiempo de iniciación de la corrosión y “D” es el coeficiente de difusión.

Como se representó en la figura 7 existen tres formas en las que los iones de cloruro pueden estar en el concreto, siendo los cloruros ligados químicamente, también conocidos como “fijados”, los libres y los totales. Donde los cloruros totales son la sumatoria de los mencionados anteriormente [40].

Los cloruros libres son aquellos que se encuentran en la solución de poro y continúan viajando a través de la red de poros. Por otro lado, los cloruros ligados pueden ser fijados de dos maneras: químicamente o por adsorción.

La fijación química de cloruros está determinada principalmente por el contenido de aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico. Este tipo de fijación es irreversible, y conduce a la formación de sales de Friedel (mostrados en la ecuación 12) y oxicloruros de calcio. Esto es influenciado por la presencia de sulfatos ya que éstos forman enlaces más fuertes con los aluminatos que con los cloruros, disminuyendo así la cantidad de aluminatos presentes para la fijación de cloruros [40].

La fijación por adsorción se produce sobre el gel de silicato de calcio hidratado, en este fenómeno los elementos adsorbidos se denominan adsorbatos y el elemento en cuya superficie se desarrolla se denomina sustrato. El fenómeno de adsorción es previo a toda reacción química entre compuestos, entonces para que se produzca la fijación química de cloruros, es necesaria la adsorción previa de ellos en la superficie de los aluminatos y ferroaluminatos [40].

Para describir la naturaleza de la estructura y uniones de las moléculas adsorbidas se pueden emplear varios modelos. En los sistemas cementiceos se han usado principalmente tres modelos matemáticos de isotermas de adsorción (véase figura 16). El isoterma de Langmuir, de Freundlich y el isoterma lineal de Tutti [40]. El término "isoterma" se refiere a la dependencia del fenómeno de adsorción con respecto a la temperatura.

La capacidad de adsorción se determina como la pendiente del isoterma de adsorción y resulta dependiente de la concentración de cloruros libres.

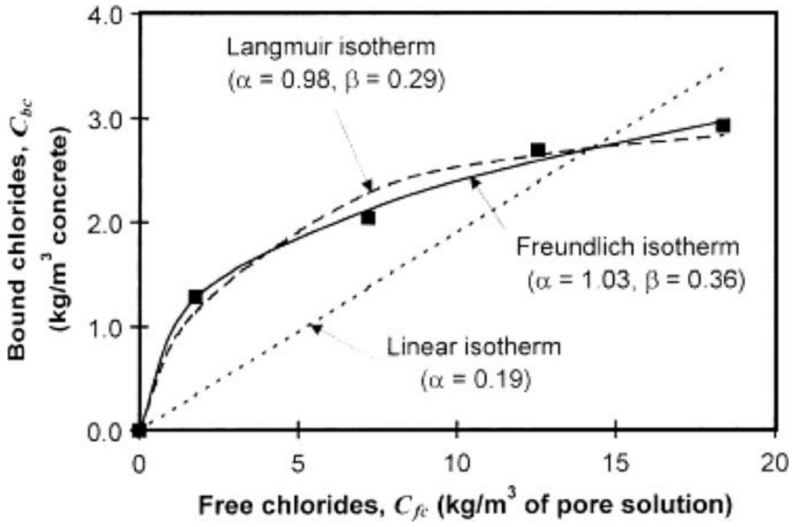


Figura 16. *Isotermas de adsorción para la relación entre cloruros libres y cloruros fijados [59].*

Por otro lado, el contenido de cloruros totales en una muestra también puede determinarse mediante la técnica de caracterización de Fluorescencia de Rayos X (FRX), está tiene como finalidad el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U).

2.1.4.6 Profundidad de carbonatación

El método más empleado para medir la profundidad de carbonatación es por medio del indicador de fenolftaleína. Éste es un indicador del pH que se obtiene a partir de la disolución de 1% de fenolftaleína en alcohol etílico. El procedimiento debe de realizarse preferentemente en un corte de concreto no contaminado y rociar la solución de fenolftaleína, se procede tomando lecturas con precisión de 0.5 mm desde la superficie del elemento hasta el perfil que se forma con el indicador. En la figura 16 se ilustra un ejemplo de este procedimiento.

Figura 17. *Prueba de fenolftaleína en un corte de concreto [60].*

En la figura 16 se puede observar que la parte de concreto que se encuentra "coloreada" de violeta o rosa fucsia es la parte no carbonatada o "sana", mientras que la parte que se encuentra sin pintar, con la apariencia colorimétrica normal del concreto representa a la parte afectada por el CO_2, es decir la parte carbonatada.

2.1.5 Durabilidad de las estructuras de concreto reforzado

El American Concrete Institute (ACI) en el código ACI 201.2R-08 define como durabilidad de la siguiente manera:

"*La durabilidad del concreto de cemento hidráulico está definida como la habilidad para resistir la acción de la intemperie, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. El concreto durable debe mantener su forma, calidad, y condiciones de servicio originales cuando es expuesto al ambiente*."

Con este planteamiento podemos decir que cualquier estructura de concreto reforzado cuenta con una vida útil de servicio. En donde ésta se consideraría como el tiempo en el que la estructura mantiene las características estéticas, de seguridad y funcionalidad que se proyectaron en la etapa de diseño. En el momento en que una estructura presenta algún daño y se requiere un mantenimiento o reparación se considera que el periodo de vida útil termino, sin embargo, si se realizan en un tiempo adecuado su periodo de servicio se puede alargar.

El principal factor de deterioro de estas estructuras es el medio ambiente al que se encuentren sometidas. En la mayoría de las ocasiones no se tiene un buen antecedente del medio en donde se colocará la estructura, lo que provoca que desconozcamos el comportamiento que ésta tendrá. El agente indispensable para generar los deterioros en la estructura suele ser el agua, ya que funge como vehículo para el ingreso de microorganismos agresivos. Los ataques a las estructuras pueden ser de diferentes mecanismos como se muestran en la figura 18.

Enfocando a que el ataque a la estructura sea por el ingreso de cloruros, se tendrá un deterioro en el elemento de acero de refuerzo y por consiguiente en la matriz de concreto. Para monitorear el estado de degradación de la estructura se propusieron modelos de predicción de la vida útil. Desde el punto de vista de la corrosión el modelo más destacable es el modelo de Tutti.

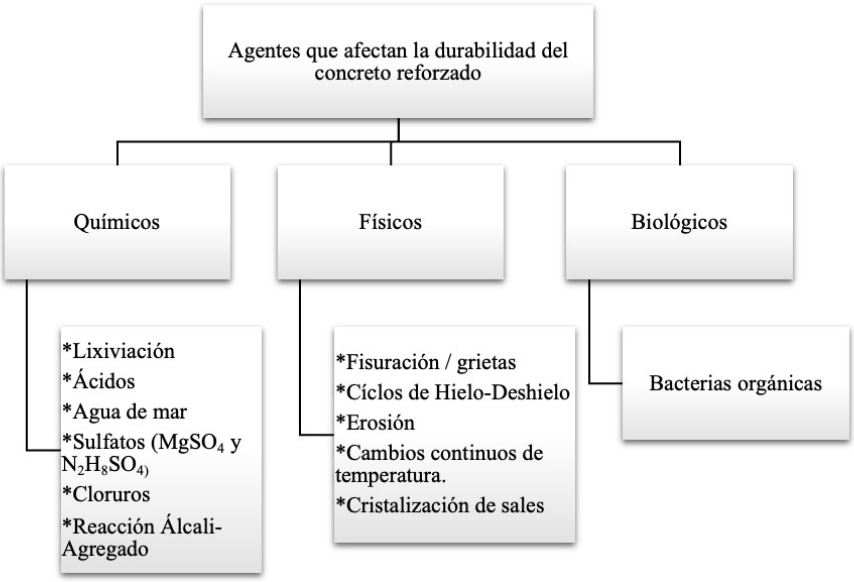


***Figura 18**. Agentes de deterioro en el concreto reforzado (elaboración propia).*

2.1.5.1 Modelo de Tutti

Este modelo considera un período de iniciación en el que los iones cloruro y la carbonatación avanzan por la masa del concreto hasta llegar al acero de refuerzo y despasivarlo; el otro periodo que se considera es el de propagación, en el cual el acero de refuerzo se corroe hasta llegar a un grado de deterioro que compromete la funcionalidad y/o seguridad de la estructura.

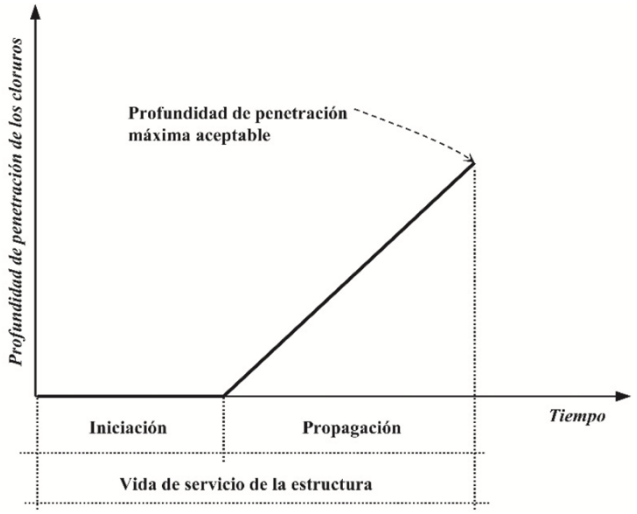


***Figura 19.** Modelo de Tutti para la estimación de la vida útil de las estructuras de concreto reforzado.*

CAPÍTULO 3

3.1 JUSTIFICACIÓN

Evaluaciones realizadas por organizaciones especialistas estiman que las pérdidas causadas por la corrosión serían del 1.25 a 3.50% del PIB de países en vías de desarrollo y desarrollados [41].

México siendo un país con amplia zona costera y en vías de desarrollo con nuevo capital industrial, debe atender con premura este fenómeno, considerando que el mayor porcentaje de construcciones civiles se realizan con concreto reforzado.

Para disminuir la corrosión de las estructuras de concreto reforzado se emplean distintos procedimientos como los aditivos inhibidores de corrosión, sin embargo, los utilizados en la actualidad base nitrito de calcio tienen efectos negativos en la resistencia a la compresión del concreto y los tiempos de fraguado, así como la toxicidad para la salud del ser humano y el medio ambiente.

Con estos antecedentes, este proyecto pretende evaluar el desempeño de materiales naturales endémicos de la región mexicana (nopal y sábila) como posibles agentes alternativos inhibidores de la corrosión en matrices de concreto reforzado. Además, brindar más información cualitativa con respecto al comportamiento en estado fresco y endurecido de probetas de concreto con adiciones de sábila y nopal deshidratados en polvo, empleando mayores porcentajes de adiciones a los utilizados en las investigaciones consultadas.

La contribución de este proyecto a la comunidad cientifica radica en brindar una caracterización fisicoquímica exhaustiva de los materiales naturales (nopal y sábila). Asi como empezar a buscar alternativas naturales que cumplan con la capacidad necesaria para brindar una protección contra la corrosión de las estructuras de concreto reforzado.

3.2 HIPÓTESIS

Materiales orgánicos como el nopal y la sábila tienen un alto contenido de compuestos antioxidantes que son responsables de la captura de los electrones y eliminación de los radicales libres que provocan la oxidación, por lo que al incorporarlos como aditivos en polvo en una matriz de concreto reforzado expuesta a cloruros y CO_2 podrán inhibir el proceso de corrosión del acero de refuerzo.

3.3 OBJETIVOS

3.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de materiales naturales como la sábila y el nopal deshidratados en polvo como inhibidores de la corrosión en elementos de concreto reforzado, expuestos a un ambiente rico en cloruros y en CO_2 para brindar una posible alternativa ante los inhibidores existentes en el mercado comercial.

3.3.2 OBJETIVOS ESPECIFÍCOS

- Determinar la capacidad antioxidante de la sábila, el nopal y el inhibidor comercial mediante pruebas fitoquímicas en mezclas de pastas de cemento portland con diferentes porcentajes de dosificación.

- Determinar el efecto del nopal, la sábila y un inhibidor comercial sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de las mezclas de concreto.

- Determinar la capacidad antioxidante de la sábila y el nopal mediante pruebas fitoquímicas en mezclas de concreto reforzado sometidas a un ambiente rico en cloruros y CO_2.

- Comparar el comportamiento electroquímico, del nopal y la sábila como inhibidores de la corrosión, con respecto a un inhibidor comercial mediante pruebas electroquímicas.

CAPÍTULO 4

4.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta sección se describe el trabajo experimental que se realizó desde la planeación, preparación y ejecución, con el propósito de alcanzar los objetivos establecidos en la investigación. En la figura 20 se visualiza el plan de trabajo distribuido en 4 etapas.

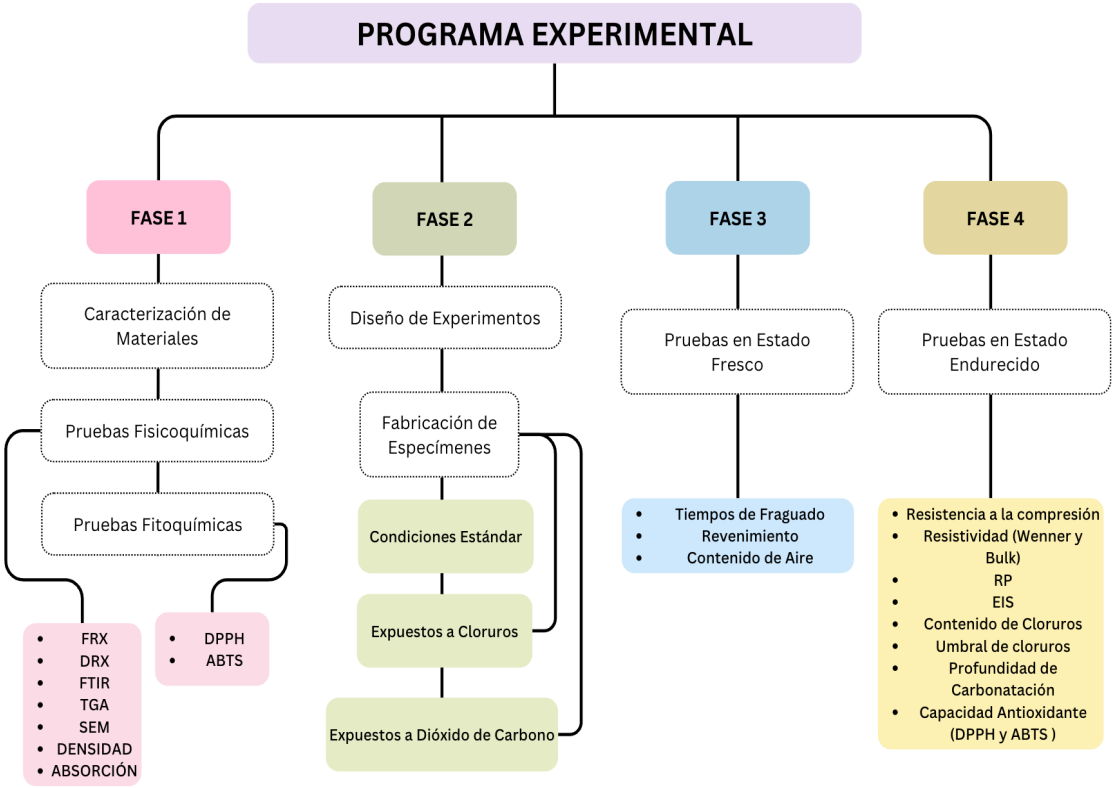


Figura 20. *Planeación experimental del proyecto de investigación.*

4.1.1 Descripción de la materia prima empleada

4.1.1.1 Cemento

Se empleó un cemento portland compuesto (CPC) con 40 MPa de resistencia a la compresión a 28 días (CPC 40, según la NMX C 414), donado por Concretos Tepeyac, planta San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

4.1.1.2 Agregados

- **Agregado grueso**

Se utilizó grava tipo caliza con TMA de ¾" (19 mm), procedente de la zona metropolitana de Monterrey N.L. qué cumple con los requisitos de calidad y granulometría que se indican en la normativa ASTM C 33, proporcionado por el Dpto. de Tecnología del Concreto del IIC.

- **Agregado fino**

Se empleó arena caliza No. 4, procedente de la zona metropolitana de Monterrey, N.L, qué cumple con los requisitos de calidad y granulometría que se indican en la normativa ASTM C 33, proporcionado por el Dpto. De Tecnología del Concreto del IIC.

4.1.1.3 Acero de refuerzo

Se utilizaron varillas de acero bajo carbono corrugadas de diámetro nominal de 3/8" (∅ 0.95 cm) con resistencia a la fluencia de 4,200 kgf/cm^2 (G42) según la NMX B 506 - CANACERO.

4.1.1.4 Materiales naturales

- **Sábila**

Se utilizó sábila deshidratada en polvo de color verde seco obscuro, obtenido de la inspección, lavado, desinfectado, deshidratado y destellado de las hojas frescas y sanas del *aloe vera.* Elaborado bajo las normas de buenas prácticas e higiene No. 251-SSA-2009. Comercializado por L.H. Des-hidratados, empresa ubicada en Guadalajara, Jalisco, México.

- **Nopal**

Se empleo nopal deshidratado en polvo de color verde pálido, obtenido de la inspección, lavado, desinfectado, deshidratado y pulverizado de las pencas frescas y sanas

del *opuntia ficus-indica*. Elaborado bajo las normas de buenas prácticas e higiene No. 251-SSA-2009. Comercializado por L.H. Des-hidratados, empresa ubicada en Guadalajara, Jalisco, México.

4.1.1.5 Aditivos

- **Inhibidor de la corrosión**

Se utilizó el aditivo comercial inhibidor de la corrosión EUCON CIA, base nitrito de calcio al 30%, de la compañía Euclid Chemical EUCOMEX, que cumple con la clasificación de la norma ASTM C 494 para aditivo de Tipo C.

- **Aditivo Superplastificante**

El aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante que se empleó en este proyecto fue FLOWCON – P01 base policarboxilato sin contenido de iones cloruros adicionados. Este material cumple con la norma ASTM C 494 Tipo F y es comercializado por la compañía Euclid Chemical EUCOMEX.

- **Aditivo Acelerante de Fraguado**

Se empleó un aditivo acelerante de fraguado ACCELGUARD TGD formulado sin cloruros que cumple con los requerimientos de la norma ASTM C 494 como Tipo C, comercializado por Euclid Chemical EUCOMEX. Fue necesario emplear este producto ya que en las mezclas preliminares se observó que las adiciones de sábila y nopal retardaban el fraguado del concreto.

4.1.2 FASE 1.- Caracterización de materiales

4.1.2.1 Pruebas fisicoquímicas

A continuación, se detallan las pruebas de caracterización que se le realizaron a los materiales con la finalidad de tener un conocimiento a cerca de sus características físicas y químicas poder emplearlos en el diseño de mezclas de manera correcta.

4.1.2.1.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La técnica de FRX se emplea para determinar la composición química elemental de un material, se considera no destructiva. El fenómeno de fluorescencia se da cuando se inciden los rayos X con la energía necesaria para desplazar un electrón de orbital, siendo reemplazado por un electrón del orbital exterior para llenar ese vacío. La energía necesaria para inducir ese desplazamiento es característica de cada elemento.

Se fabricaron las pastillas con 10 g de la muestra en polvo a analizar y 1 g de cera inerte, en un tubo de falcón se homogenizan evitando la formación de grumos, se procede a colocar el polvo homogéneo en una base de aluminio para darle soporte. El material se prensa con ayuda de la máquina hidráulica ATLAS a 15 Ton por 1 minuto. Concluido este proceso la muestra se encuentra lista (véase figura 21) para realizar el análisis de FRX en el equipo PANanytical Epsilon3-XL. Para la ejecución de la prueba fue necesario el empleo de helio como gas inerte. Los materiales sometidos a esta caracterización fueron el CPC 40, la sábila y el nopal.

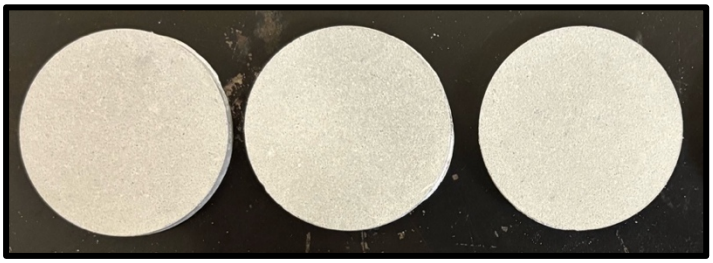


Figura 21. *Fabricación de pastillas para análisis FRX.*

4.1.2.1.2 Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción es una propiedad de todas las formas de ondas, y se refiere al fenómeno de dispersión de ondas cuando pasan a través de una rendija. Cuando los rayos X viajan a través de una estructura cristalina son difractados por las capas atómicas dentro del cristal. Estos rayos sufren interferencias constructivas o destructivas, basados en la ley de Bragg. Por lo tanto, esta técnica se emplea para la caracterización cualitativa y cuantitativa de fases de un material ya sean cristalinas o amorfas.

Cada material produce un patrón característico único que consiste en picos de intensidades variables situados en ángulos de difracción específicos. Lo cual permite determinar los compuestos químicos de cada material y se relaciona con los comportamientos de cada material. Las muestras fueron analizadas en polvo, utilizando un equipo PANalytical Empyrean en un rango de 10 – 70º del ángulo 2θ con un tamaño de paso (step size) de 0.5º, a incrementos de 0.05º. Los materiales caracterizados fueron el CPC 40, la sábila y el nopal.

4.1.2.1.3 Análisis Termogravimétrico (TGA)

Esta técnica de caracterización es un método de análisis térmico en el que la masa de un material se mide a lo largo del tiempo a medida que cambia la temperatura o a una temperatura constante durante un tiempo determinado. Generalmente se emplea cuando se desea conocer la pureza de material, la tasa de descomposición y evaporación, y la oxidación.

Las condiciones de análisis fueron de acuerdo con una termogravimetría dinámica en la que velocidad fue de 10 ºC por minuto, hasta una temperatura de 700 ºC empleando un flujo estándar con un equipo LINSEIS STA PT 1600. Los materiales analizados fueron el CPC 40, la sábila y el nopal.

4.1.2.1.4 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

El SEM emplea un haz de electrones que interactúa con los átomos de la muestra para emitir una imagen de alta resolución que permiten identificar la morfología del material, el tamaño de partícula, la composición de superficies e identificar fase cristalinas o amorfas.

Se fabricaron pastillas de 0.5 cm x 0.5 cm x 5 cm con recubrimiento de cobre, con altura definida de 40 mm y un spot size de 50, se tomaron imágenes a magnificación de 300x, 500x, 1000x, 2000x y 3000x a 15kV. De estas se seleccionaron las más representativas. Los materiales caracterizados fueron el CPC 40R, la sábila y el nopal.

4.1.2.1.5 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El análisis por medio de FTIR se realiza en espectrómetros de infrarrojo y da como resultado un espectro de absorción de infrarrojo el cual proporciona información de la estructura y concentración molecular. Todas las moléculas pueden manifestar una serie de bandas de absorción, cada banda corresponde con un movimiento de vibración de un enlace especifico dentro de la molécula.

El equipo empleado fue IRTracer-100, los parámetros de medición fueron en un rango de 500 a 4000 cm^{-1}, con 25 escaneos por segundo a una resolución de 4 cm^{-1}. El objetivo fue determinar los grupos funcionales del CPC 40, la sábila, el nopal, y el aditivo inhibidor de la corrosión EUCON CIA.

4.1.2.1.6 Densidad

- **Agregado Grueso**

Se siguió la normativa ASTM C 127, para determinar la densidad del agregado de ¾" (19 mm). Se obtuvo una muestra representativa mediante el método de cuarteo y retirando todo el material que pasa por la malla No. 4 (4.75 mm), en la normativa se especifican los pasos a seguir.

- **Agregado Fino**

Para la determinación de la masa específica de la arena No. 4 se siguió el procedimiento que dicta la normativa ASTM C 128, obteniendo por el método de cuarteo al menos 1 kg de muestra, el resto del procedimiento se indica en la normativa.

- **CPC 40R, Sábila y Nopal**

La densidad del cemento CPC 40 se obtuvo siguiendo el procedimiento que indica la norma ASTM C 188, en donde se requiere del uso del frasco Le Chatelier para aplicar el principio de volumen desplazado, donde se coloca una cantidad conocida de material (64 g de cemento), aforando a un volumen conocido con Keroseno ya que no reacciona

con el cemento, para determinar la densidad en función de la masa y el volumen desplazado.

Para la sábila y el nopal, no se podía determinar la densidad con agua como medio, ya que se solubilizan, por lo tanto, se realizó una prueba preliminar con keroseno para ver su comportamiento mostrado en la figura 22.

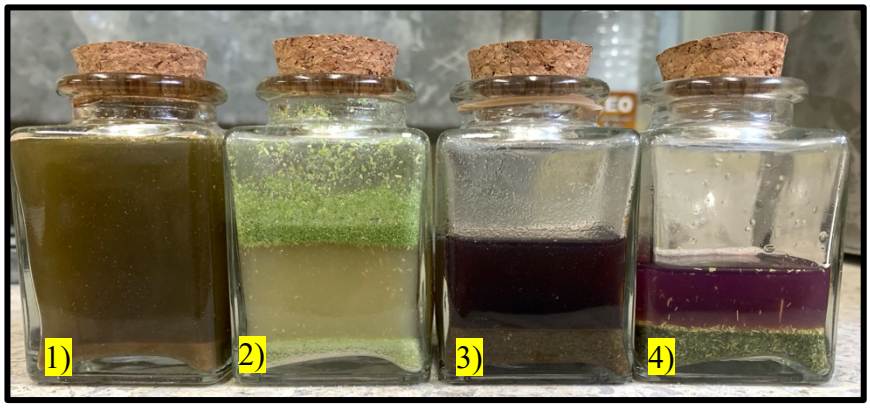


Figura 22. *Prueba visual de solubilidad de la sábila y el nopal. (1.- sábila con agua, 2.- nopal con agua, 3.- sábila con keroseno y 4.- nopal con keroseno)*

Como de manera visual los materiales no reaccionaron con el keroseno se prosiguió a seguir la norma ASTM C 188 para determinar la densidad de la sábila y el nopal como se visualiza en la figura 23.

Figura 23. *Determinación de la densidad. 1.- Sábila, 2.- Nopal, 3.- CPC 40.*

4.1.2.1.7 Absorción

- **Agregados Grueso y Fino**

Para la determinación de la absorción (ABS) de los agregados grueso y fino se siguieron las normativas ASTM C 127 y ASTM C 128 respectivamente, determinando un peso en estado saturado superficialmente seco (SSS), para después compararlo con un peso seco después de haber sido sometidos durante 24 horas en un horno con una temperatura de 110 ± 5 ºC.

- **Sábila y Nopal**

En el caso de la sábila y el nopal se empleó un procedimiento conocido como Tea-Bag consultado en la investigación de Montanari [42]. En donde se pesa una cantidad conocida del material y se coloca dentro de una bolsa de té. Se determina previamente la masa de la bolsa a emplear. Se pesa una cantidad de solución y se coloca en un vaso de precipitado. Se realizarán inmersiones de la bolsa de té a un determinado tiempo. Posterior a esto se determina la masa en estado SSS se procede a determinar la ABS con la ecuación proporcionada en la investigación. En la figura 24 se muestra parte del procedimiento.

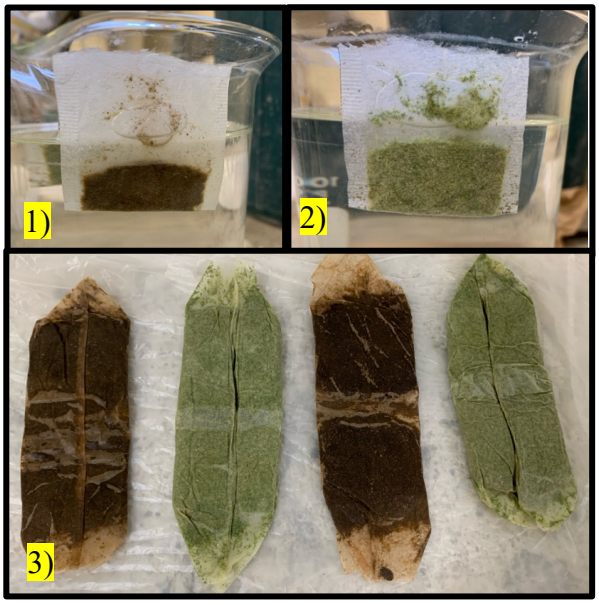


***Figura 24**. Procedimiento de Tea-Bag para determinar la absorción de la sábila y el nopal. 1.- Inmersión de la sábila, 2.- Inmersión del nopal, 3.- Condición de SSS para la sábila y el nopal.*

4.1.2.2 Pruebas fitoquímicas

4.1.2.2.1 DPPH y ABTS

Estás pruebas se emplearon para determinar la actividad antioxidante que tienen de manera natural la sábila y el nopal, para tener un parámetro de referencia se analizó también una muestra de CPC 40. Las muestras fueron realizadas en polvo que pasa la malla No. 100. Bajo condiciones controladas de laboratorio sin ninguna fuente de luz directa sobre las muestras. El Departamento de Alimentos de la Facultad de Ciencias Biológicas de la U.A.N.L fue sede para estos análisis.

Con la finalidad de saber si los materiales naturales al momento de adicionarlos a la mezcla de concreto continuaban con capacidad antioxidante; se realizaron unas pastas preliminares de cemento con relación a/c =0.50 adicionadas de sábila y nopal de manera individual en un 3% cada una (máximo porcentaje de adición que se empleará en este proyecto). Se realizaron probetas cilíndricas con diámetro de 2 cm y 5 cm de largo, las cuales a 14 días de edad se pulverizaron y cribaron por la malla No. 100 para realizar los análisis. En la figura 25 se observa el procedimiento que se siguió.

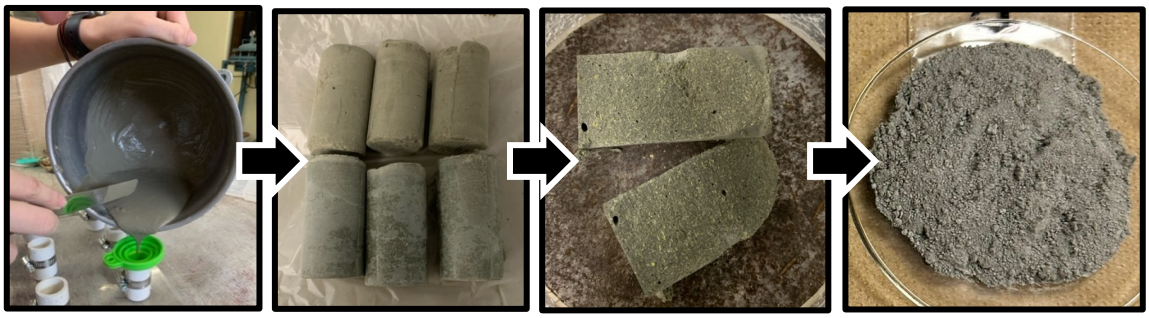


Figura 25. *Procedimiento de obtención de polvos de pasta de cemento con adición de 3% de sábila y 3% de nopal para posterior análisis de capacidad antioxidante.*

4.1.3 FASE 2.- Diseño experimental

Para evaluar el comportamiento de las adiciones naturales como posibles inhibidores de la corrosión en concreto reforzado se planteó una matriz experimental representada en la figura 26. Dicho diseño se fijó con una relación a/c = 0.50, con acero de refuerzo de diámetro nominal 3/8" (∅ 0.95 mm). Consta de una mezcla de referencia (MR) sin ningún tipo de adición natural, las siguientes tres mezclas son con la adición de sábila (MR+S) dosificadas en 1%, 2% y 3% con respecto al peso del cemento, al igual que las mezclas con adición de nopal (MR+N) dosificadas en 1%, 2% y 3% con respecto al peso del cemento, por último, se tiene la mezcla de referencia con la incorporación del aditivo inhibidor de la corrosión (MR+CIA), teniendo un total de 8 mezclas de concreto.

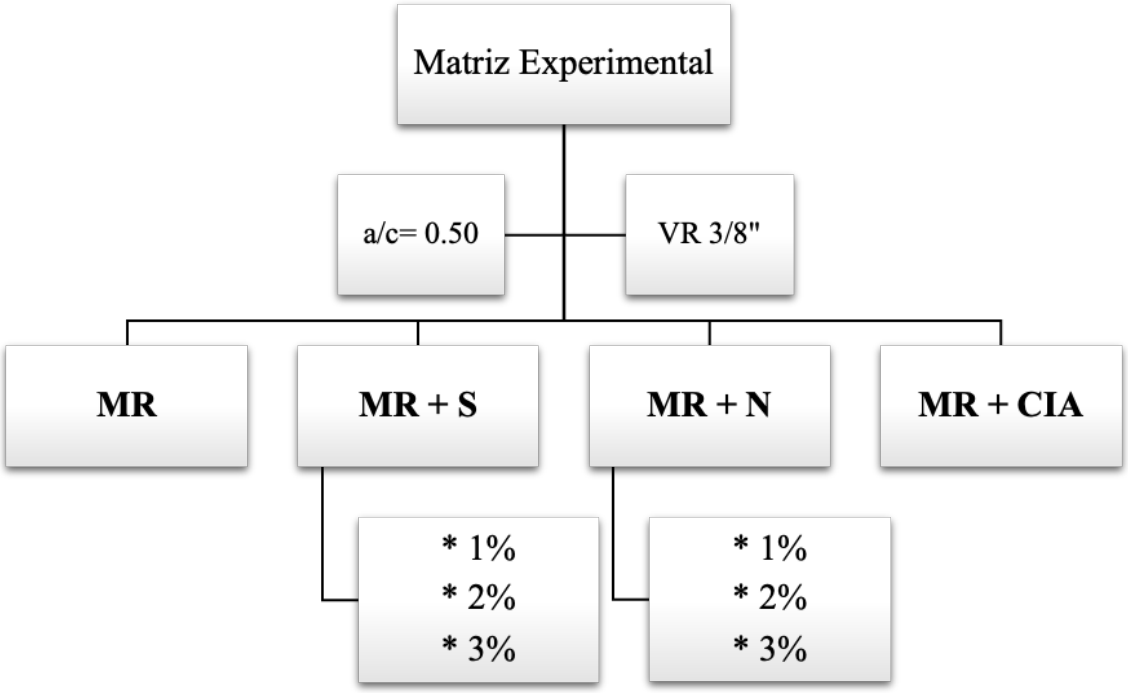


***Figura 26**. Diseño experimental del proyecto de investigación.*

A continuación, se detalla la configuración de los especímenes, así como la preparación previa de algunos materiales.

4.1.3.1 Configuración de especímenes

4.1.3.1.1 Bajo condiciones estándar

- **Resistencia a la compresión y resistividad**

Se fabricaron cilindros estándar (véase figura 27) de concreto de 100 mm x 200 mm (4 in x 8 in) con base a lo especificado en la norma ASTM C 31. Estas mismas probetas se emplearon para medir la resistividad bruta (Bulk) y superficial (Wenner), donde las normativas españolas UNE 83988-1 y UNE 83988-2 respectivamente, permiten estas dimensiones como mínimo para poder realizar las mediciones de resistividad.

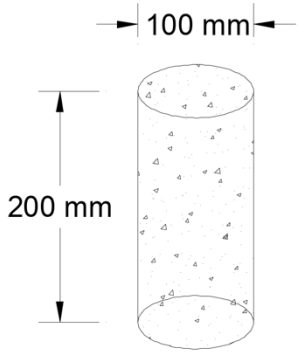


***Figura 27**. Configuración de especímenes para resistencia a la compresión y resistividad.*

- **Capacidad antioxidante**

Se fabricaron especímenes prismáticos (véase figura 28) con sección transversal de 75 mm^2 x 300 mm de longitud que permitirán obtener los polvos para los análisis de DPPH y ABTS.

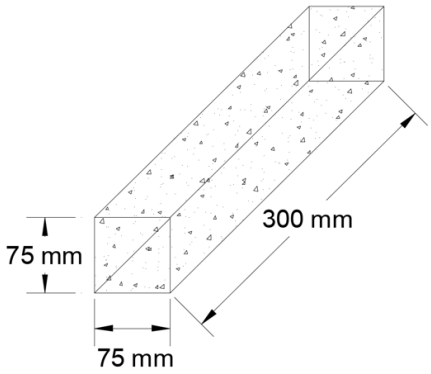


***Figura 28**. Configuración de especímenes para la determinación de la capacidad antioxidante.*

4.1.3.1.2 Corrosión inducida por cloruros

- **Inducción de la corrosión**

Para llevar a cabo la inducción de la corrosión, se prepararon especímenes de 115 cm x 280 cm x 150 cm, con dos camas de acero de refuerzo de 3/8” de acuerdo con la normativa ASTM G 109. Es importante mencionar que no se realizó la conexión entre las dos camas de varillas. El espécimen fue recubierto con resina epóxica (después del periodo de curado) en todas las caras exceptuando la inferior para permitir el ingreso de oxígeno. En la figura 29 se ilustran todos los detalles.

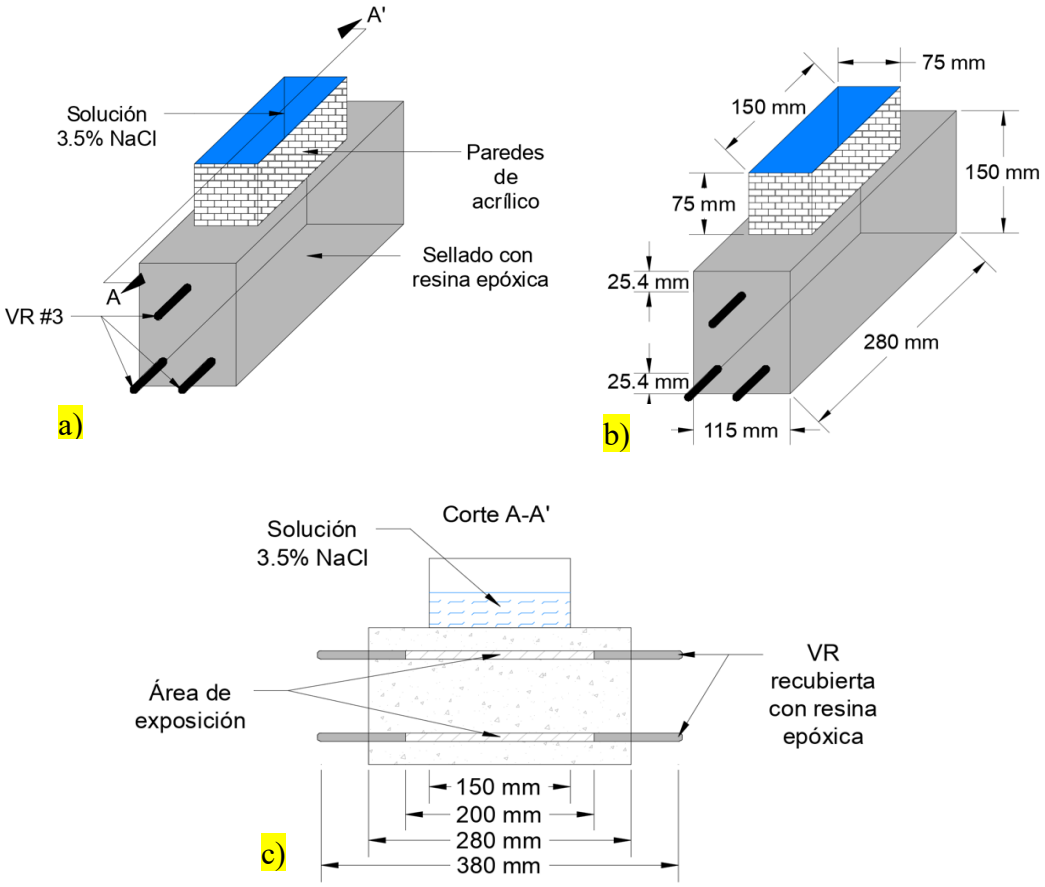


***Figura 29**. Configuración de especímenes para pruebas electroquímicas (EIS y RP).*

En la figura 29-a, se especifican los detalles necesarios para la fabricación del espécimen, en la figura 29-b, se establecen las dimensiones de la probeta, así como las de la zona en donde se coloca la solución NaCl, y por último en la figura 29-c, se ilustra un corte transversal en donde se observa que la longitud de trabajo de la varilla será de 200 mm, con 90 mm recubiertos de resina epóxica en cada extremo,

sobresaliendo 100 mm de la probeta, los cuales serán equidistantes del centro del espécimen, es decir 50 mm de cada lado.

- **Para contenido de cloruros**

En la determinación de cloruros se propusieron probetas prismáticas de 75 mm x 300 mm x 75 mm de sección con una zona de pounding de 50mm x 250 mm x 60 mm, la cual fue realizada con un material no absorbente y capaz de almacenar la solución. Los especímenes fueron recubiertos con resina epóxica (después del periodo de curado) en todas las caras exceptuando la cara inferior para permitir el paso de oxígeno. En la figura 30 se ejemplifica la configuración.

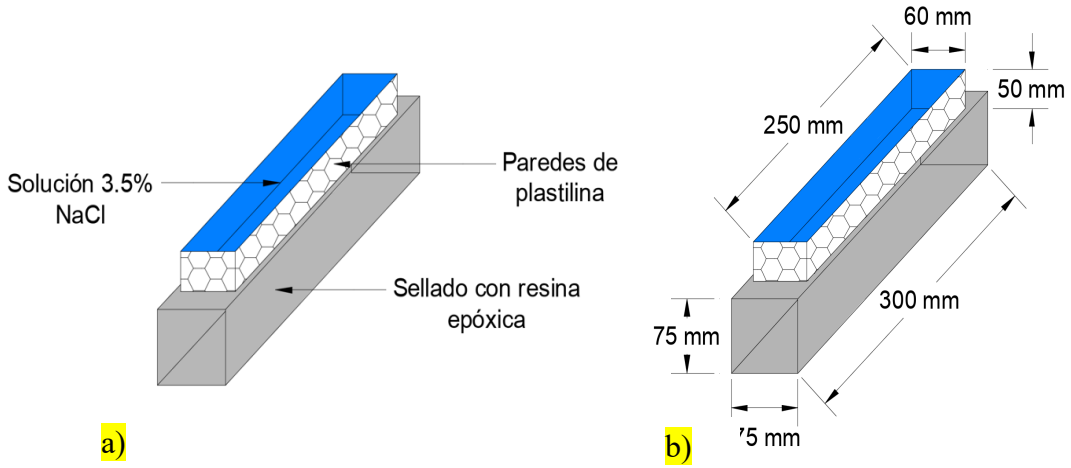


***Figura 30**. Configuración de especímenes para determinar contenido de cloruros. a) Especificaciones de la probeta, b) Dimensiones de los especímenes para contenido de cloruros.*

- **Para umbral de cloruros**

Con la finalidad de conocer cuál es el contenido crítico de cloruros necesario en la interfaz acero – concreto para romper la capa pasiva, se realizaron probetas cilíndricas de 75 mm x 150 mm, con una varilla de acero de 190 mm embebida de manera céntrica. Dejando una longitud de trabajo de 100 mm y recubriendo el resto con resina epóxica para evitar el ingreso de agentes externos que propicien la corrosión, en la figura 31 se muestra representada la configuración de las probetas.

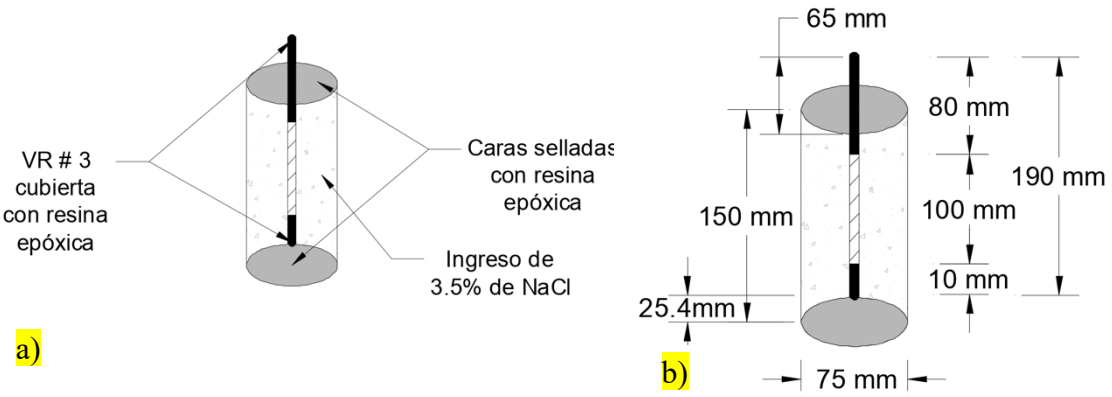


Figura 31*. Configuración de especímenes para determinación del umbral de cloruros. a) Especificaciones de la probeta, b) Dimensiones del espécimen.*

4.1.3.1.3 Bajo exposición de CO_2

- **Inducción de la corrosión**

Se opto por fabricar especímenes cilíndricos de 75 mm de diámetro por 150 mm de alto empleando una varilla corrugada # 3 (3/8”) como acero de refuerzo siendo el electrodo de trabajo; con una longitud de exposición de 100 mm. En los extremos la varilla fue recubierta con resina epóxica, levantada de la superficie inferior 25.4 mm como se muestra en la figura 32.

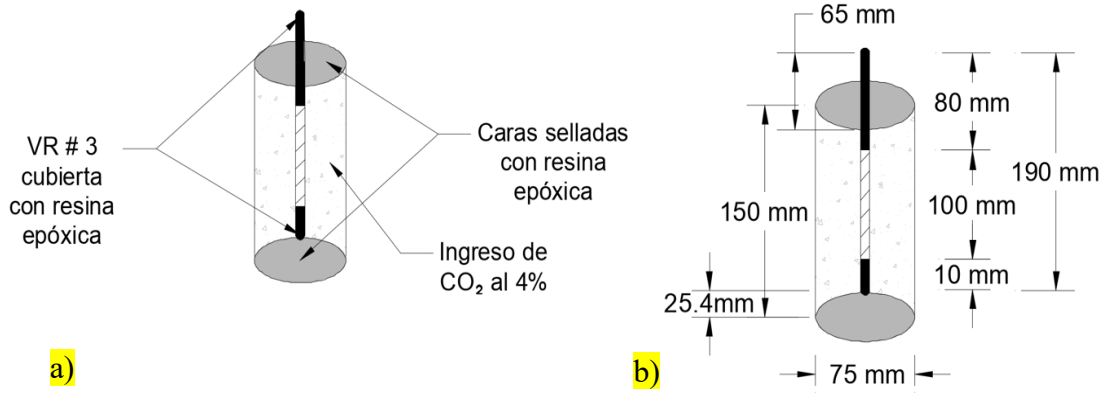


Figura 32. *Configuración de especímenes para pruebas electroquímicas expuestos a CO_2. a) Especificaciones de la probeta. b) Dimensiones del espécimen.*

- **Para profundidad de carbonatación**

En la norma europea EN 13295, se establece que las dimensiones del espécimen dependerán del TMA del agregado, si es mayor a 10 mm se deberán emplear probetas de 100mm x 100 mm x 400 mm. Dado que el agregado grueso que se está utilizando en el proyecto cuenta con TMA de 19 mm (3/4") rigen las dimensiones antes mencionadas. En la figura 33 se muestra esquemáticamente.

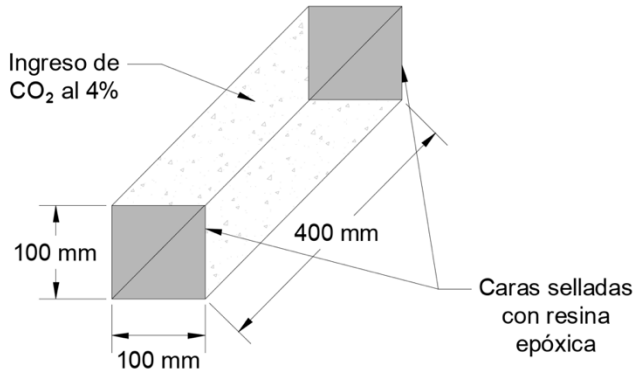


***Figura 33**. Configuración de especímenes para determinar profundidad de carbonatación.*

4.1.3.2 Preparación previa de material

4.1.3.2.1 Fabricación de molde para probetas electroquímicas

De acuerdo con las especificaciones de la normativa ASTM G 109, se decidió fabricar un molde que cumpliera con las dimensiones del espécimen, de material de CPVC (Policloruro de vinilo clorado) resistente y no absorbente, con tres cavidades de 150 mm x 115 mm x 280 mm, con tres orificios interiores para varillas con diámetro de 0.95 mm (3/8"), con ensambles y tornillos milimétricos de acero inoxidable mostrados en la figura 34.

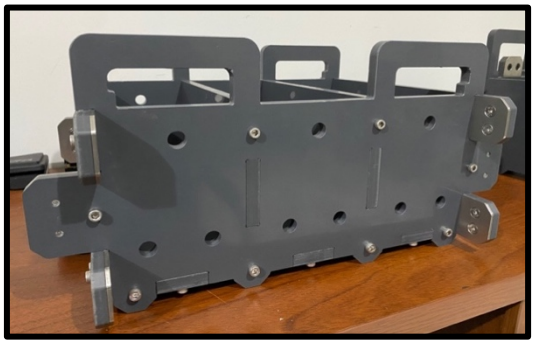


***Figura 34**. Molde para especímenes de acuerdo con ASTM G 109.*

4.1.3.2.2 Habilitación del acero de refuerzo para pruebas electroquímicas

Las varillas que se emplearon en las pruebas electroquímicas para exposición de cloruros se cortaron con ayuda de una sierra a 380 mm, mientras que las de exposición a CO_2 fueron de 190 mm. En la norma ASTM G 109 se menciona que las varillas en un extremo deberán tener una conexión para poder realizar las mediciones sin alguna interferencia. Debido a lo estipulado en la norma con ayuda de un torno se realizó una perforación en el extremo de las varillas con una broca de 5/32", posterior a eso, se generó la rosca en el orificio con un machuelo de 3/16" y finalmente se realizó el ensamble con el tornillo de acero inoxidable de 3/16". En la figura 35 se ilustra el proceso antes descrito.

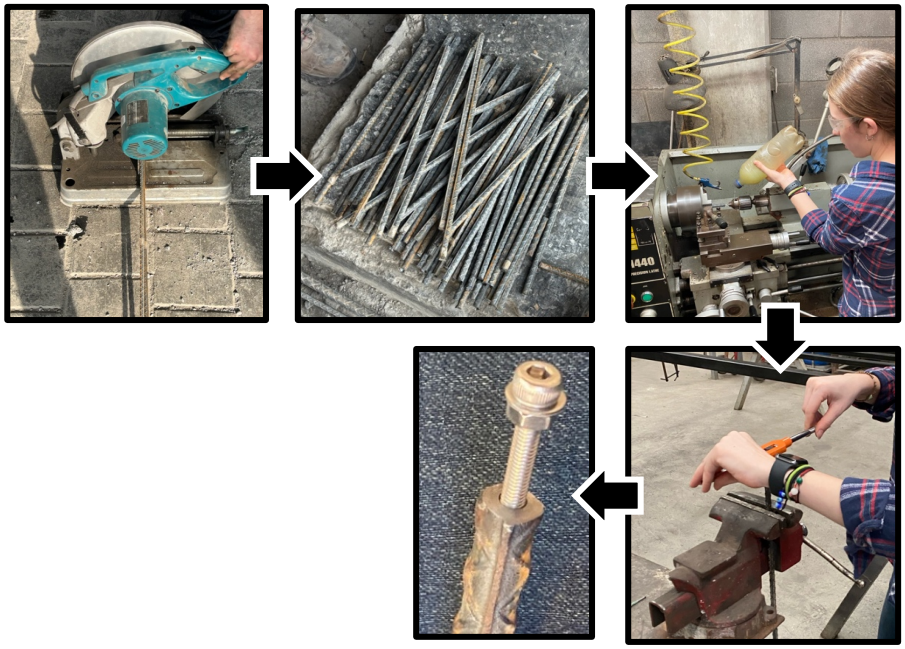


***Figura 35**. Proceso de habilitación de la conexión de la varilla de acuerdo con la noma ASTM G 109.*

Previo al empleo de las varillas se realizó un tratamiento de limpieza química descrito en la norma ASTM G1 con el objetivo de eliminar cualquier fuente que pueda provocar una corrosión externa. El acero de refuerzo se dejó inmerso en una solución de 500 mL de agua destilada, 500 mL de ácido clorhídrico y 3.5 g de hexametilentetramina, por un lapso de 10 a 30 minutos a una temperatura de 25 ºC. Concluido el periodo, las varillas fueron retiradas de la solución, secadas y colocadas en un ambiente aislado para evitar la oxidación de esta.

Posteriormente, se realizó la preparación de las varillas cubriendo la longiutud de trabajo con cinta de aislar y pintando con resina epóxica la longitud sobrante. Para las varillas expuestas a cloruros la longitud de trabajo fue de 200 mm tal como se indica en la figura 29, mientras que para las probetas expuestas a CO_2 fue de 100 mm, la cual se representa en la figura 31. Concluido este procedimiento el acero de refuerzo se encuentra apto y aceptable para su empleo en las pruebas electroquímicas. En la figura 36 se desglosa el procedimiento antes descrito para la habilitación de las varillas.

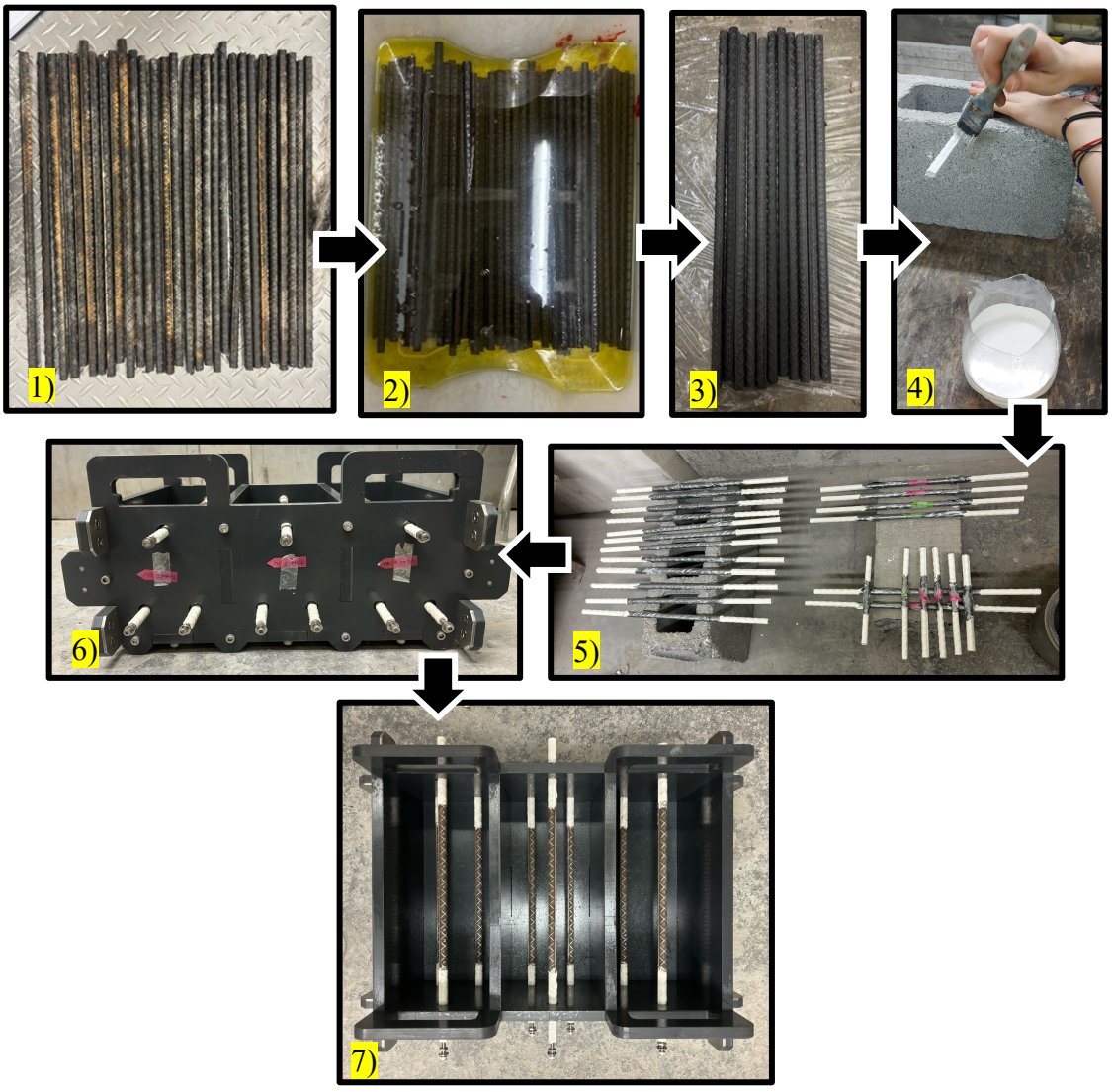


***Figura 36**. Procedimiento de decapado y recubrimiento con resina epóxica del acero de refuerzo para pruebas electroquímicas. 1.- VR previo a decapado, 2.- VR en solución acida de acuerdo con ASTM G 1, 3.- VR decapadas, 4.- Recubrimiento de VR con resina epóxica, 5.- VR protegidas con cinta de aislar en área de trabajo y cubiertas con resina epóxica. 6.- Vista frontal de VR habilitadas para pruebas electroquímicas expuestas a cloruros. 7.- Vista aérea de VR habilitadas para pruebas electroquímicas expuestas a cloruros.*

4.1.3.3 Ambientes de exposición

4.1.3.3.1 Carbonatación acelerada

Para poder observar el proceso de carbonatación acelerada bajo condiciones controladas, se expusieron en una cámara de carbonatación a una concentración del 4% ± 0.5% CO_2 con una humedad relativa (HR) entre 60% ± 10%, 24 especímenes cilíndricos de 75 mm x 150 mm para mediciones electroquímicas de EIS y RP. Por otro lado, para monitorear la profundidad de carbonatación se expusieron 24 especímenes prismáticos de 100 mm x 100 mm x 400 mm. Como se aprecia en la figura 37.

Figura 37*. Especímenes de concreto, expuestos a 4% de CO2 en una cámara de carbonatación acelerada al 60% HR. 1.- Probetas para determinar EIS y RP, 2.- Probetas para determinar profundidad de carbonatación.*

4.1.3.3.2 Exposición a cloruros

Para observar el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión se sometieron 24 prismas rectangulares de 115 mm x 150 mm x 280 mm a ciclos de humedecimiento y secado, colocando la solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3.5% en la piscina de acrílico. Asimismo, para la obtención de los perfiles de cloruro, se sometieron 24 prismas rectangulares de 75 mm x 75 mm x 300 mm a ciclos de humedecimiento y secado, colocando la solución de NaCl al 3.5% en la zona de la piscina. Y, por último, para determinar el umbral de cloruros, se sometieron los especímenes cilíndricos de 75 mm x 150 mm a inmersión constante en una cubeta con la solución de cloruro de sodio al 3.5%. en la figura 38 se muestran los especímenes bajo las condiciones.

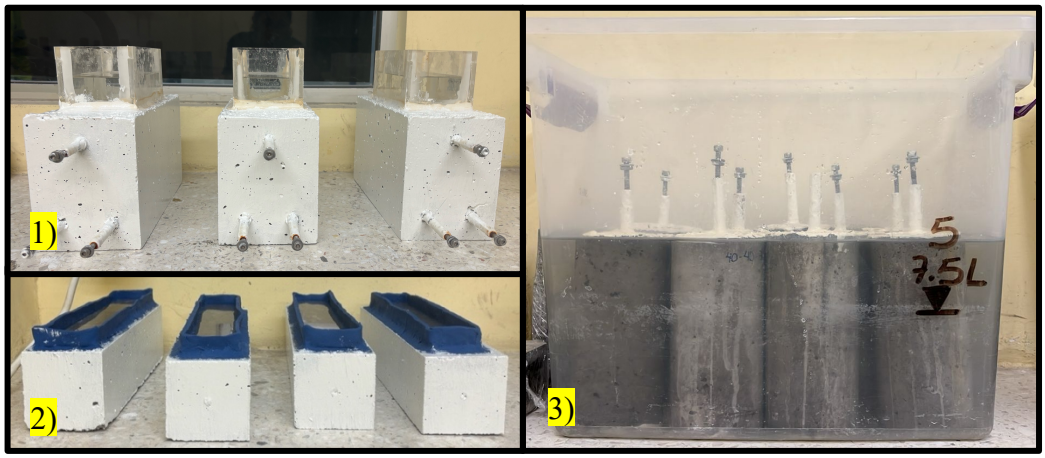


***Figura 38**. Especímenes bajo exposición de cloruros 3.5% NaCl. 1.- Probetas para determinar EIS y RP, 2.- Probetas para determinar perfil de cloruros, 3.- Probetas para determinar el umbral de cloruros.*

4.1.4 FASE 3.- Pruebas en estado fresco del concreto

4.1.4.1 Tiempos de fraguado en concreto

Debido a la composición química de las adiciones naturales, la tendencia que se reportó en investigaciones previas y mencionada en la sección 1.3 de este trabajo es que suelen retrasar el tiempo de fraguado, por consiguiente, es una propiedad importante de medir. Se siguió la normativa ASTM C 403, en donde se estipula que se harán tres especímenes por mezcla de una misma bachada, la primera lectura para un concreto convencional bajo condiciones de laboratorio con temperatura de 20 ºC a 25 ºC, se puede comenzar a tomar a partir de las 3 o 4 horas en donde el cemento entró en contacto con el agua y posteriormente se tomarán en intervalos de ½ h – 1 h; al menos 6 lecturas de penetración hasta que se registre una resistencia a la penetración ≥ 4000 psi (27.6 MPa). El tiempo de fraguado inicial se obtiene con una resistencia a la penetración de 500 psi (3.45 MPa), mientras que el tiempo de fraguado final a 4000 psi (27.6 MPa). En la figura 39 se observa la huella que dejan las agujas con diferente diámetro (AG1-6) al penetrar el mortero.

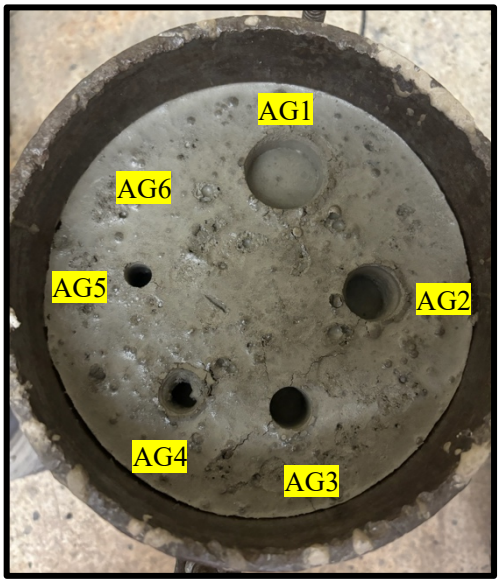


***Figura 39**. Toma de lecturas para determinar el tiempo de fraguado en morteros de concreto.*

4.1.4.2 Revenimiento

La prueba de revenimiento es esencial para evaluar un concreto, ya que es un indicador de la trabajabilidad de la mezcla, lo cual se relaciona con la fácil colocación y aplicación en el campo de la construcción. Por lo tanto, para realizar este procedimiento, se siguieron los requisitos estipulados en la normativa ASTM 143 para cada una de las 8 mezclas del diseño experimental. En la figura 40 se ilustra la toma de medición en una prueba de revenimiento.

***Figura 40**. Medición de revenimiento de las mezclas de concreto.*

4.1.4.3 Contenido de aire

Según la ASTM C 231 se puede determinar el contenido de aire mediante tres métodos; método volumétrico, de presión y gravimétrico. En donde el primero de estos aplica para agregados densos, ligeros y porosos, el segundo aplica solamente para agregados densos y el gravimétrico aplica para todo tipo de agregados. En este proyecto la determinación del contenido de aire de las mezclas de concreto se realizó por el método gravimétrico estipulado en la norma ASTM C 138, con la aplicación de la siguiente ecuación:

$$A = \left(\frac{T - D}{T}\right) * 100 \tag{16}$$

En donde "A" representa el contenido de aire (% de vacíos) en el concreto, "T" es la densidad teórica basada en concreto "libre de aire", y "D" representa la densidad real (unidad de peso) del concreto. La densidad teórica se obtiene a partir del diseño (proporcionamiento) de cada mezcla de concreto por medio del método de volúmenes absolutos, mientras que la densidad real es aquella que se mide en laboratorio teniendo una masa conocida en un volumen conocido.

4.1.5 FASE 4.- Pruebas en estado endurecido del concreto

4.1.5.1 Resistencia a la compresión

Para monitorear el desarrollo de la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto, se fabricaron cilindros estándar con dimensiones descritas en el apartado 4.1.3.1.1, los cuales fueron sometidos a ensayes mecánicos conforme a lo indicado en la norma ASTM C 39, midiendo a edades de 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días con una resistencia a la compresión objetivo de 330 kgf/cm^2. Para cada edad de ensaye se consideraron 3 especímenes curados durante 28 días bajo condiciones estándar. En la figura 41 se ejemplifica el ensaye de estos especímenes. Se fabricaron un total de 144 cilindros entre todas las mezclas.

Figura 41. *Ensaye de cilindros a compresión ASTM C 39.*

4.1.5.2 Resistividad

4.1.5.2.1 Resistividad Bruta (Bulk)

Para las mediciones de resistividad bruta se siguió el protocolo que indica la normativa española UNE 83988-1, en donde se emplearon cilindros estándar representados en el apartado 4.1.3.1.1. Los ensayes fueron realizados bajo condiciones de temperatura de 20 ºC ± 2 ºC y HR mayor al 45%, se tomaron lecturas cada 2 semanas durante 196 días dando un total de 15 lecturas de resistividad, los especímenes se encontraban saturados de agua al momento de tomar las lecturas. Para la realización de esta prueba se utilizaron los cilindros fabricados para resistencia a la compresión previos a ser ensayados, por consiguiente, cada lectura se realizó por triplicado. El equipo empleado fue un resistivímetro de la marca proceq con fuente de corriente alterna. En la figura 42 se muestra el ensamble del equipo para la toma de lectura.

Figura 42*. Medición de resistividad bruta en cilindros estándar.*

4.1.5.2.2 Resistividad Superficial (Wenner)

La medición de la resistividad superficial se efectuó bajo las mismas condiciones que se mencionaron anteriormente para resistividad superficial, la diferencia radica en el aparato para la medición de la resistividad, ya que en la normativa española UNE 83988-2 se establece que para la medición superficial se requiere un equipo de 4 puntas comúnmente conocido como aparato de Wenner, que induce la corriente. Para cada cilindro se marcaron líneas a 0º, 90º, 180º y 270º; en cada marca se tomó una lectura con el resistivímetro de la marca proceq, teniendo así 4 lecturas a lo largo de la circunferencia / superficie del cilindro. Cada mezcla constaba de 3 cilindros, por lo tanto, para 1 mezcla se tuvo el promedio de 12 lecturas de resistividad superficial. De igual manera que para la resistividad bulk, se tomaron lecturas cada 2 semanas durante 196 días, teniendo un total de 15 lecturas por mezcla. En la figura 43 se ilustra la toma de medición de resistividad superficial.

***Figura 43**. Medición de resistividad superficial en cilindros estándar.*

4.1.5.3 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

4.1.5.3.1 Especímenes expuestos a cloruros

La medición de impedancia electroquímica de las probetas expuestas a cloruros se llevó a cabo en una celda de tres electrodos (electrodo de trabajo, contraelectrodo y electrodo de referencia) representada en la figura 44, con un potenciostato Parstat MC. Las condiciones de análisis fueron las siguientes. Se empleó una frecuencia de inicio de 100,000 Hz y una frecuencia de término de 0.1 Hz, teniendo un total de 61 puntos. Se usó la gráfica de Nyquist. Todo de acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM G 106. Las probetas prismáticas representadas en la sección 4.1.3.1.2. (figura 29) se expusieron

durante 180 días después del periodo de curado de 28 días a ciclos de humedecimiento y secado, en donde 1 semana se encontraban expuestos a la solución de 3.5% de NaCl, y 1 semana de secado, las mediciones se realizaban el último día de secado / primer día de la siguiente exposición. Además, se monitoreo el comportamiento de la varilla durante el periodo de 28 días de curado.

Por cada mezcla se realizaron 3 especímenes, obteniendo un total de 24 prismas sometidos a exposición de cloruros, se monitoreo por 196 días el comportamiento electroquímico (28 días de curado estándar y 180 de exposición a cloruros), teniendo un total de 15 ciclos, por consiguiente 15 lecturas de monitoreo.

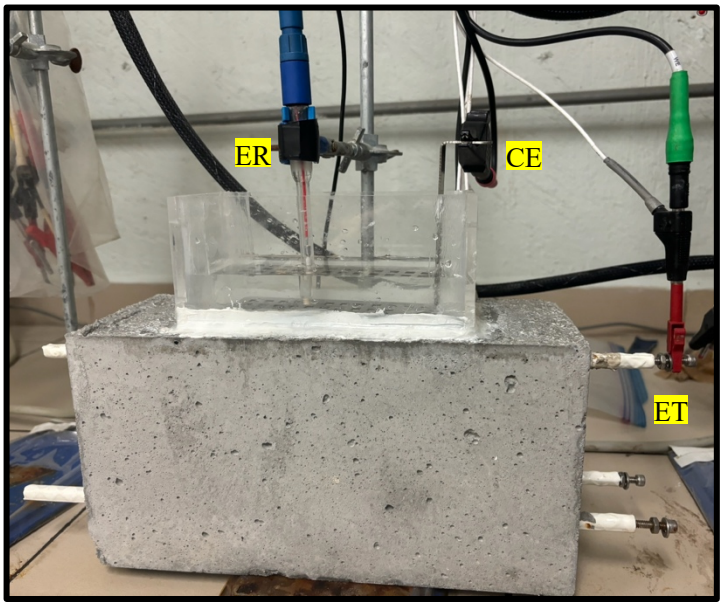


Figura 44. *Espécimen para pruebas de EIS y RP, monitoreado durante el período de 28 días de curado, previo a exposición de cloruros. ER: Electrodo de referencia, CE: Contra electrodo, ET: Electrodo de Trabajo*

En la figura 44 se muestra la instrumentación de una celda de tres electrodos, en donde el electrodo de referencia (ER) es un electrodo de calomel saturado (ECS), como contra electrodo (CE) se utilizó una malla de acero inoxidable que cubría toda el área de exposición superficial del espécimen, y como electrodo de trabajo (ET) se tenía la varilla de acero 3/8” de la cama superior.

4.1.5.3.2 Especímenes expuestos a CO_2

Con respecto a las probetas expuestas en la cámara de carbonatación acelerada, también se ejecutaron las mediciones con un potenciostato de la marca Parstat MC en un arreglo de tres electrodos, como se muestra en la figura 45. Los especímenes empleados fueron los mencionados en el apartado 4.1.3.1.3 en la figura 32, las condiciones de análisis son exactamente las mismas, mencionadas con anterioridad en el apartado 4.1.5.3.1. Las probetas cilíndricas después del periodo de curado estándar de 28 días se expusieron durante 180 días a un ambiente rico del 4% CO_2. Las mediciones se realizaron cada 2 semanas, en el catorceavo día, bajo condiciones de saturación con el objetivo de garantizar homogeneidad en toda la superficie expuesta y evitar variaciones en las mediciones por factores como aire, humedad, etc.

Por cada mezcla se realizó el triplicado de especímenes con la finalidad de tener datos representativos, teniendo así 24 probetas cilíndricas, sometidas a la exposición con dióxido de carbono, monitoreadas electroquímicamente por 196 días con la técnica de EIS, 28 días fueron monitoreadas bajo los efectos del curado estándar y los 180 restantes bajo la exposición.

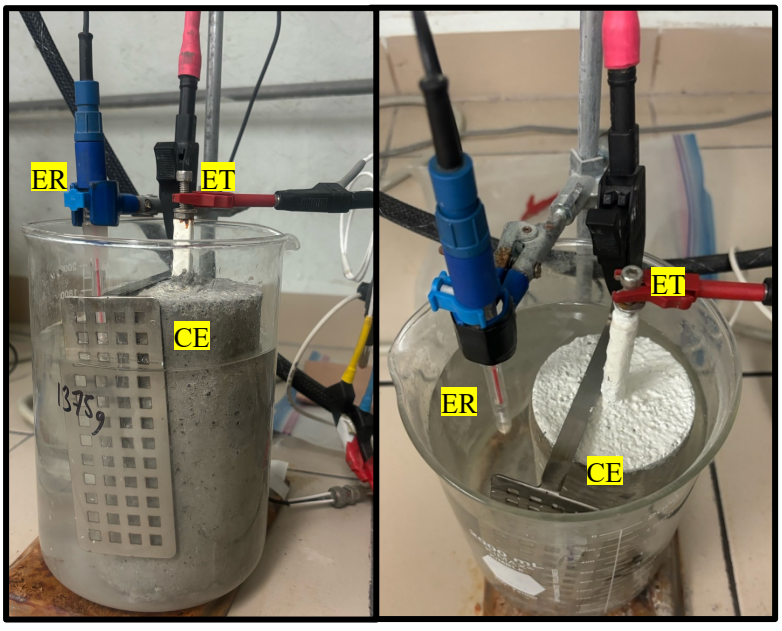


***Figura 45**. Espécimen para pruebas de EIS y RP monitoreado durante exposición a CO_2. ER: Electrodo de referencia (ECS), ET: Electrodo de trabajo (VR #3), CE: Contra electrodo (malla de acero inoxidable).*

4.1.5.4 Resistencia a la polarización lineal (RPL)

4.1.5.4.1 Especímenes expuestos a cloruros

Para la medición de resistencia a la polarización lineal, se empleó un potenciostato de la marca Parstat MC, en donde se siguió la normativa ASTM G 59, se empleó un sobre potencial entre 10-20 mV aproximadamente con toma de datos a 0.6 s, dando un total de 401 puntos. El arreglo fue una celda de tres electrodos mostrada en la figura 44. Los especímenes evaluados fueron prismas rectangulares como los mostrados en la figura 29, sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, donde una semana se encontraban expuestos a la solución de cloruros y una semana en periodo de secado, las mediciones se realizaban en el último día de secado / primer día del próximo ciclo de exposición. Monitoreando durante 196 días (considerando los 28 días de curado y los 180 de exposición a cloruros), teniendo así un total de 15 ciclos.

4.1.5.4.2 Especímenes expuestos a CO_2

Las mediciones de resistencia a la polarización lineal se realizaron de la misma forma y bajo las mismas condiciones que para las probetas expuestas a cloruros, solamente cambio el espécimen de prueba, el cual es exactamente el misma que se representa en la figura 45. La configuración de los especímenes cilíndricos se ilustra en la figura 32, los cuales fueron sometidos a carbonatación acelerada en un ambiente de 4% de CO_2, y evaluados en el periodo de curado (28 días) y exposición (180 días), tomando las lecturas cada 2 semanas en el catorceavo día.

4.1.5.5 Contenido de cloruros

Para la determinación del contenido de cloruros se realizó un monitoreo del avance del perfil de cloruros durante el periodo de exposición de 180 días, seleccionando 3 edades clave; la primera a 56 días, la segunda a 90 días y la última a 180 días. La configuración de las probetas empleadas en este análisis se muestra en la figura 30. Para poder determinar el contenido de cloruros totales y libres, es necesario extraer muestras de polvos a distintas profundidades. Las propuestas en esta investigación fueron a 10 mm, 20 mm, 25 mm (ubicación del acero de refuerzo) y 35 mm. Las muestras para dichos análisis se obtuvieron al cortar el prisma rectangular original de 75 mm x 75 mm x 300 mm, en

secciones de 75 mm x 75 mm x 50 mm, para proceder con el desbaste de las caras laterales a las 4 profundidades antes mencionadas y obtener al menos 25 g de polvo molido y homogéneo. En la figura 46 se representa este procedimiento.

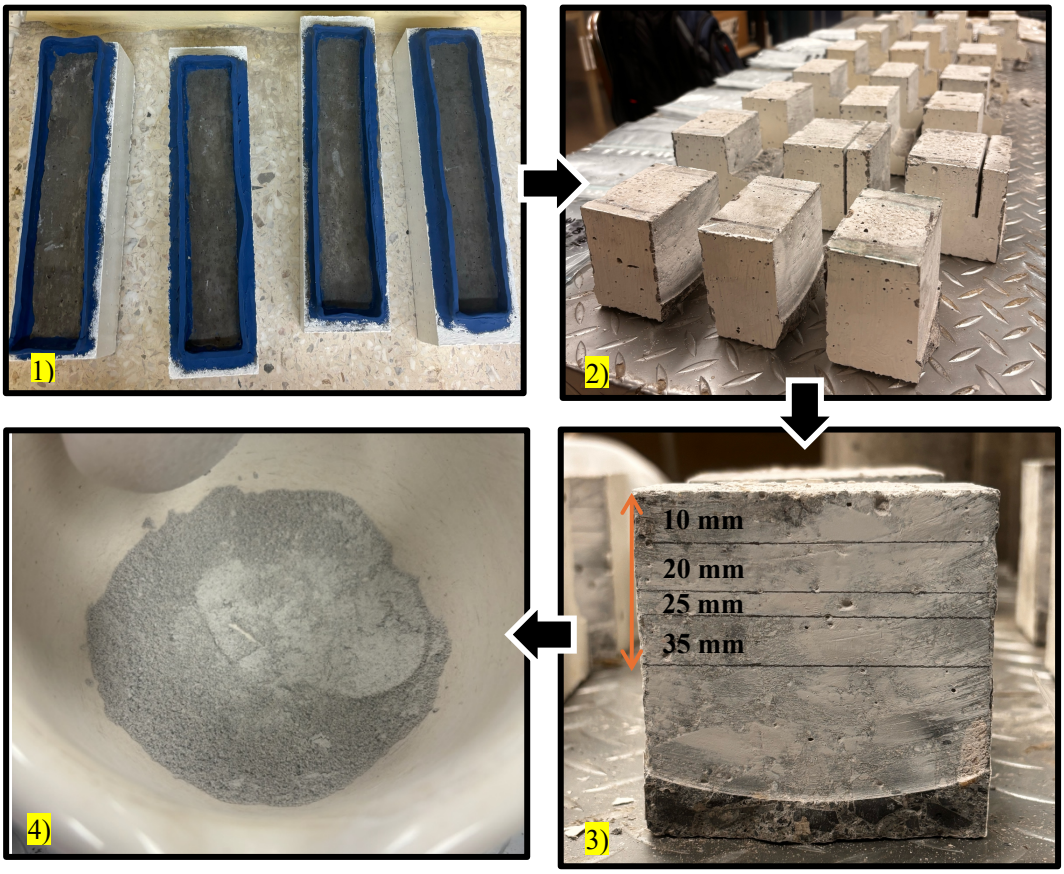


***Figura 46**. Procedimiento de obtención de polvos para análisis de cloruros totales y libres. 1.- Espécimen original para obtención de cloruros, 75 mm x 75 mm x 300 mm; 2.- Sección de 75 mm x 75 mm x 50 mm por edad; 3.- Corte a 4 profundidades (10 mm, 20mm, 25 mm y 35 mm) para obtención de rodajas; 4.- Molienda y trituración para la obtención de polvo homogéneo para análisis.*

La obtención de los polvos se realizó para cada una de las mezclas por triplicado, teniendo, 24 prismas y obteniendo secciones para tres edades (56, 90 y 180 días) por cuatro profundidades (10, 20, 25 y 35 mm), da un total de 288 muestras por analizar para cloruros totales y libres. De los 25 g de polvo recolectados 10 g se emplearán para la determinación de cloruros totales y 10 g para la de cloruros libres.

4.1.5.5.1 Cloruros totales

Para la determinación de los cloruros totales se empleó la técnica de caracterización de FRX descrita en el apartado 4.1.2.1.1; se fabricaron 288 pastillas como se muestran en la figura 21, con 10 g de material por analizar y 1 g de cera inerte. La cantidad de cloruros totales era necesaria para determinar el perfil de cloruros para cada mezcla, el cual se mostrará en el capítulo de resultados.

4.1.5.5.2 Cloruros libres

Los cloruros libres son solubles en agua, por lo tanto, la determinación se realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM C 1218, se pesaron 10 g de muestra en polvo, a la cual se le adicionaron 50 mL de agua destilada, en un vaso de precipitado de 250 mL se dejó hervir por 5 minutos para proceder a reposar la muestra 24 hr. Posteriormente se filtró por succión con una bomba de vacío, a la muestra filtrada se le adicionaron 3 mL de ácido nítrico (1:1) y 3 mL de peróxido de hidrógeno al 30%, se deja reposar de 1 a 2 minutos la solución para proceder a calentar hasta la ebullición por algunos segundos. Finalmente, la muestra se encuentra lista para proceder con la titulación, para esto se empleó un titulador potenciométrico de la marca Metrohm Titrino Plus con una solución estándar de nitrato de plata al 0.05 N. En la figura 47 se muestra el procedimiento para la determinación de los cloruros libres.

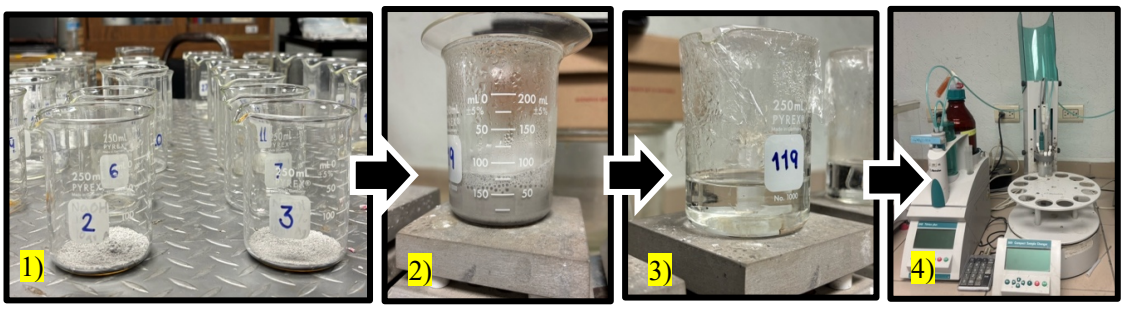


Figura 47. *Procedimiento para titulación de cloruros libres. 1.- Preparación de muestras con agua destilada; 2.- Hervir por 5 minutos las muestras y dejar reposar 24 h; 3.- Hervir solución filtrada con ácido nítrico y peróxido y dejar reposar, 4.- Titulación con potenciómetro.*

El procedimiento ilustrado previamente en la figura 47 se realizó para cada uno de los 288 polvos extraídos, y así poder obtener los cloruros fijados con la capacidad de fijación de cada mezcla.

4.1.5.5.3 Umbral de cloruros

Era necesario conocer la cantidad de cloruros que provocaría el rompimiento de la capa pasiva del acero de refuerzo, por lo tanto, los especímenes empleados fueron los representados en la figura 31, los cuales fueron sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, donde una semana permanecían inmersos en la solución de 3.5% de NaCl y una semana de secado, se realizaron mediciones de resistencia a la polarización (RP) e impedancia electroquímica (EIS) para monitorear el punto exacto en donde ocurría la despascivación, se tiene como criterio que una corrosión activa se presenta en una velocidad de corrosión entre a 0.1 – 0.2 $\mu A/cm^2$. Una vez activada la barra de refuerzo se detuvo el proceso de exposición acelerada de cloruros y se procedió a romper las probetas, para cuidadosamente extraer 10 g de muestra de la interfaz acero – concreto y proceder a un análisis de FRX para obtener el porcentaje de cloruros totales que activan la barra de refuerzo. Por cada mezcla de concreto se realizaron dos probetas para obtener el resultado por duplicado, teniendo así un total de 16 especímenes para umbral de cloruros. En la figura 48 se ilustra el procedimiento realizado.

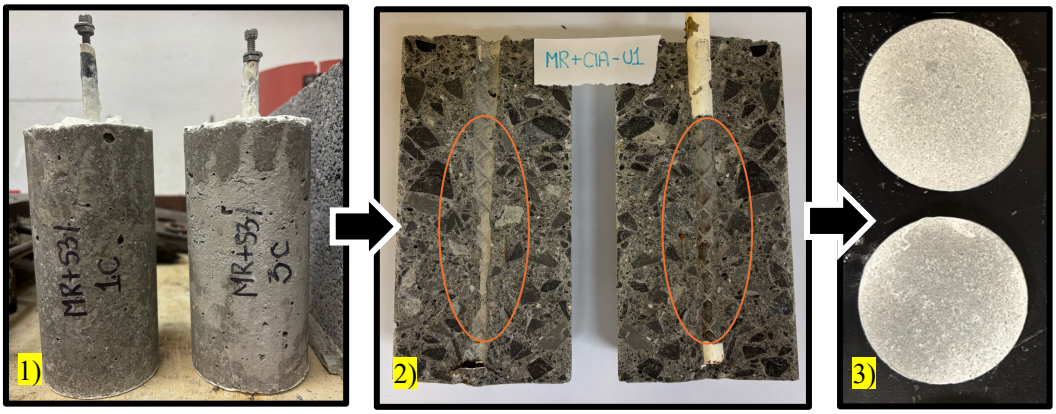


Figura 48. *Procedimiento para determinar el umbral de cloruros. 1.- Rompimiento de probetas cilíndricas; 2.- Recolección de polvos en la interfaz acero-concreto; 3.- Elaboración de pastillas de FRX para determinación de contenido total de cloruros.*

4.1.5.6 Profundidad de carbonatación

El seguimiento de la profundidad de carbonatación se llevó a cabo durante los 180 días de exposición, se realizaron mediciones a tres edades 56, 90 y 180 días, Del espécimen de concreto original de 100 mm x 100 mm x 400 mm (figura 33) se cortaron

rodajas de 100 mm x 100 mm x 50 mm, las cuales fueron rociadas con el indicador de fenolftaleína diluido en alcohol etílico. Se tomaron cuatro medidas por cada cara lateral con un vernier con precisión de 0.5 mm hasta el borde del perfil de carbonatación que se forme, tal como lo indica la normativa europea EN 13295. Por cada mezcla se fabricaron 3 especímenes, teniendo un total de 24 probetas para medición de carbonatación. En la imagen 49 se ilustra el seguimiento de la profundidad de carbonatación.

Figura 49. *Seguimiento de la profundidad de carbonatación en cortes frescos de concreto.*

4.1.5.7 Capacidad antioxidante

Para la medición de la capacidad antioxidante, se emplearon especímenes prismáticos de concreto como los que se muestran en la figura 28, por cada mezcla se elaboraron 3 especímenes. El primero se mantuvo bajo condiciones estándar de laboratorio sin ninguna exposición a una temperatura de 23 ºC ± 2 ºC con una HR de 65%, el segundo se expondría a una solución de 3.5% de cloruros y el tercer espécimen al 4% de CO_2. De cada uno de ellos se cortaron rodajas de 75 mm x 75 mm x 50 mm para hacer la extracción a una profundidad de 35 mm de 20 g de polvo para el posterior análisis mediante las pruebas de DPPH y ABTS.

El objetivo fue verificar si bajo los distintos ambientes de exposición (cloruros y CO_2) y teniendo un control, se mantenían los compuestos que proporcionan la capacidad antioxidante y a su vez el potencial de inhibición.

En la figura 50 se ilustra el procedimiento de la extracción de polvos para el análisis de la capacidad antioxidante.

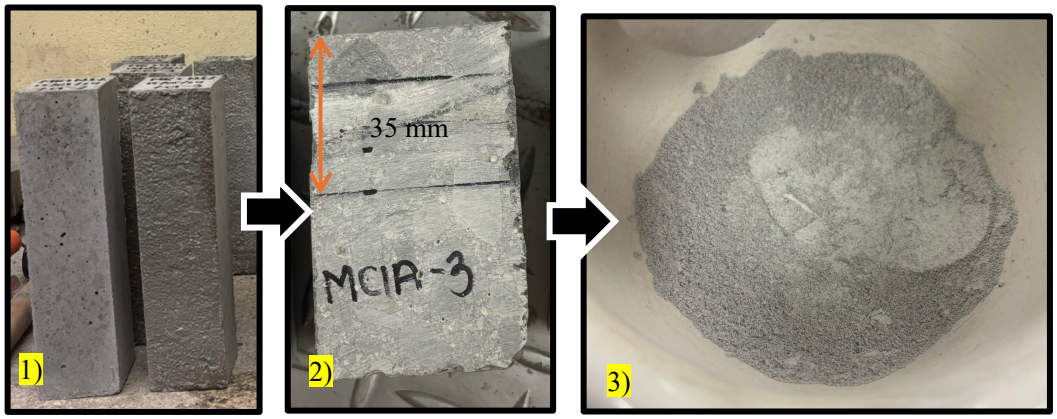


***Figura 50**. Procedimiento de obtención de polvos para análisis de capacidad antioxidante DPPH y ABTS. 1.- Probeta de Control, probeta sometida a cloruros y probeta sometida a carbonatación; 2.- Corte de sección 75 mm x 75 mm x 50 mm, con extracción de 20 g de polvo a 35 mm de profundidad; 3.- Molienda y homogenizado de polvos para análisis de capacidad antioxidante.*

Concluida la fase de explicación sobre cada prueba realizada, la metodología aplicada y las normativas que se siguieron, a continuación, en el capítulo 5 se expondrán los resultados obtenidos durante la resolución de la fase experimental.

CAPÍTULO 5

5.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1.1 FASE 1.- Caracterización de materiales

5.1.1.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

En la comparación química que se muestra en la tabla 12 del CPC 40 y los materiales naturales antioxidantes se observó que cumplen con las especificaciones que se establecen en la normativa ASTM C 150. Para el CaO, SiO_2 y K_2O no se indica un límite permitido; sin embargo, el contenido se encuentra dentro de los valores típicos siendo un 60% para el óxido de calcio y un 20% para el dióxido de sílice aproximadamente. Siguiendo con el Al_2O_3, Fe_2O_3 y MgO se permite máximo un 6% de cada uno, por lo tanto, los tres materiales cumplen con ese parámetro. Finalmente, para el SO_3, se establece un máximo del 3%, siendo el único valor que ninguno de los materiales cumple.

***Tabla 12**. Composición química de la materia prima.*

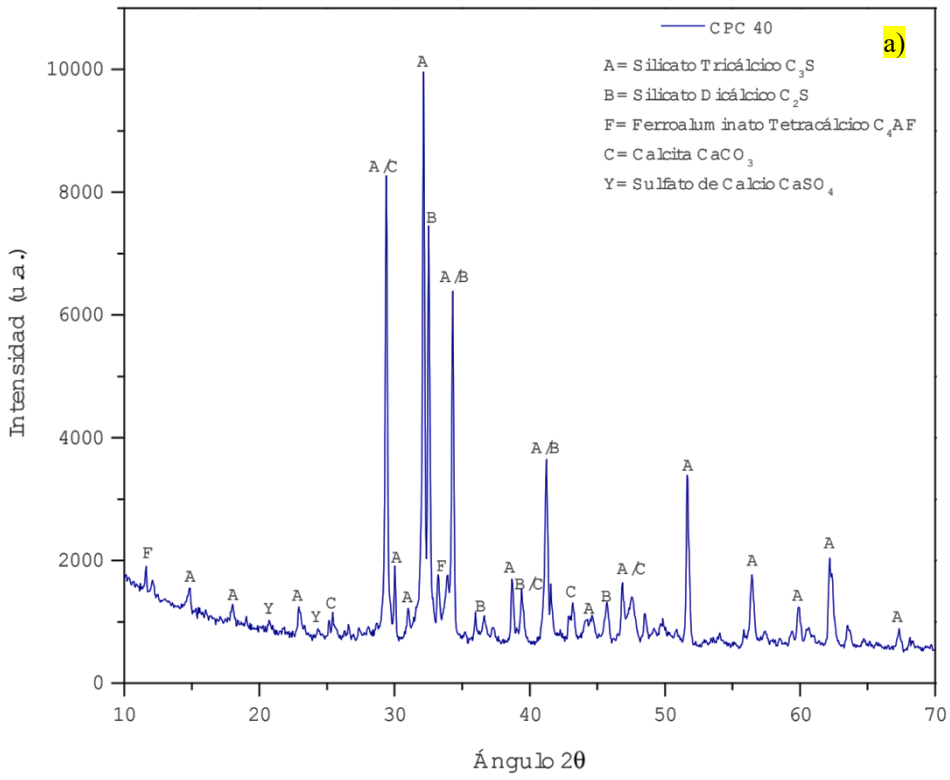
Material	Compuesto Químico (%)						
	CaO	**SiO_2**	**SO_3**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**K_2O**	**MgO**
CPC 40	71.515	14.732	5.126	3.454	2.435	1.026	0.939
Nopal	43.610	4.049	39.580	0.348	0.361	6.304	1.562
Sábila	37.515	2.094	6.818	3.862	1.509	34.102	1.121

Observando los resultados, el contenido de trióxido de azufre en el nopal es considerablemente alto, ya que conforma el 39.6% del material, sin embargo, la adición máxima de este material fue del 3%, lo que representa el 1.18% de SO_3 en la mezcla de concreto, lo cual podría ser casi despreciable. La importancia de revisar este contenido radica que si su contenido es excedido puede favorecer la corrosión por ataque de sulfatos, agrietamientos, etc.

5.1.1.2 Difracción de Rayos X (DRX)

En el difractograma del cemento CPC 40 (figura 51a) se pueden apreciar las fases comunes que surgen de la calcinación del Clinker, en donde el calcio se combina con otros compuestos y da paso a la formación de alita (C_3S), Belita (C_2S), Ferrita (C_4AF) y Calcita

($CaCO_3$). Durante la molienda se añade una fuente de sulfato de calcio ($CaSO_4$), con la finalidad de retardar el fraguado del cemento cuando entra en contacto con el agua [15]. En la figura 51b se muestra el difractograma del nopal en donde se observa la presencia de compuestos con estructura cristalina: oxalato de calcio monohidratado (Whewellita), sulfuro de hierro y mineral Diópsido. Los cristales de oxalato de calcio se forman dentro de una célula llamada idoblasto. Tienen como función principal la regulación o captación de los iones de Ca^{2+} para el mantenimiento del equilibrio iónico y pueden actuar como depósitos inertes para captar metales [43]. El sulfuro de hierro es un mineral magnético conocido como pirrotina, componente común de las rocas ígneas. El diópsido es un mineral de calcio y magnesio perteneciente al grupo de los piroxenos que son silicatos de cadena simple [44] . Por último, en el difractograma de la sábila figura 51c, se muestra que tiene compuestos cristalinos como los aminoácidos, que son moléculas orgánicas que participan en la síntesis de otros compuestos orgánicos como las proteínas, aminas, alcaloides, vitaminas, enzimas y terpenoides [45]. La Nitroanilina es un derivado de la anilina, que consiste en un compuesto orgánico del grupo fenilo unido a un grupo amino. Se usa comúnmente en la síntesis de colorantes, antioxidantes, aditivos de combustibles, inhibidores de corrosión y productos farmacéuticos [46].



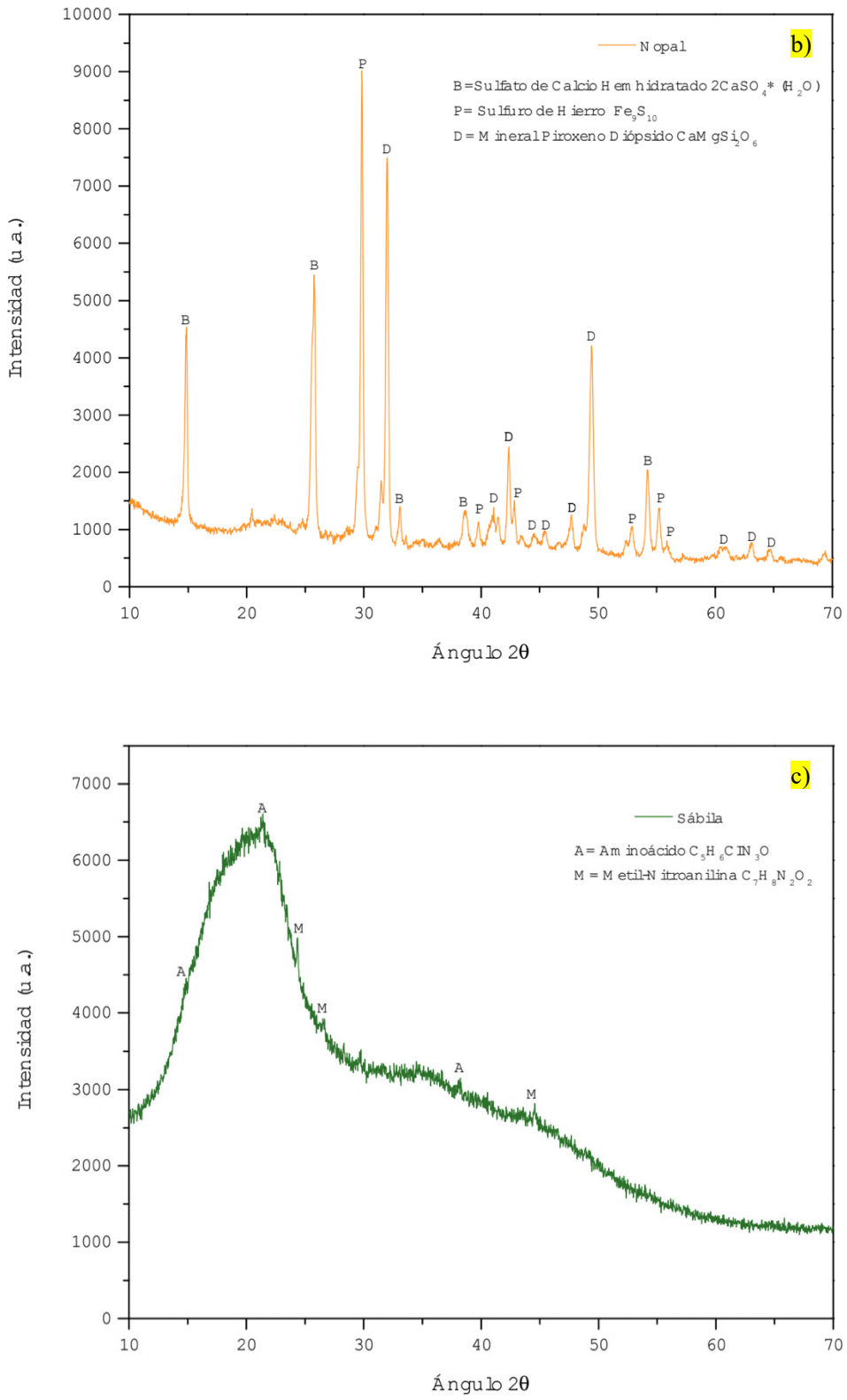


Figura 51. *Difractogramas de la materia prima. a) CPC 40; b) Nopal deshidratado; c) Sábila deshidratada.*

5.1.1.3 Análisis Termogravimétricos (TGA)

Analizando los datos obtenidos en la figura 52 se tiene que el CPC 40 tuvo una pérdida de masa del 1.07%, que, con respecto a los materiales naturales, se considera casi despreciable. Por su parte el nopal presentó una pérdida total de 51.56% y la sábila perdió el 93.19% de su masa. Dentro de la gráfica se identificaron 3 zonas importantes para los materiales orgánicos. Comenzando con el nopal, la primera zona se presentó en el rango de 22 a 214 ºC, donde el incremento de la temperatura causo la pérdida de masa del 11.23% correspondiente a la presencia de agua / humedad. La segunda zona comienza en la región de 214 a 304 ºC, donde se tuvo una pérdida de masa del 30.38% atribuida a la descomposición de la celulosa y hemicelulosa, y por último en la tercera zona que abarca de los 304 a 578 ºC el nopal perdió el 50.42% de su masa, esto debido a la degradación de la lignina que tenga presente. La materia prima restante correspondió a impurezas en el material [47]. En el caso de la sábila fue el material que presentó mayor pérdida de masa también distribuidas en tres zonas. La primera zona se encontró dentro del rango de 22 a 201ºC donde se perdió el 10.39%, lo cual se debe a la pérdida de agua o humedad presente. El 55.81% de la masa se perdió por la degradación de la glicerina, las interacciones con el grupo de hidroxilos, y la pérdida de colágeno en la segunda zona ubicada en el rango de 201 a 308 ºC y por último en la tercera zona de 308 a 602 ºC se pierde el 92.64% de la masa en donde la hemicelulosa, celulosa, lignina y los azucares terminan por degradarse [48].

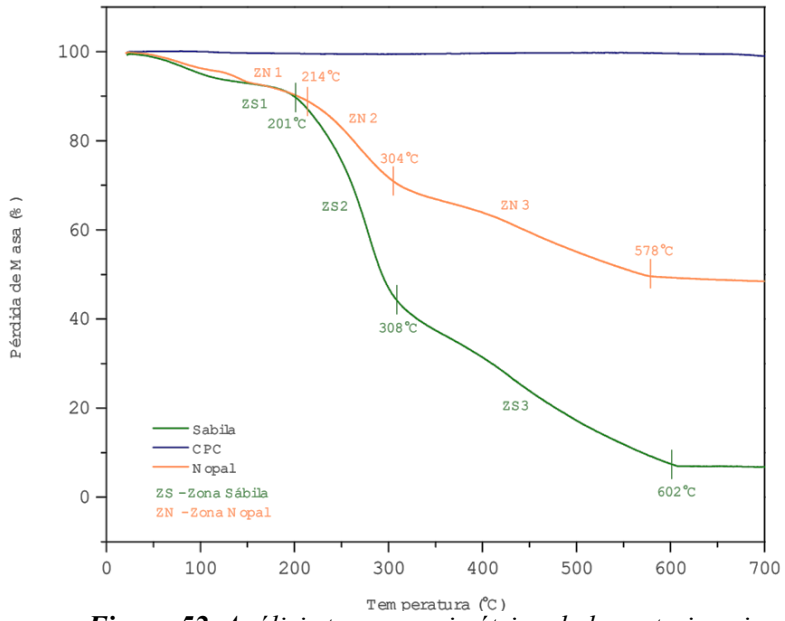


***Figura 52**. Análisis termogravimétrico de la materia prima.*

5.1.1.4 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Con la finalidad de conocer la morfología de la materia prima empleada para la elaboración de las mezclas de concreto, se obtuvieron micrografías a diferentes magnificaciones mencionadas en el apartado 4.1.2.1.4, para la discusión de los resultados en la figura 53 se muestran las imágenes a una magnificación de 300x. Primeramente, el CPC 40 (figura 53a) mostró partículas cristalinas irregulares con un tamaño aproximado entre 10 y 15 µm. Por otro lado, el nopal deshidratado en la figura 53b presentó diversas morfologías, dentro de las cuales están partículas rugosas semiesféricas, fibrosas y laminares con tamaños de partículas aproximados de 24, 40 y 150 µm respectivamente. Esta variación de formas se debe al proceso de obtención del material, el cual involucra procedimientos mecánicos como la trituración y molienda. Por su parte, la sábila deshidratada en la figura 53c contiene partículas esféricas, tubulares y fibrosas. Las partículas esféricas presentaron tamaños dentro del rango de 10 a 70 µm, estas, generalmente se observan en materiales con propiedades puzolánicas. Para las partículas tubulares el tamaño rondo dentro de 50 y 150 µm, y para las fibrosas ~50 µm.

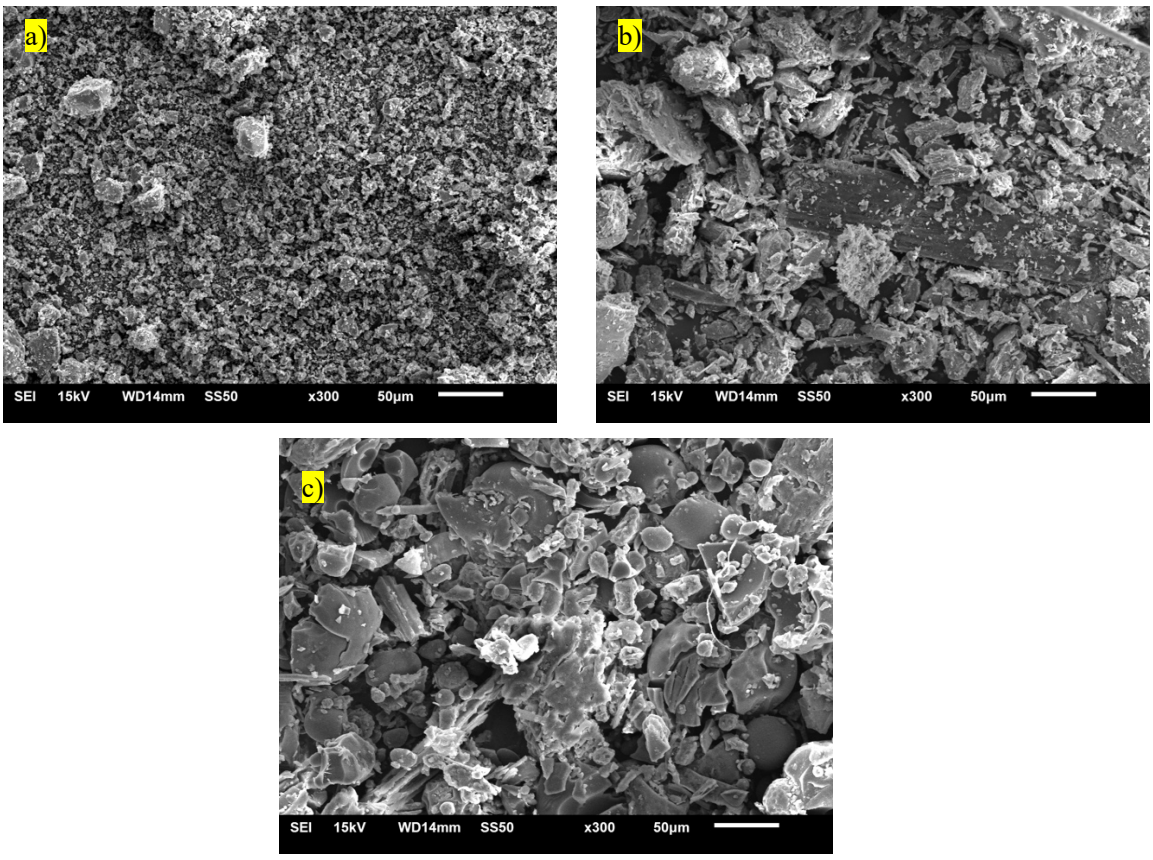


***Figura 53**. Morfología de la materia prima. a) CPC 40; b) Nopal deshidratado; c) Sábila deshidratada.*

5.1.1.5 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

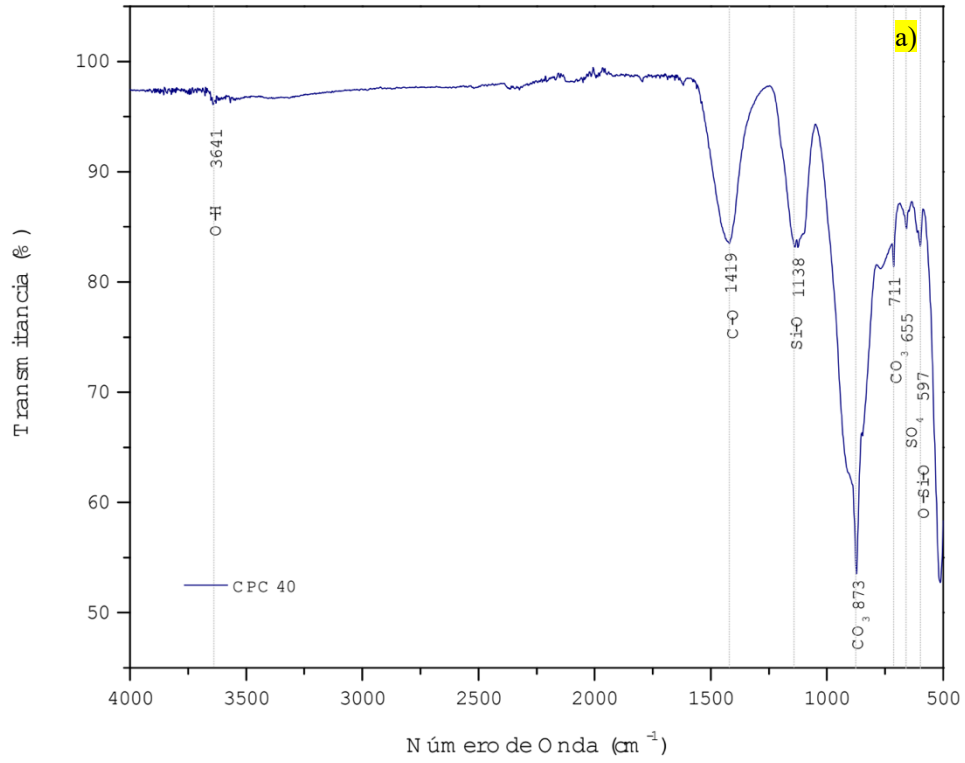
El uso de esta técnica permitió identificar la presencia de grupos funcionales característicos de las materias primas en polvo. En figura 54a, se encuentra el espectro de infrarrojo para el CPC 40. En la región de 3,600 a 3,200 cm^{-1} se tiene la señal de estiramiento correspondiente a los enlaces -OH asociados a las moléculas de hidroxilo. En comparativa con el nopal y la sábila, la intensidad de la onda no es tan significativa debido a que se encuentran en estado anhidro. La sábila y el nopal a pesar de ser deshidratados presentaron mayor intensidad en las bandas. Esto se puede atribuir a la humedad propia del ambiente. En las bandas 1,419, 873 y 711 cm^{-1} se tienen enlaces carbono – oxígeno debido a la presencia de fases minerales de carbonato presentes en el cemento, tales como la calcita ($CaCO_3$). De igual forma se presentan enlaces Si-O y O-Si-O en las bandas 1,138 y 597 cm^{-1}, respectivamente, correspondientes a las fases minerales de sílice propias del cemento como la alita y belita mostradas en el difractograma de la figura 51a. Por último, podemos observar en la banda 655 cm^{-1} el enlace SO_4 correspondiente a la fase mineral de sulfato de calcio.

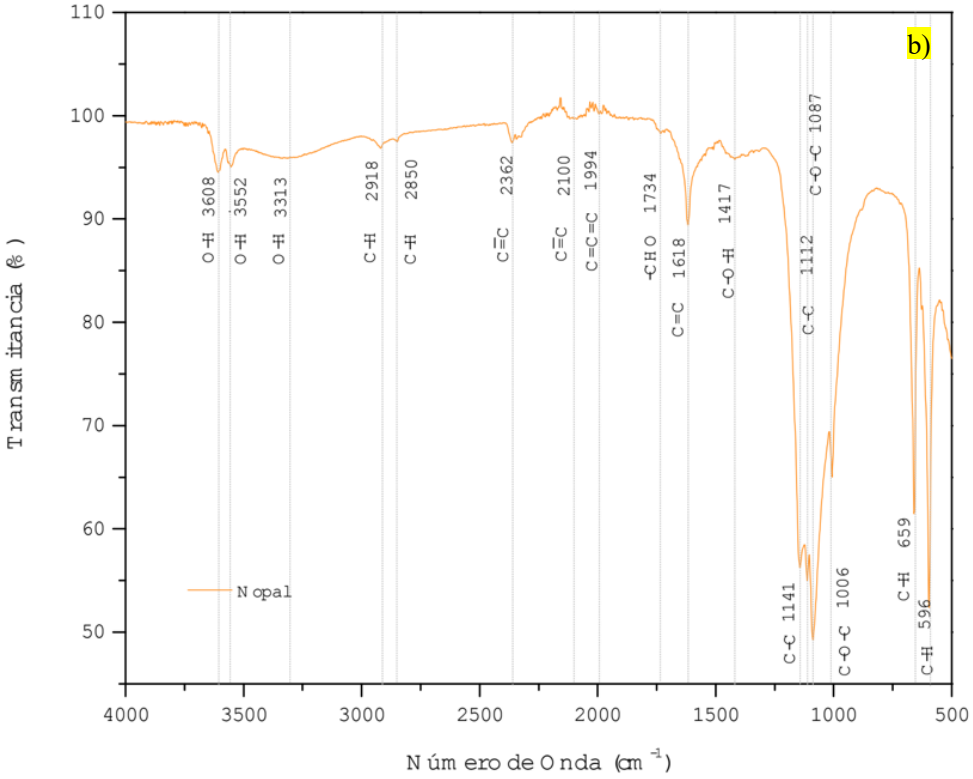
En la figura 54b se encuentra el espectro de infrarrojo para el nopal deshidratado. En la región de 2,930 a 2,850 cm^{-1} se tiene la señal de estiramiento correspondiente a los enlaces de C-H del grupo funcional de los alcanos, también conocidos como carbohidratos. Los enlaces triples C≡C se presentaron en la región de 2,365 a 2,100 cm^{-1} del grupo funcional de los hidrocarburos, específicamente de los alquinos. La señal reportada en 1,994 cm^{-1} pertenece al compuesto de hidrocarburos del grupo de los alcanos, como contiene 3 átomos de carbono se le conoce como propano C≡C≡C. Por otro lado, en el rango de 1,740 a 1,720 cm^{-1} se tienen aldehídos, pertenecientes al grupo funcional de los carbonilos -CHO, compuestos característicos de los azucares presentes en la materia orgánica. En el rango de los 1,400 y 1,440 cm^{-1} se tienen vibraciones de estiramiento asociadas con los ácidos carboxílicos C-O-H. Los ácidos carboxílicos reaccionan con bases para formar sales. En estas sales el hidrogeno del grupo OH se reemplaza con el ion de un metal, por ejemplo, Na^+. Los mismos enlaces se presentaron en el espectro de infrarrojo de la sábila (figura 54c). En la banda 1,618 cm^{-1} se presentaron hidrocarburos C≡C pertenecientes al grupo de los alquenos. En la región de la huella digital se

encuentran enlaces C-C dentro de las bandas 1,300 a 1,100 cm^{-1} atribuidos a las cetonas. Las bandas entre los 1,000 y 1,300 cm^{-1} son vibraciones de estiramiento C-O-C asociadas al grupo funcional de los éteres. Por último, en el rango de 785 a 540 cm^{-1} se observan haluros de alquilo C-H que son compuestos orgánicos derivados de un alcano, en el cual uno o varios hidrógenos han sido sustituidos por un halógeno (F, Cl, Br, I). En las moléculas orgánicas, la oxidación de un átomo de carbono se produce cuando un enlace carbono – hidrogeno (C-H) se sustituye por un enlace carbono – oxígeno (C-O). La reacción inversa sería la sustitución de un enlace carbono – oxígeno por un enlace carbono – hidrogeno en la reducción de ese átomo de carbono [49].

A su vez, en la figura 54c se tiene el espectro de infrarrojo para la sábila deshidratada. En el rango de 2,320 a 2,270 cm^{-1} se observa la presencia del compuesto orgánico de fosfinas P-H, proveniente del fósforo, el cual es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Similar al espectro del nopal se encontraron cetonas en la región de 1,700 a 1,730 cm^{-1} con enlaces de carbono – oxígeno. Entrando en la región de la huella digital, en la banda 1,635 cm^{-1} surge la presencia de las amidas N-H siendo sustancias con la propiedad de aceptar protones. Cualidad que tienen los compuestos antioxidantes. De la misma manera que en el espectro de infrarrojo para el nopal deshidratado, la sábila presentó bandas de estiramiento C-O-C y compuestos aromáticos como los haluros de alquilo C-H en los rangos 1,300 a 1,000 cm^{-1} y 990 a 540 cm^{-1} respectivamente.

Finalmente, en la figura 54d se tiene el espectro de infrarrojo para el aditivo inhibidor de la corrosión EUCON CIA. En el número de onda de 3350 cm^{-1} se observa la presencia del grupo funcional O-H asociado a las moléculas de hidroxilo del grupo de alcoholes, de la misma manera que para los compuestos naturales (sábila y nopal) se observa la presencia de un triple enlace de carbono – carbono, dentro del grupo de alquinos en la onda 2098 cm^{-1}. Así mismo dentro de la huella digital se observó la presencia de aminas / amidas (N-H) en el número de onda 1633 cm^{-1} y 1334 cm^{-1}. Por último, el aditivo presentó bandas de estiramiento C-O-C asociadas al grupo funcional de los éteres.


a)
Transmitância (%)
Número de Onda (cm⁻¹)
O-H 3641
C-O 1419
Si-O 1138
CO3 873
CO3 711
CO3 655
SO4 597
O-Si-O
CPC 40


b)
Transmitância (%)
Número de Onda (cm⁻¹)
O-H 3608
O-H 3552
O-H 3313
C-H 2918
C-H 2850
C≡C 2362
C≡C 2100
C=C=C 1994
-CHO 1734
C=C 1618
C-O-H 1417
C-C 1141
C-C 1112
C-O-C 1087
C-O-C 1006
C-H 659
C-H 596
Nopal

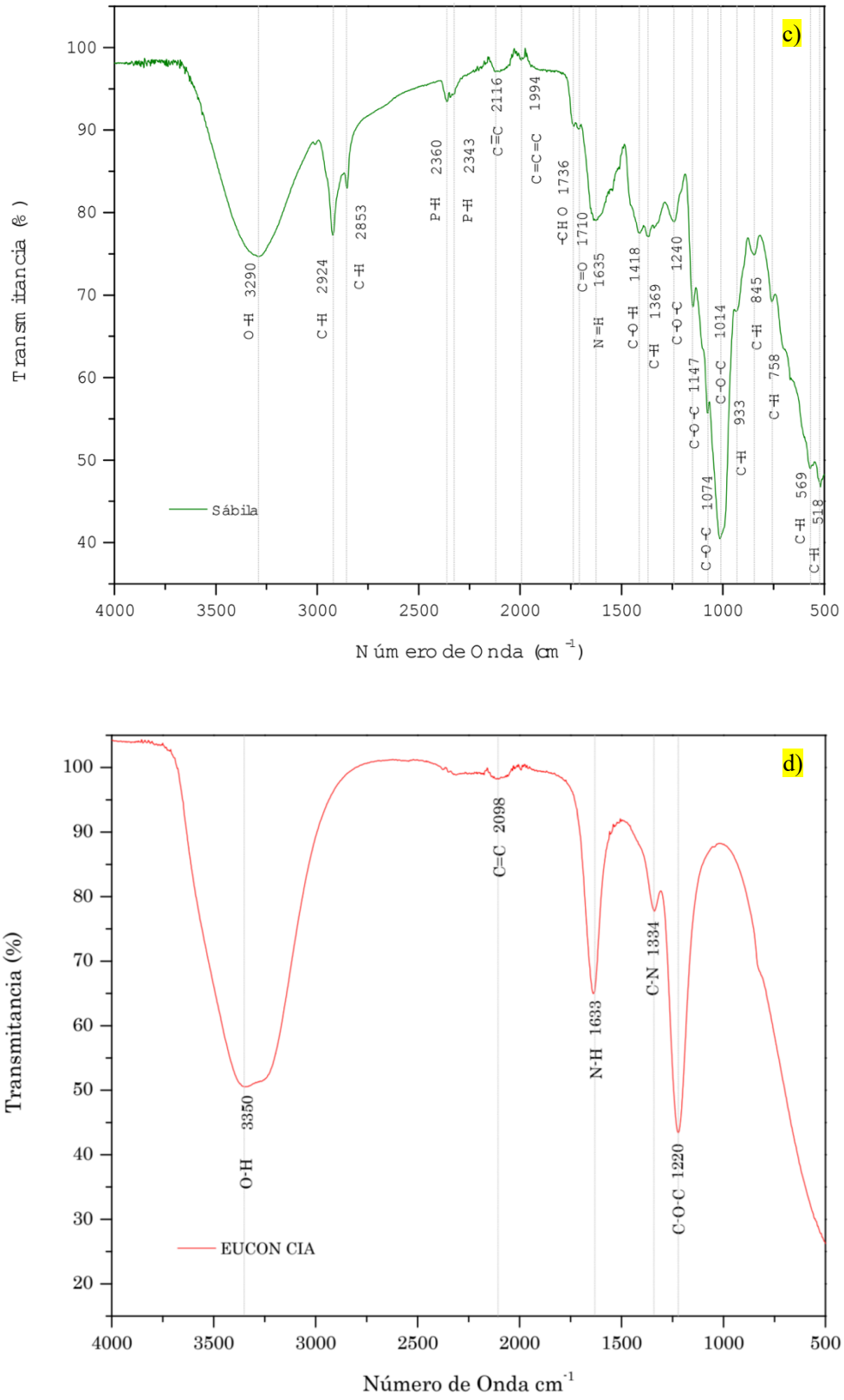


Figura 54. *Espectros de Infrarrojo para la materia prima. a) CPC 40; b) Nopal deshidratado; c) Sábila deshidratada; d) Aditivo inhibidor de la corrosión EUCON CIA.*

5.1.1.6 Capacidad antioxidante (DPPH y ABTS)

Para realizar comparaciones con otras investigaciones del porcentaje de captación de radicales libres, es necesario unificar unidades, utilizando usualmente el Trólox. Éste es un compuesto (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromo-2-ácido carboxílico) que debido a su alta capacidad antioxidante se emplea como compuesto de referencia principalmente para los métodos de DPPH y ABTS.

En la tabla 13 se puede observar que mediante el ensayo de ABTS se obtuvieron valores más altos que por medio del ensayo DPPH, lo cual concuerda con datos reportados [30]. Algunas de las razones que explican este hecho, se basan en la longitud de onda a la cual se realizaron las medidas para cada ensayo. Otra razón podría ser el mecanismo de reacción del DPPH con los antioxidantes, lo cual está directamente relacionado con la conformación estructural de los mismos.

Analizando los resultados obtenidos y comparando con algunos en la literatura [32], se puede observar que hay una diferencia significativa en las concentraciones de Trólox para el nopal y la sábila, algunas posibles explicaciones para este suceso podrían ser que el material analizado en esta investigación proviene de la penca de nopal pulverizada y deshidratada, mientras que para otros estudios se emplea el mucílago o el fruto (tuna). Aplica de la misma forma para la sábila, donde la mayoría de los estudios encontrados en la literatura emplean el mucílago [32] , mientras que en esta investigación se emplea la hoja de aloe vera pulverizada y deshidratada con un previo destellado.

En la tabla 13 se puede observar que para la muestra de CPC 40 el porcentaje de inhibición no fue detectado (N.D) debido a que de manera natural el cemento no contiene ningún compuesto que le provea capacidad antioxidante, a diferencia del nopal y la sábila que tienen 94.2 y 91.8% de inhibición respectivamente. Las mezclas de pastas de cemento con nopal (3%) y sábila (3%) tenían una edad de 14 días al momento de la evaluación. Se puede apreciar que de tener un 0% de inhibición, con las adiciones de nopal y sábila, el cemento pasó a tener un 70.3% y 62.1% de inhibición respectivamente con el método de ABTS.

Tabla 13. *Capacidad antioxidante de los materiales y las pastas de cemento.*

Método	Muestra	% Inhibición	Concentración Equivalente Trólox (μM/g muestra)
ABTS	C	N.D	N.D
	N	94.2 ± 7.0	675.6 ± 55.7
	S	91.8 ± 5.7	656.3 ± 45.0
	C+N3%	70.3 ± 1.5	324.6 ± 7.7
	C+S3%	62.1 ± 4.3	281.7 ± 22.4
DPPH	C	N.D	N.D
	N	23.7 ± 3.7	74.5 ± 16.3
	S	9.0 ± 1.6	9.0 ± 6.9
	C+N3%	17.2 ± 2.1	30.2 ± 6.3
	C+S3%	8.6 ± 1.0	4.9 ± 3.0

C: CPC 40; N: nopal; S: sábila; C+N3%: CPC 40 + 3%Nopal; C+S3%: CPC 40 + 3%Sábila

Sin embargo, se puede notar que presentan una considerable concentración de compuestos antioxidantes; en el nopal, los principales constituyentes a los que se les atribuye esta capacidad son: la vitamina C (ácido ascórbico), vitamina E (α-tocoferol), carotenoides, flavonoides y ácidos fenólicos. Por otro lado, dentro de la sábila los que confieren esta capacidad son los compuestos fenólicos (cromonas, aloesina y antraquinonas), ácidos orgánicos, aminoácidos y vitaminas E y C [50]. Cabe destacar que esta información coincide con los análisis previos de los difractogramas mostrados en la figura 51b y 51c, así como en los espectros de infrarrojo mostrados en la figura 54b y 54c.

5.1.1.7 Densidad y Absorción

Se realizó la caracterización física y química de los materiales empleados en el proporcionamiento de los diferentes diseños de mezclas. A continuación, en la tabla 14 se muestran las propiedades analizadas junto con los resultados obtenidos.

Se puede observar que la densidad y absorción del nopal deshidratado que se obtuvo se encuentra cerca de los rangos que han obtenido otros autores [51]. Así como la de la sábila en el artículo de [32]. Cabe mencionar que si existen diferencias es por las propiedades del material que se analizó, siendo polvo deshidratado.

La humedad de obra (HO) determinada previo a realizar las mezclas que presentaron el nopal y la sábila fue en porcentajes elevados, lo cual concuerda con los análisis de FTIR, donde se muestran grupos funcionales de hidroxilo.

***Tabla 14**. Propiedades de los materiales empleados en las mezclas de concreto.*

Material	Densidad (g/cm^3)	Absorción (%)	PVVS (g/cm^3)	M.F.	Contenido de sólidos (%)	HO (%)
CPC 40	3.07	–	–	–	–	–
Nopal	1.79	1.68	–	–	–	8.89
Sábila	1.43	0.38	–	–	–	8.11
AG 3/4”	2.41	0.66	1.51	–	–	0.06
AF # 4	2.72	1.69	–	3.16	–	0.18
Eucon CIA	1.27	–	–	–	0.50	–
Flowcon P01	1.11	–	–	–	0.50	–
Accelguard TGD	1.60	–	–	–	0.68	–

5.1.2 FASE 2.- Diseño experimental

De acuerdo con lo planteado en el apartado 4.1.3. se fijó una relación a/c = 0.50 con un consumo de 330 kg/m^3 para las ocho mezclas de concreto establecidas en la experimentación. Se diseñó considerando que 1 kg de cemento aportaría 1 kgf de resistencia, con base en el método de volúmenes absolutos, considerando el peso seco de los materiales. Cabe mencionar que los materiales naturales se trabajaron como adición con respecto al peso seco del cemento, por lo tanto, los ajustes para 1 m^3, se realizaron con respecto al volumen de la arena #4. En la tabla 15 se pueden observar los proporcionamientos empleados para la ejecución de este proyecto.

La ficha técnica para el aditivo superplastificante de alto rango Flowcon P01 proporciona un rango de consumo entre 4 a 9 ml / kg por peso del cemento, para el diseño se realizaron pruebas preliminares y la dosis adecuada fue de 3.5 ml ya que otorgaba la consistencia de trabajabilidad adecuada. Por otro lado, para el aditivo Accelguard TGD la dosificación recomendada es del rango de 6 a 12 ml / kg de cemento, fue necesario incrementar en 10 ml la dosis recomendada para la mezcla del 3% de sábila. Por último, la ficha técnica del aditivo inhibidor de la corrosión recomienda para una exposición de 3.5% de cloruros emplear 9.90 L por metro cúbico.

***Tabla 15**. Proporcionamiento de mezclas para 1 m^3 de concreto.*

Mezclas / Materiales	**Peso de los materiales secos por m^3**							
	MR	Mezclas con adición de nopal			Mezclas con adición de sábila			**MR+CIA**
		MR+N1%	**MR+N2%**	**MR+N3%**	**MR+S1%**	**MR+S2%**	**MR+S3%**	
Cemento (kg)	330	330	330	330	330	330	330	330
Agua (kg)	165	165	165	165	165	165	165	165
AG 3/4" (kg)	762	762	762	762	762	762	762	762
AF #4 (kg)	1056	1051	1046	1041	1028	1018	1011	1034
Nopal (kg)	–	3.3	6.6	9.9	–	–	–	–
Sábila (kg)	–	–	–	–	3.3	6.6	9.9	–
Eucon CIA (L)	–	–	–	–	–	–	–	9.9
Flowcon P01 (cm^3/kg cem)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Accelguard TGD (cm^3/kg cem)	6.0	6.0	6.0	10.0	12.0	15.0	22.0	–

El proporcionamiento mostrado en la tabla 15, considera el peso de los materiales previos a las correcciones por absorción y humedad de obra de los agregados y materiales naturales.

5.1.3 FASE 3.- Pruebas en estado fresco

5.1.3.1 Tiempo de fraguado en concreto

La caracterización microestructural de los materiales permitió conocer que las adiciones de la sábila y el nopal en mezclas base cemento retrasan el tiempo de fraguado. Esto acorde con lo encontrado en los difractogramas de la figura 51b y 51c, donde se observó la presencia de sulfato de calcio, el cual actúa como un retardante del fraguado del cemento. Por consiguiente, se consideró como un parámetro importante a determinar durante el desarrollo experimental.

A continuación, en la tabla 16 se muestran los resultados obtenidos para cada mezcla, siguiendo el procedimiento de la normativa ASTM C 403. Para combatir la problemática mencionada, se empleó un aditivo acelerante del fraguado comercial sin cloruros Accelguard TGD.

De acuerdo con los resultados, la mezcla que más tiempo tardó en fraguar es aquella con la adición de sábila en el máximo porcentaje (3%), con un tiempo de fraguado final de 27 horas con 20 minutos. Se considera dentro del rango de aceptación ya que la norma ASTM C 31 indica que para realizar el desmolde de especímenes se tienen 24 ± 4 horas.

La mezcla de referencia tuvo tiempo de fraguado final dentro de lo normal para un concreto estándar ~5 horas. A la mezcla con la incorporación del aditivo inhibidor de la corrosión no se le añadió acelerante del fraguado, ya que dentro de las consecuencias secundarias que se expusieron en el marco teórico, los aditivos inhibidores de la corrosión base nitrito de calcio, (el cual es el caso del Eucon CIA) tienden a acelerar el fraguado del concreto, lo cual se puede confirmar con base en los resultados obtenidos. Con respecto a

la mezcla de referencia, el aditivo inhibidor de la corrosión disminuyó el tiempo de trabajabilidad de la mezcla 1 hora con 25 minutos. Por otro lado, se corroboró que las mezclas con las adiciones naturales de nopal y sábila retrasan el tiempo en el que el concreto fragua, aún con la incorporación del aditivo acelerante del fraguado. Las adiciones de sábila son aún más tardías que las del nopal lo cual concuerda con las investigaciones presentadas en los antecedentes de este proyecto.

***Tabla 16**. Tiempos de Fraguado de las mezclas de concreto.*

Mezcla	Tiempo de Fraguado (horas:minutos)	
	Tiempo Inicial	**Tiempo Final**
MR	3:57	5:21
MR + N1%	9:53	11:39
MR + N2%	12:42	15:13
MR + N3%	14:00	19:32
MR + S1%	14:28	17:52
MR + S2%	16:53	23:54
MR + S3%	18:12	27:20
MR + CIA	3:31	4:36

Según la ASTM C 403, el tiempo de fraguado inicial se presenta cuando se obtiene una resistencia a la penetración de 500 psi (35.2 kg/cm^2), mientras que el tiempo de fraguado final se obtiene cuando se presenta una resistencia a la penetración de 4,000 psi (281.22 kg/cm^2). Los tiempos mostrados en la tabla 16 se obtuvieron realizando una interpolación e interceptando los valores en las gráficas correspondientes a cada mezcla.

A continuación, en la figura 55 se muestra el ejemplo gráfico de interceptación para la obtención de los tiempos de fraguados para la mezcla de referencia (MR). Dado que el cálculo y el proceso de obtención de los tiempos de fraguado es repetitivo se optó por mostrar solamente una gráfica de una mezcla.

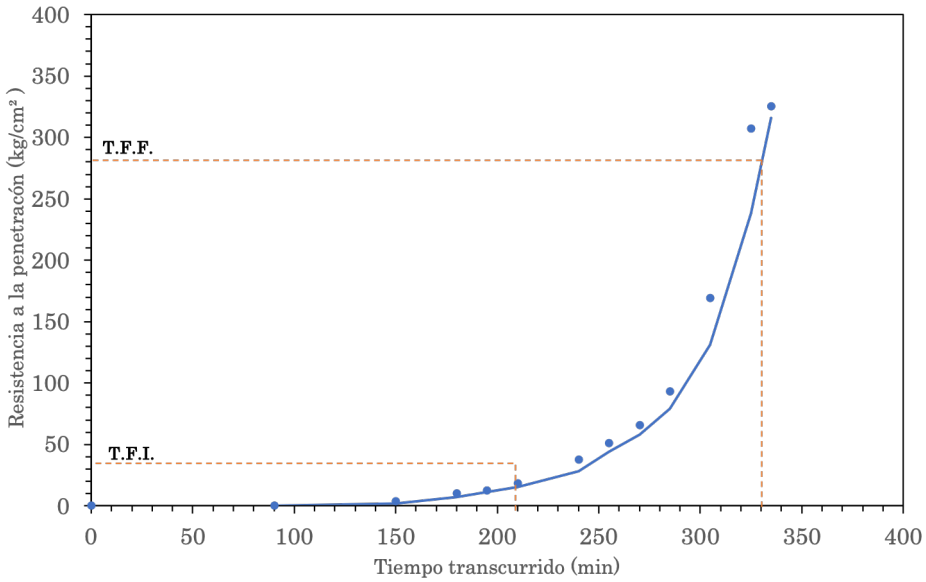


***Figura 55**. Determinación del tiempo de fraguado inicial y final de la mezcla de referencia (MR) del proyecto de investigación.*

5.1.3.2 Revenimiento

Al momento de realizar los diseños de mezclas se fijó un revenimiento objetivo de 20 ± 2 cm con la finalidad de tener mezclas de concreto trabajables. Para lograr esto se empleó un aditivo reductor de agua de alto rango (Flowcon P01). Como se puede observar en la tabla 17, la mezcla de referencia cumplió con el rango establecido, dando un revenimiento de 185 mm. La adición natural del nopal en 3% aumentó la trabajabilidad 25 mm, mientras que la sábila en su máxima adición (3%) aumentó la trabajabilidad 35 mm, con respecto a la mezcla de referencia.

***Tabla 17**. Revenimiento de las mezclas de concreto.*

Mezcla	Revenimiento (mm)
MR	185
MR + N1%	190
MR + N2%	195
MR + N3%	210
MR + S1%	215
MR + S2%	215
MR + S3%	220
MR + CIA	200

5.1.3.3 Contenido de aire

El contenido de aire de una mezcla depende de la estructura porosa que contiene la pasta de cemento que se forma, la cual depende de la compactación del material, de la relación agua/cementante, del contenido de cemento y del grado de hidratación.

Analizando este planteamiento; la compactación que se le dio al cuenco para la obtención de la densidad fue la establecida en la normativa ASTM C 138, con el mismo operador ejecutando las pruebas, por lo tanto, esta variable se puede minimizar. La relación agua/cemento de 0.50 y el contenido de cemento de 330kg/m^3 fueron los mismos para cada una de las mezclas, haciendo las correcciones por absorción y humedad de obra, por consiguiente, estos factores no pudieron alterar significativamente el contenido de aire. Por último, se tiene el grado de hidratación de la pasta de cemento, en donde el agua reacciona con los compuestos del clinker para generar los productos de hidratación y comenzar el fraguado del concreto.

De acuerdo con la composición química del nopal y la sábila tienen presencia de sulfato de calcio y azúcares a los cuales se les atribuye el retraso de la hidratación del cemento. Como se evidenció en la tabla 16, las mezclas de nopal y sábila retardaron el tiempo de fraguado del concreto durante casi 28 horas en el caso más crítico de la mezcla de sábila con 3% de adición. Por lo tanto, esta propiedad pudo afectar fuertemente en la estructura porosa de la pasta de concreto, generando así que las mezclas de nopal con el 3% de adición tuviera un contenido de aire de 4.20% y la mezcla de sábila con el 3% de adición un 5.15%, considerablemente mayor a la mezcla de referencia con un contenido de aire del 0.56% mostrado en la tabla 18.

Tabla 18. *Contenido de aire de las mezclas de concreto.*

Mezcla	Densidad Real (kg/m^3)	Densidad Teórica (kg/m^3)	Contenido de Aire (%)
MR	2360	2347	0.56
MR + N1%	2288	2349	2.59
MR + N2%	2254	2353	4.20
MR + N3%	2231	2361	5.50
MR + S1%	2283	2365	3.49
MR + S2%	2256	2361	4.46
MR + S3%	2220	2341	5.15
MR + CIA	2362	2349	0.57

Los valores típicos de contenido de aire para una mezcla de concreto convencional se encuentran en el rango de 1 – 3% [15]; las mezclas fuera de este parámetro son las de nopal con adición del 2% y 3%, así como las de la sábila en todas sus dosificaciones. Sin embargo, los contenidos de aire elevados bajo condiciones ambientales específicas pueden ser favorables, como el caso de ciclos de congelamiento – deshielo, donde valores de 4 – 8% son aceptables para concretos con aire incluido [15].

5.1.4 FASE 4.- Pruebas en estado endurecido

5.1.4.1 Resistencia a la compresión

En la figura 56 se muestra la evolución de la resistencia a la compresión de las ocho mezclas de concreto fabricadas. De acuerdo con el diseño de mezcla, se planteó una resistencia de 330 kgf/cm^2 como objetivo para la mezcla de referencia. Se ensayaron cilindros de acuerdo con la normativa ASTM C 39, donde el promedio se conforma por el ensaye de tres cilindros hermanos, calculando la desviación estándar para cada uno. A los 7 días de curado se realizó el primer ensaye, en donde las mezclas con el aditivo inhibidor de la corrosión (EUCON CIA) y la mezcla con 1% de adición de nopal (MR+N1%) incrementaron en 11% y 10% la resistencia con respecto al f'c objetivo respectivamente. La mezcla de referencia obtuvo un promedio de 322 kgf/cm^2. Por otro lado, las mezclas con adiciones de sábila en 2% y 3% (MR+S2% y MR-3%) tuvieron un comportamiento desfavorable, disminuyendo la resistencia a la compresión un 77% y 90% respectivamente.

A los 28 días de edad, los especímenes deberían desarrollar entre el 80 – 85% de la resistencia estimada, según los resultados obtenidos, todas las mezclas con excepción de MR+S2% y MR+S3% cumplieron con este parámetro. Sin embargo, a lo largo del monitoreo de la resistencia se puede destacar que, a la edad de 180 días, siete de las ocho mezclas fabricadas superaron la resistencia de diseño, siendo la mezcla con adición de sábila al máximo porcentaje MR+S3%, logrando una resistencia final de 310 kg/cm^2.

Analizando el comportamiento individual de las mezclas, el aditivo inhibidor de la corrosión a edades tempranas aumenta la resistencia de la compresión (7 y 28 días en este proyecto) y a edades tardías una disminución (56 y 90 días en este proyecto) lo cual concuerda con lo reportado en el código del ACI 212. Sin embargo, a la edad de 180 días logró incrementar la resistencia a la compresión un 14% con respecto a la mezcla de referencia.

Para las mezclas con las adiciones de nopal, el comportamiento del desarrollo de la resistencia varió. La adición del nopal en 1% a todas las edades evaluadas aumentó la

resistencia a la compresión, aunque a los 180 días solamente fue del 5%. Para el 2% y 3% de adición del nopal, el comportamiento no mostró que las adiciones aportaran mejorías al desarrollo de la resistencia, pero si disminución en un 15% y 20% respectivamente.

Con respecto a la adición de la sábila en todas las dosificaciones (1%, 2% y3%) disminuyó la resistencia de la compresión en un 20%, 25% y 30% respectivamente contra la mezcla de referencia a la edad de 180 días.

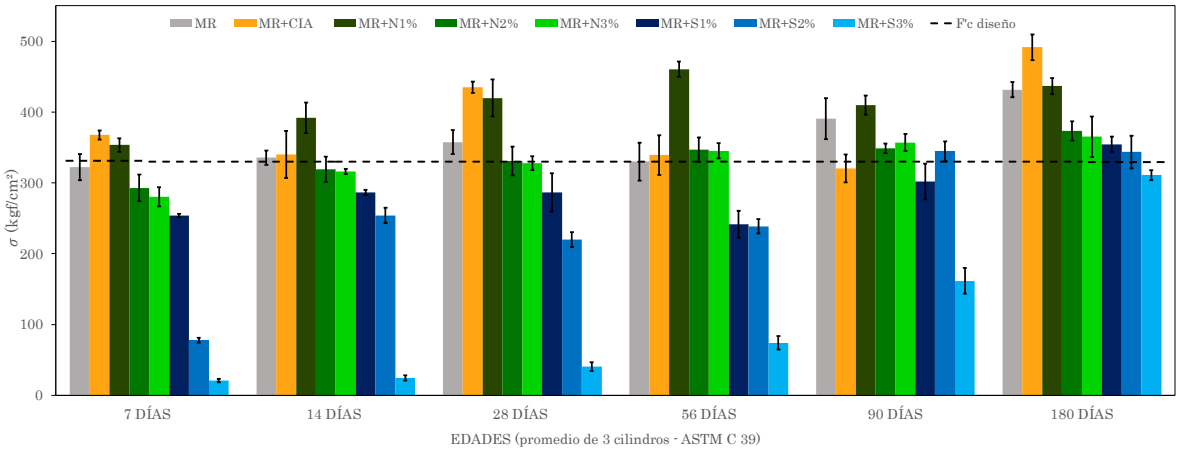


***Figura 56**. Evolución de la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto.*

5.1.4.2 Resistividad eléctrica del concreto

5.1.4.2.1 Resistividad bruta y superficial

La resistividad depende principalmente del grado de saturación de los poros del concreto, y de la hidratación de la pasta; se ve afectada comúnmente por el tipo de cemento, relación a/c, contenido de humedad y la porosidad de la matriz cementante.

En la figura 57 se representa el desarrollo de la resistividad bulk para las mezclas de concreto durante 196 días. De acuerdo con la NMX-C-514, cuando se presenta una resistividad mayor a 100 kΩ·cm se puede relacionar con una velocidad de corrosión despreciable, rango en donde se encuentran todas las mezclas a excepción de las adiciones

de nopal en 1% y 2% (MR+N1% y MR+N2%). Estas dos últimas se encontraron en un rango de velocidad de corrosión baja.

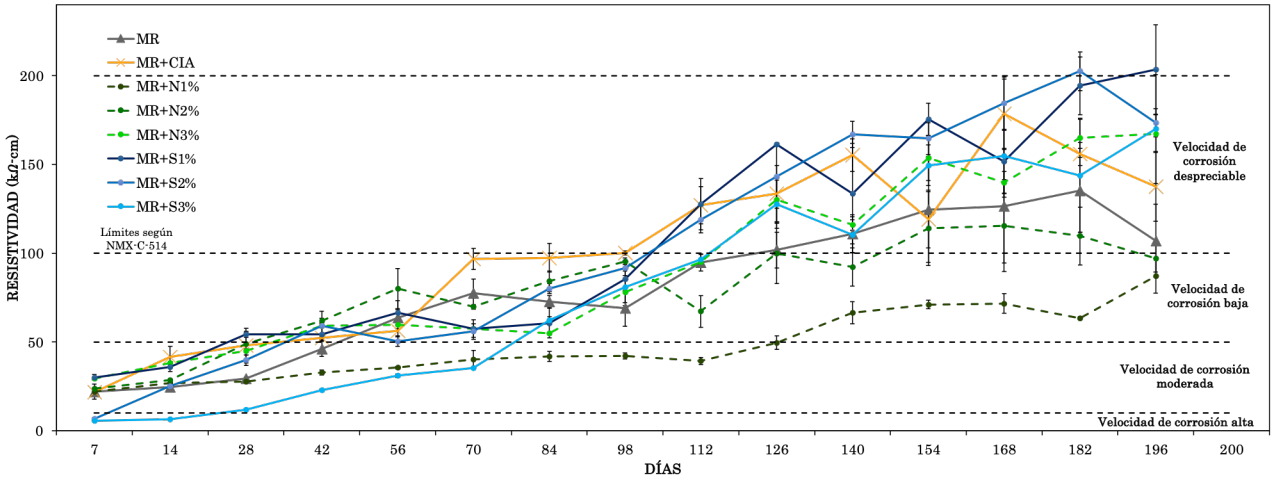


Figura 57. *Evolución de la resistividad bruta de las mezclas de concreto.*

De acuerdo con las medidas tomadas para la resistividad superficial de las mezclas concuerdan parcialmente con las mediciones de la resistividad bruta. En la figura 58 se pueden observar los resultados obtenidos mediante la prueba de 4 puntas. De acuerdo con la normativa AASHTO TP-95, se establecen rangos de resistividad para relacionarlos con la tasa de corrosión, cuando se obtienen valores menores de 12 kΩ·cm la velocidad de corrosión es alta, y la mezcla de referencia (MR) así como la de adición del 1% y 2% de nopal (MR+N1%, MR+N2%) se encuentran en este caso. El resto de las mezclas se encuentran dentro de una velocidad de corrosión moderada a despreciable a una edad de 196 días.

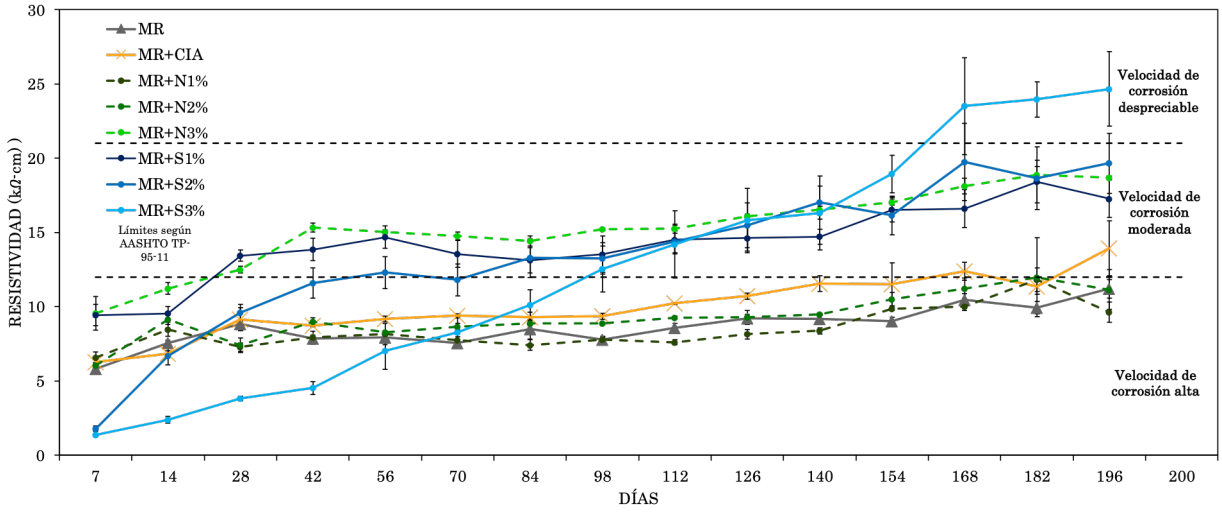


Figura 58*. Evolución de la resistividad superficial de las mezclas de concreto.*

Entre mayor sea el valor de la resistividad menor es la probabilidad de que se presente la corrosión, por lo que se asocia con una densificación de la matriz, ya que los iones de agentes agresivos tienen mayor dificultad al ingresar por la red de poros debido a que se encuentran saturados. Normalmente la corriente eléctrica es llevada por la red de poros gracias a los iones de Na^+, K^+, Ca^{++}, OH^-, SO_4^-, Cl^- los cuales se encuentran disueltos en la solución de poro. De acuerdo con la caracterización microestructural realizada, el nopal y la sábila tienen iones OH^-, SO_4, K^+ y Ca^{++}; dichos contenidos tendrán que ser bajos para tener mayor resistividad como se observó para las adiciones de sábila en 1%, 2% y 3% así como para la adición con nopal del 3%.

5.1.4.3 Espectroscopía de Impedancia electroquímica (EIS)

5.1.4.3.1 Exposición a cloruros

La impedancia electroquímica permite estudiar el comportamiento de la interfaz metal-solución, se basa en el empleo de una señal de corriente alterna que se aplica a un electrodo obteniendo una respuesta electroquímica que permite el análisis de la cinética de los procesos de electrodo y fenómenos de transferencia de masa (difusión) [52].

Al espectro formado por la variación de la impedancia en un barrido de frecuencia se le conoce como respuesta de frecuencia de un circuito eléctrico, dentro de las representaciones más usuales para este fenómeno se tienen el diagrama de Nyquist y el diagrama de Bode [52]. Para el análisis de los resultados de este proyecto se utilizará el diagrama de Bode, en donde por medio del software ZSimpWin se graficaron la componente imaginaria de la impedancia ($-Z_{im}$) contra la componente real de la impedancia (Z_{re}) para cada frecuencia dentro del rango de 10^{-1} a 10^5 Hz donde se aplicó una señal sinusoidal de voltaje, dando como resultado una semicircunferencia.

En los diagramas de Nyquist a altas frecuencias ($> 10^4$ Hz) la impedancia es causada por una resistencia óhmica la cual se asocia comúnmente a la resistencia del electrolito y productos de corrosión presentes en la superficie del metal. Los arcos formados en regiones de baja frecuencia ($< 10^1$ Hz) indican el estado de pasividad del

acero de refuerzo; así mismo la impedancia se considera como un indicador de la permeabilidad de sistemas cementantes, en donde a disminución de la impedancia incrementa la permeabilidad [53].

En la figura 59 se muestra el circuito equivalente que se utilizó para el ajuste de la respuesta electroquímica del acero embebido en las mezclas de concreto, el cual consta de tres resistencias (R) en ohmios (Ω), y dos elementos de fase constante (CPE) en siemens por segundo a la "n" ($S \cdot sec^n$).

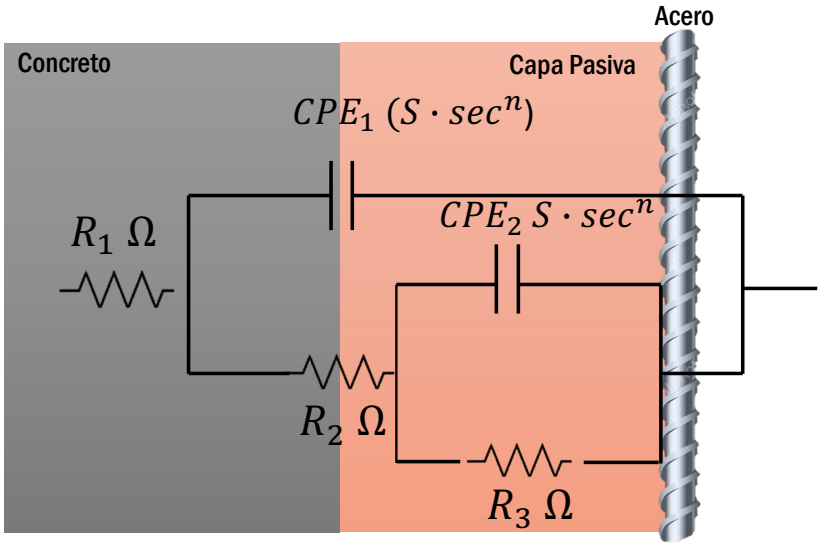


***Figura 59**. Circuito equivalente empleado para evaluar la respuesta electroquímica.*

A continuación, en la figura 60 se muestran los diagramas de Nyquist obtenidos para cada una de las mezclas de concreto mostrando el comportamiento de impedancia electroquímica durante 28 días de etapa de curado inicial y 180 días de exposición a cloruros. Cada curva representa el ajuste de 3 mediciones de EIS para cada mezcla de concreto a cierta edad.

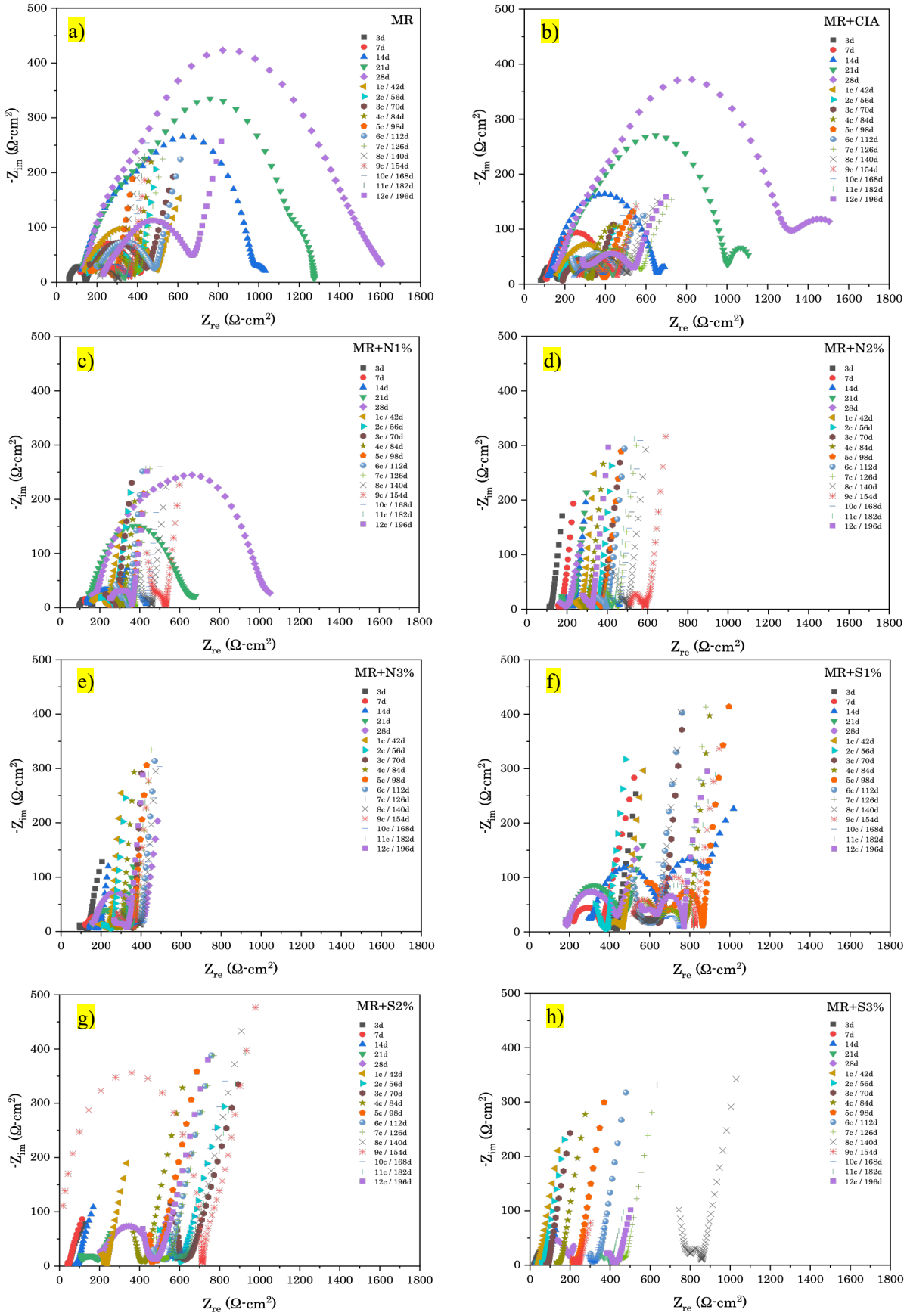


Figura 60. *Diagramas de Nyquist para las mezclas de concreto expuestas a cloruros.*

En la figura 60-a y 60-b se muestran los diagramas para la mezcla de referencia (MR) y mezcla con adición de aditivo comercial (MR+CIA), en donde ambas presentan comportamientos similares, con la formación de dos semicírculos incompletos en frecuencias intermedias entre 10^{-1} a 10^{4} Hz debido a la película porosa que se forma en la interfaz acero-concreto. Observando las figuras 60-c-e referentes a las mezclas con adición de nopal en 1%, 2% y 3% respectivamente, se puede observar que la formación de los semicírculos pasó a frecuencias aún más altas con respecto a la mezcla de referencia con una formación de pendiente lineal, la cual se atribuye a una impedancia por difusión. Las mezclas MR+N2% y MR+N3% obtuvieron valores de impedancia notoriamente menores a la mezcla de referencia, a lo que se puede atribuir que presentan una matriz más permeable, permitiendo así el ingreso de agentes de una manera más rápida. Por último, las adiciones de sábila en 1%, 2% y 3% representadas en la figura 60-f-h respectivamente, muestran de igual manera la formación de dos semicírculos. La primera formación semi-circular se atribuye a una transferencia de carga en frecuencias altas, seguida de una pendiente recta con tendencia hacia frecuencias bajas atribuidas a una impedancia por difusión.

Para realizar una comparativa del comportamiento de las mezclas en la figura 61 se graficaron los valores de impedancia para las mezclas de concreto a una edad de 196 días de exposición.

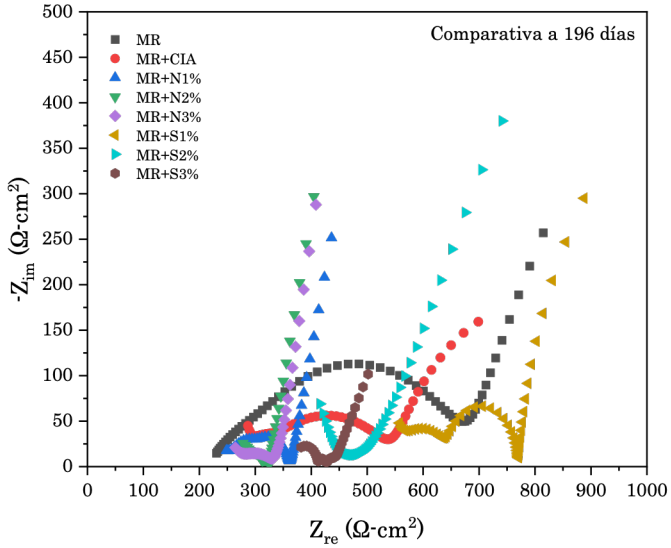
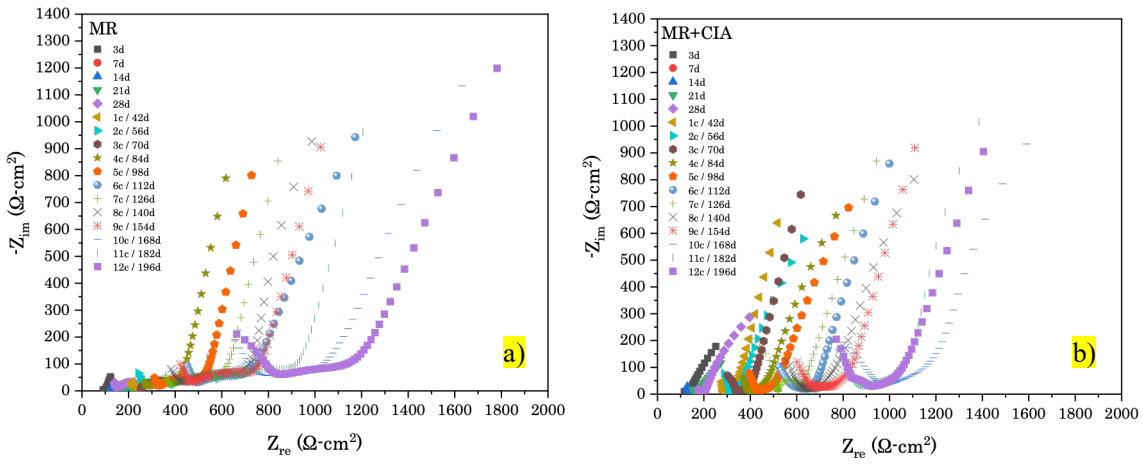


Figura 61. *Diagrama de Nyquist comparando comportamiento de las mezclas de concreto expuestas a cloruros a 196 días.*

En la figura anterior se puede notar que la mezcla de referencia (MR) y la mezcla con aditivo inhibidor de la corrosión comercial (MR+CIA) tienen una formación de arcos capacitivos de gran radio en regiones de frecuencias intermedias, lo que podría indicar un estado de pasivación del acero de refuerzo embebido. Por el contrario, el resto de las mezclas sufre un decremento en el radio de los arcos capacitivos ubicados a frecuencias altas y valores de impedancia menores, lo cual se atribuye a la destrucción de la capa pasiva e inicio de la corrosión del acero de refuerzo.

5.1.4.3.2 Exposición a CO_2

Para las probetas sometidas a exposición por dióxido de carbono se utilizó el mismo circuito equivalente para la interpretación de resultados, mediante graficas de Nyquist mostradas en la figura 62. Se puede observar que el comportamiento de las curvas que presentaron las mezclas conforme a la evolución del tiempo fue desplazándose a la derecha en el eje de la Z_{re} lo cual está asociado con el aumento de la resistividad de la matriz, y las figuras 62-a-g muestran una tendencia geométrica similar, dentro de los mismos rangos de impedancia con formación de semicírculos dentro de frecuencias intermedias. Mientras que para la mezcla con adición de sábila al 3% en representada en la imagen 62-h, la formación de semicírculos es más amplia y en frecuencias más bajas.



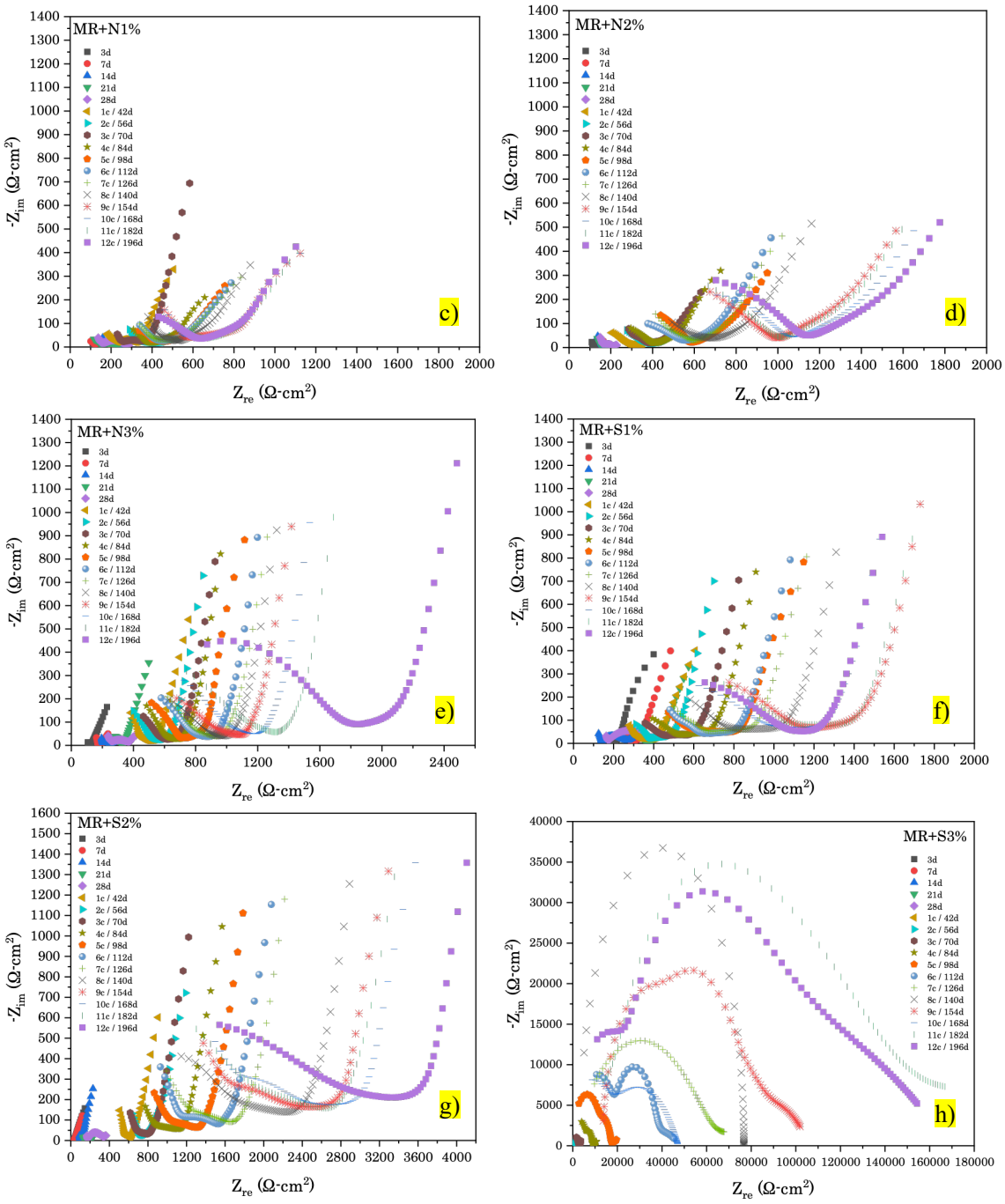


Figura 62. *Diagramas de Nyquist para las mezclas de concreto expuestas a carbonatación.*

Así mismo se realizó una gráfica comparativa mostrada en la figura 63 donde se representan las ocho mezclas de concreto expuestas a carbonatación durante 196 días. Para mejor visualización se realizó una ampliación en la zona de altas frecuencias donde se ubicaron la mezcla de referencia, la mezcla con aditivo inhibidor comercial, las mezclas

con adición de nopal en 1%, 2% y 3%, así como las mezclas con adición de sábila en 1% y 2%.

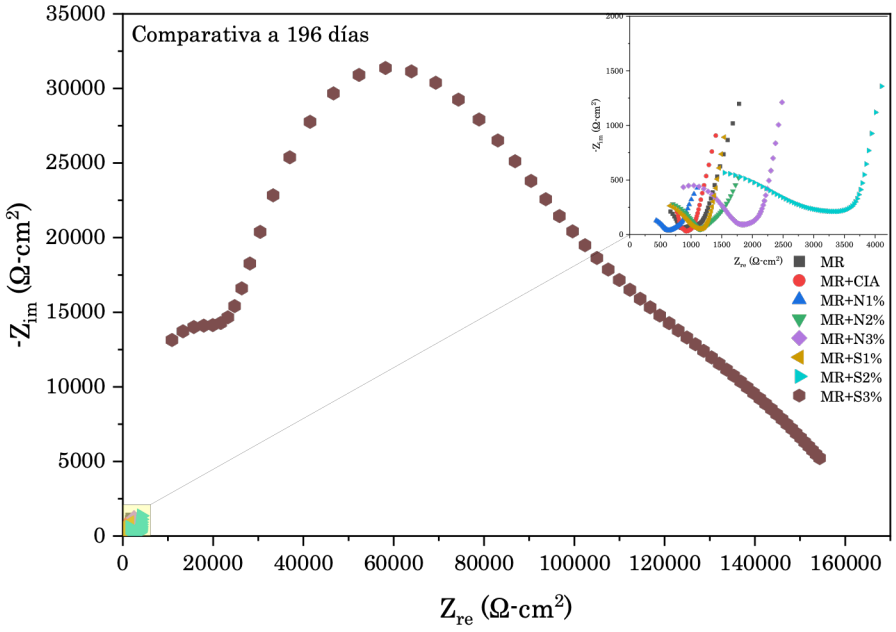


Figura 63. *Diagrama de Nyquist comparando comportamiento de las mezclas de concreto expuestas a carbonatación durante 196 días.*

Cabe mencionar que, analizando los resultados obtenidos por las diversas técnicas de monitoreo, la mezcla con adición de sábila al 3% (MR+S3%) presento el mayor grado de profundidad de carbonatación a la edad de 196 días, y al realizar la inspección visual de las probetas sometidas a carbonatación, el acero de refuerzo de dichas probetas se observaba con algunos productos de corrosión.

5.1.4.4 Resistencia a la polarización (RP)

5.1.4.4.1 Potencial de corrosión por exposición a cloruros

En la figura 64 se muestran las medidas del potencial de media celda (Ecorr) del acero de refuerzo para cada una de las mezclas de concreto que fueron sometidas a un proceso de corrosión acelerado mediante la difusión de cloruros.

La línea vertical punteada limita los días que se monitorearon las probetas en estado de curado estándar y los días que se mantuvieron expuestas a una solución de 3.5% NaCl. Por otro lado, las líneas punteadas horizontales delimitan los intervalos de las diferentes zonas de probabilidad de corrosión que se establecen en la normativa ASTM C 876 cuando se emplea un electrodo de calomel saturado (ECS).

La interpretación de los valores de Ecorr de manera general se hace considerando que los valores más cercanos a 0 mV indican menor probabilidad de que se presente la corrosión, mientras que los valores más alejados de 0 mV se atribuyen a un estado de mayor potencialidad de que se presente la corrosión.

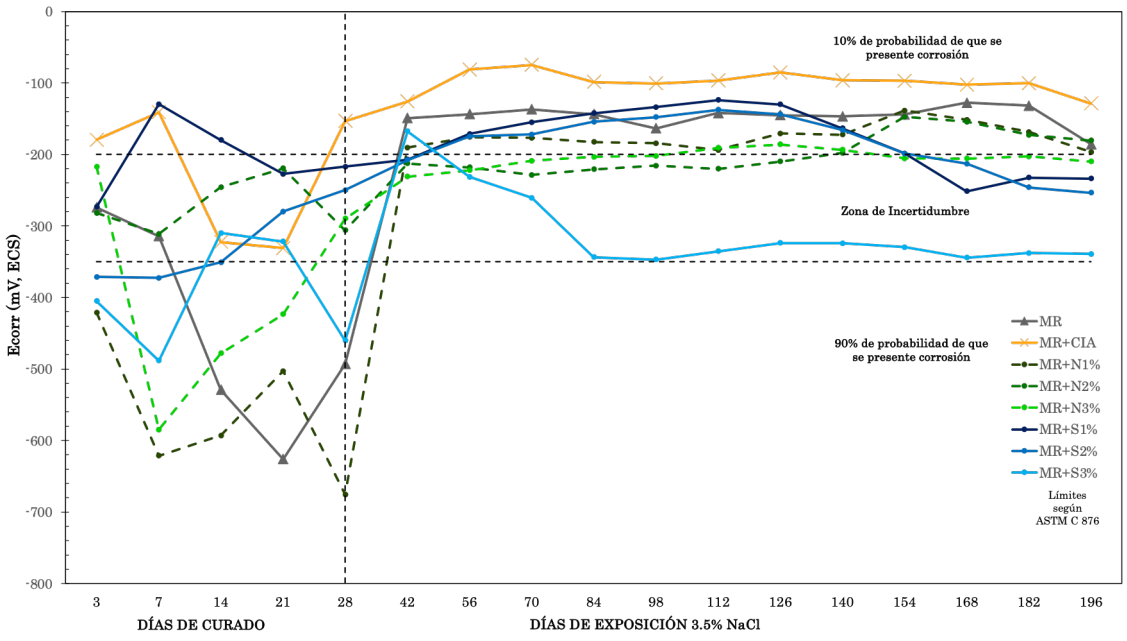


Figura 64. *Evolución de potencial de media celda (Ecorr) durante proceso de curado y corrosión por cloruros.*

Durante los primeros 28 días de curado que recibieron los especímenes, se puede observar que los potenciales de 3 mezclas (MR, MR+N1% y MR+S3%), se encontraron en la zona con un 90% de probabilidad de que se presente la corrosión, mientras que 4 mezclas (MR+N2%, MR+N3%, MR+S1% y MR+S2%) se encontraron en un rango de -200 mV a -350 mV en la zona de incertidumbre, y por otro lado la última mezcla (MR+CIA) se encontró en la zona con un 10% de probabilidad de que se presente la corrosión. Este comportamiento es habitual cuando el acero de refuerzo tuvo previa limpieza química y tiene que volver a formar la capa pasiva en la superficie del acero. Sin embargo, este proceso es lento cuando los especímenes se encuentran en la etapa de curado ya que la formación de la capa depende de factores como la disponibilidad del oxígeno, el grado de saturación de los poros y la concentración de iones en el electrolito.

Por otro lado, durante toda la etapa de exposición a cloruros se puede observar que los valores de potencial para la mezcla de referencia (MR), la mezcla con aditivo inhibidor de corrosión (MR+CIA) y las mezclas con adiciones de nopal en 1% y 2% (MR+N1% y MR+N2%) se encuentran dentro del intervalo con 10% de probabilidad de que se presente la corrosión con potenciales mayores a -200 mV; mientras que el resto de las cuatro mezclas (MR+N3%, MR+S1%, MR+S2% y MR+S3%) se encuentran en el rango de incertidumbre de que se presente la corrosión con potenciales entre -350 mV a -200 mV, siendo éstas, las mezclas con adiciones de sábila en todos los porcentajes de adición así como la mezcla con adición de nopal en 3%.

5.1.4.4.2 Densidad de corriente de corrosión por exposición a cloruros

El icorr es un parámetro que indica la cinética de corrosión relacionado con la resistencia a la polarización "Rp" y una constante "B" mencionados en la ecuación 13, la cual se utiliza para calcular la cantidad de metal que pasa a óxido por unidad de tiempo de la superficie de acero expuesta. En la figura 65 se puede observar que, durante la etapa de los 28 días de curado, la mezcla con el 3% de adición de sábila (MR+S3%) presentó mayor velocidad de corrosión ubicándose en el rango de corrosión alta, mientras que el resto de las mezclas se ubicaron dentro del intervalo de corrosión baja. Lo cual coincide con el potencial medido, ya que la mezcla con 3% de adición de sábila (MR+S3%) se ubicó en el rango con 90% de probabilidad de que se presente la corrosión. Al término del período de exposición a la solución de cloruro de sodio al 3.5% a 196 días, todas las mezclas con adición de nopal (MR+N1%, MR+N2% y MR+N3%), y la mezcla con sábila en 1% (MR+S1%) se ubicaron con una velocidad de corrosión alta, las mezclas con sábila en 2% y 3% se ubicaron en el intervalo de corrosión baja, y por último, la mezcla de referencia y la mezcla con aditivo inhibidor de la corrosión (MR y MR+CIA) se ubicaron en el rango de corrosión moderada.

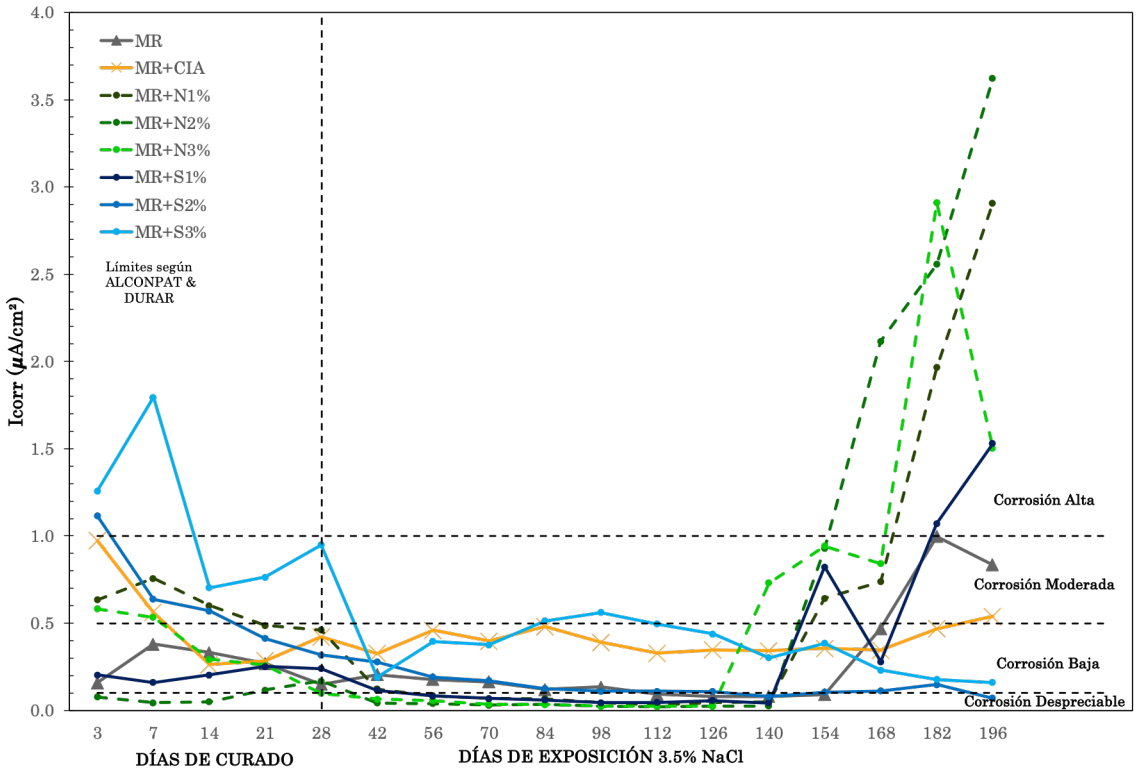


***Figura 65**. Evolución de la velocidad de corrosión (icorr) de las mezclas de concreto durante el curado y exposición a cloruros.*

5.1.4.4.3 Resistencia a la polarización por exposición a cloruros

La "Rp" se define como la resistencia de una interfaz a la transferencia de carga cuando se le aplica un potencial externo. Relaciona el voltaje aplicado ΔE entre el paso de corriente ΔI. Comúnmente el aumento del Rp se asocia con la formación de la capa pasiva en la superficie del acero, la formación de esta capa otorga mayor resistencia a que el material se polarice, requiriendo así mayor cantidad de corriente para modificar el potencial del acero. En la figura 66 se muestran los valores de resistencia obtenidos para cada una de las mezclas de concreto fabricadas. Se puede destacar que a los 28 días de curado la mayoría de las mezclas presentaron una resistencia menor a 200 kΩ-cm^2, a diferencia de los valores obtenidos en el periodo intermedio de exposición a cloruros, en donde se observa que incluso algunas mezclas llegaron a resistencias mayores a 2000 kΩ-cm^2. Al término de la exposición durante 196 días las mezclas con adiciones de sábila en todos los porcentajes presentaron los valores más altos de resistencia a la polarización con un rango entre los 400 a 500 kΩ-cm^2, mientras que las mezclas con adiciones de nopal en todos los porcentajes obtuvieron los valores más bajos con valores entre 20 y 40 kΩ-cm^2.

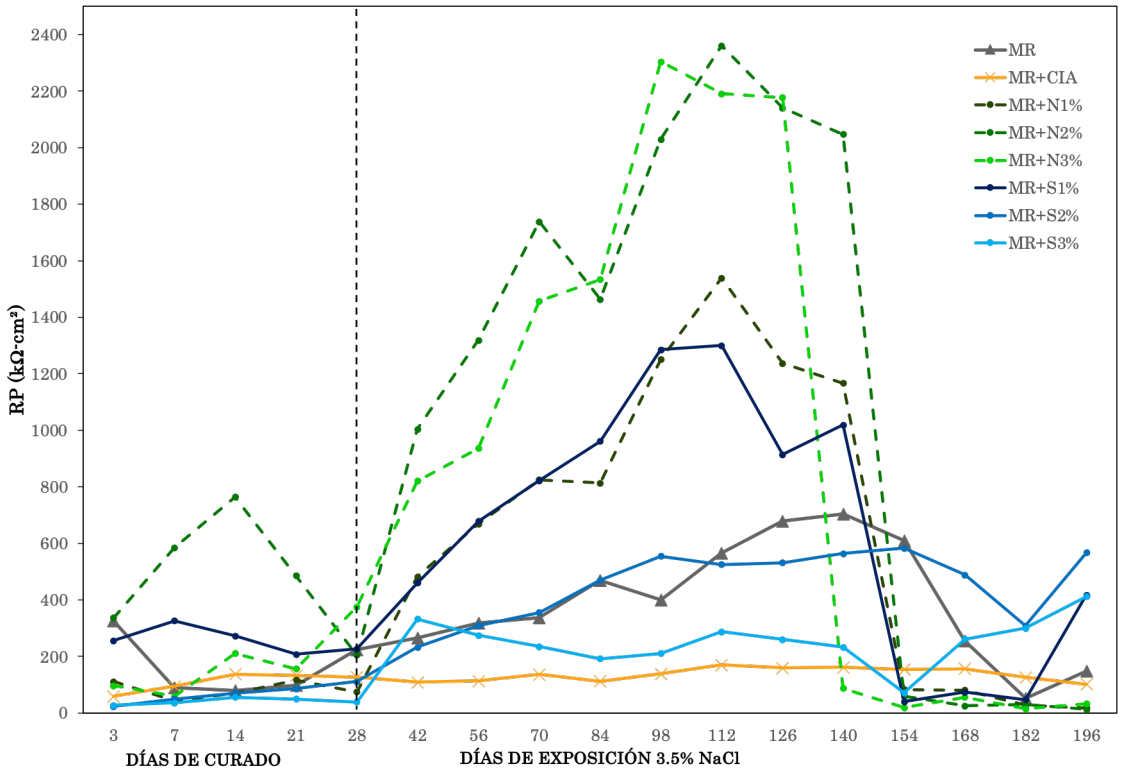


Figura 66. *Evolución de la resistencia a la polarización de las mezclas de concreto durante el periodo de curado y de exposición a cloruros.*

5.1.4.4.4 Potencial de corrosión por exposición a CO_2

El potencial de media celda medido para las probetas sometidas a un ambiente del 4% de CO_2 se muestra en la figura 67, en donde la línea punteada vertical divide el tiempo en dos etapas, durante 28 días se monitorearon las probetas en estado de curado estándar y el resto del tiempo fueron sometidas a exposición de dióxido de carbono. Las líneas horizontales punteadas dividen las zonas de probabilidad de que se presente la corrosión de acuerdo con la norma ASTM C 876. Durante el periodo de curado, a la edad de 28 días se puede notar que todas las probetas presentaron valores más electronegativos ubicándose así en la zona con 90% de probabilidad de que se presente la corrosión a excepción de la mezcla con aditivo de la corrosión comercial que se ubicó en la zona con 10% de probabilidad de que se presente la corrosión. Este comportamiento se puede atribuir a que las varillas recibieron un tratamiento de limpieza química en donde se removió cualquier formación de óxidos que pudieran estar recubriendo a la varilla de manera natural, por lo tanto, es más propensa a la corrosión de esta. A partir de la medición posterior a los 28 días se puede notar que se formó la capa pasiva sobre el acero de refuerzo, ya que los potenciales de todas las probetas pasaron a la zona con 10% de probabilidad de corrosión a excepción de la mezcla con el 3% de adición de sábila que se mantuvo en una zona de incertidumbre durante toda la etapa de monitoreo de los especímenes.

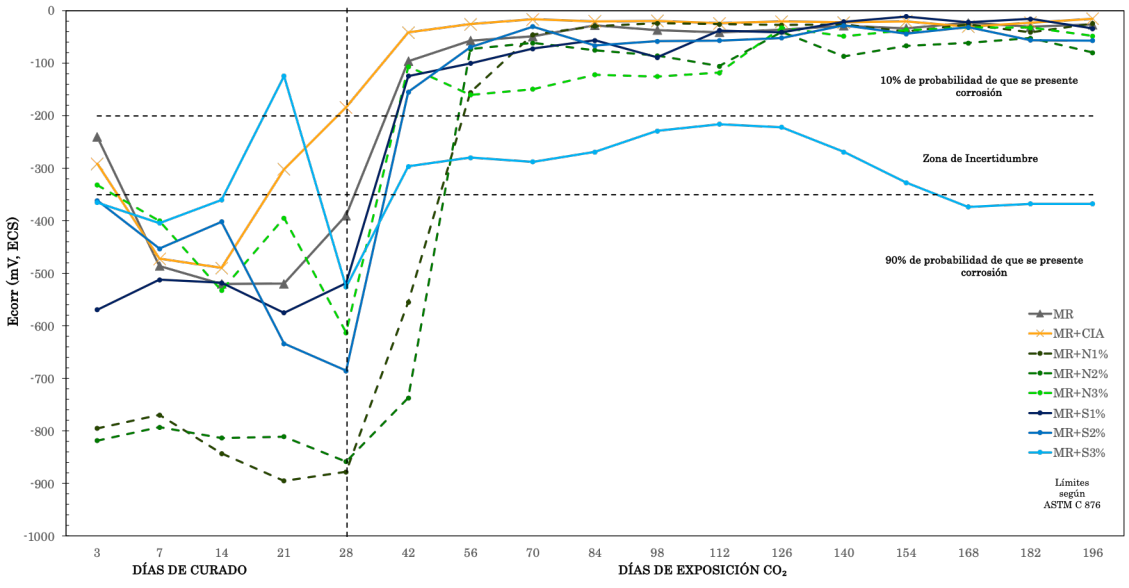


***Figura 67**. Evolución del potencial de media celda (Ecorr) para las probetas sometidas al 4% de CO_2.*

5.1.4.4.5 Densidad de corriente de corrosión por exposición a CO_2

De acuerdo con la velocidad de corrosión presentada por los especímenes durante todo el período de monitoreo los valores variaron entre los rangos propuestos por los criterios de Clear 1989, la red DURAR y Alconpat [54]. En la figura 68 se muestra que previo a la exposición del 4% de CO_2 las probetas con adición de nopal en 1% y 2% se situaron en un intervalo de corrosión alta, así como aquellas con adición de sábila en 2% y 3%. El resto de las mezclas se ubicaron en las zonas de corrosión moderada a despreciable. Por otro lado, posterior a la etapa de curado, las mezclas se comportaron con una velocidad de corrosión despreciable, hasta el paso de 196 días en donde la mezcla de referencia, la mezcla con el aditivo comercial de corrosión, y la mezcla con el 3% de adición de nopal se colocaron con una velocidad de corrosión alta, mientras qué, la mezcla con adición del 2% de nopal junto con la mezcla con 1% de adición de sábila se colocaron con una velocidad de corrosión moderada, y por ultimo las mezclas con adición de nopal en 1% y sábila en 2% y 3% se ubicaron en la zona de velocidad de corrosión baja.

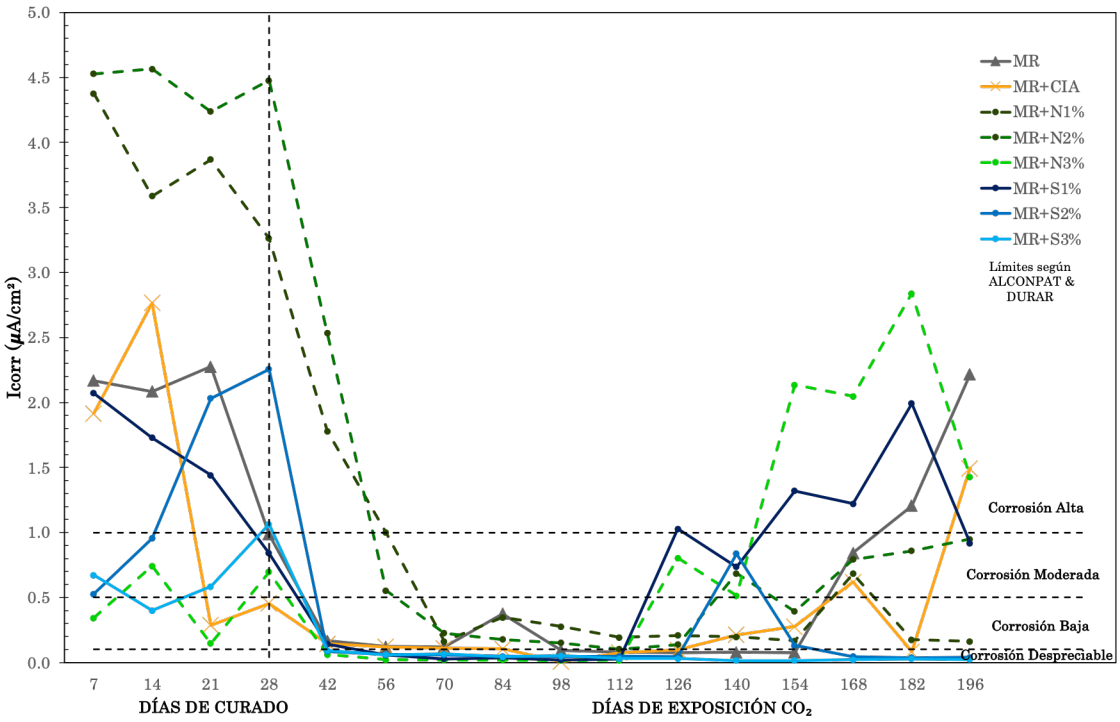


Figura 68. *Evolución de la velocidad de corrosión (icorr) medida durante el periodo de curado estándar y exposición a dióxido de carbono.*

5.1.4.4.6 Resistencia a la polarización por exposición a CO_2

Los valores de RP se muestran en la figura 69 en donde se observa que previo a la exposición de las probetas, presentaron valores bajos de resistencia a la polarización entre 0 – 200 kΩ-cm^2 lo cual es congruente, ya que durante ese periodo debido a la limpieza química que sufrió el acero de refuerzo se rompió la capa pasiva, por lo tanto, el material no presenta resistencia a que se polarice. Concluido el periodo de curado, las mezclas incrementaron los potenciales. Durante los primeros 2/3 del tiempo de exposición la mezcla con adición de nopal en 3% logro los potenciales más altos con valores entre 3000 y 3600 kΩ-cm^2, el resto de las mezclas mostraron un comportamiento con valores entre los 200 – 1200 kΩ-cm^2. Al terminó de exposición de CO_2, la mezcla de referencia, la de aditivo inhibidor de la corrosión comercial, y aquellas con adición del 3% de nopal y 1% de sábila presentaron los valores más bajos < 200 kΩ-cm^2, mientras que el resto de las mezclas (nopal con adición de 1% y 2%, y sábila con adición del 2% y 3%) obtuvieron valores de RP entre un rango de 200 – a 1800 kΩ-cm^2.

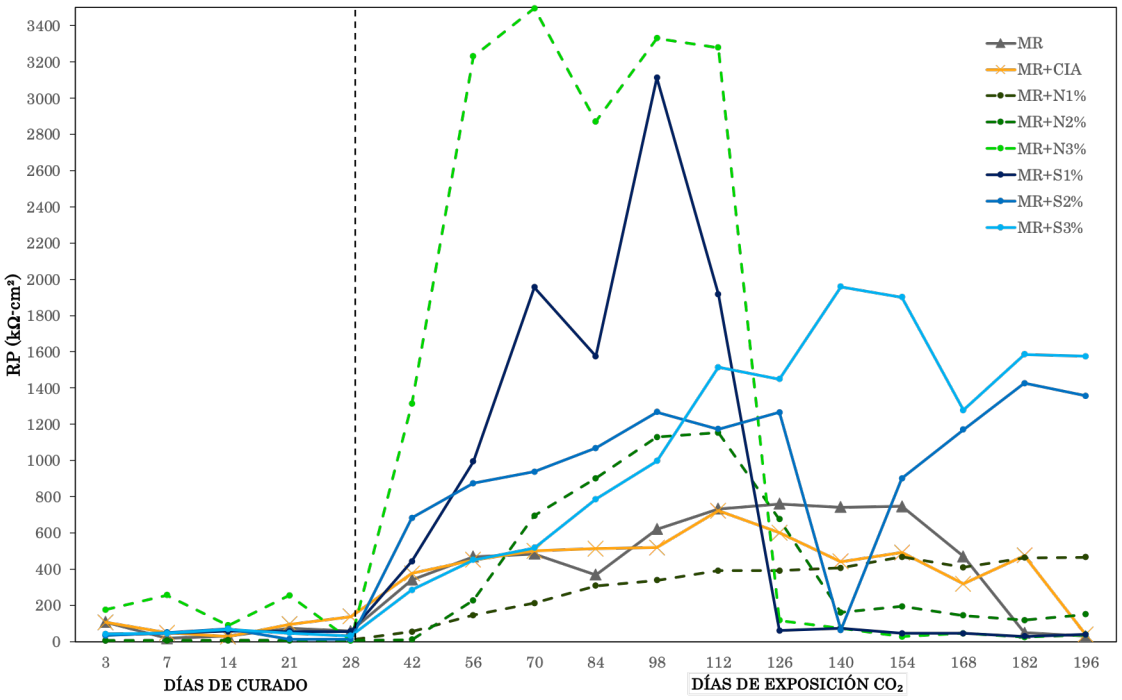


***Figura 69**. Evolución de la resistencia a la polarización de las mezclas de concreto durante el periodo de curado y sometidas a dióxido de carbono al 4%.*

5.1.4.5 Contenido de cloruros

De acuerdo con el modelo de Tutti (1982), la vida de servicio de una estructura de concreto reforzado se puede dividir en dos periodos: etapa de iniciación y etapa de propagación. En donde la primera se define como el período hasta donde se detecta la despasivación del acero de refuerzo; mientras que el periodo de propagación es aquel en donde se desarrolla el proceso de corrosión a una velocidad determinada hasta el punto de culminar con la vida útil de servicio de la estructura.

La condición crítica de despasivación del acero de refuerzo generalmente se expresa en términos del umbral de cloruros o del contenido crítico de cloruros por peso de cemento (Wc), en este punto la capa pasiva que protege al acero de refuerzo se destruye. El contenido crítico de cloruros se determina cuando el comportamiento electroquímico del acero indica despasivación.

Por medio de la ecuación 15, que muestra la segunda Ley de Fick, se calculó un contenido total de cloruros a partir del contenido de cloruros total medido en laboratorio, con el método de diferencia mínima de cuadrados. Primeramente, se realizó una propuesta inicial de valores para los coeficientes de "Cs" concentración de iones cloruro en la superficie del concreto, "Co" concentración inicial de cloruro y "D" coeficiente de difusión. A partir de esta propuesta se realizó el cálculo de cloruros totales y se ajustó con el arreglo matemático de diferencia mínima de cuadrados, arrojando así los valores reales estimados de los coeficientes antes mencionados. Este procedimiento se realizó para cada una de las mezclas propuestas en el diseño experimental, monitoreando los valores en 3 ciclos, el primero a la edad de 56 días, el segundo a 90 días y el último a 180 días. Esto nos permitió obtener el tiempo de iniciación de la corrosión.

En las figuras 70 y 71 se muestra el potencial de media celda y la densidad de corrosión obtenida para las probetas que se emplearon para determinar el umbral de corrosión de las mezclas. Se consideraron criterios de activación cuando se tuvieran potenciales más negativos que -270 mV y densidades de corriente superiores a 0.1-0.2 μA/cm^2. Hubo casos en los que algunas mezclas si presentaban valores de potencial más

negativos que -270 mV pero con una densidad de corriente inferior al rango 0.1-0.2 μA/cm², por lo tanto, es importante continuar con las mediciones hasta que ambos criterios se cumplan.

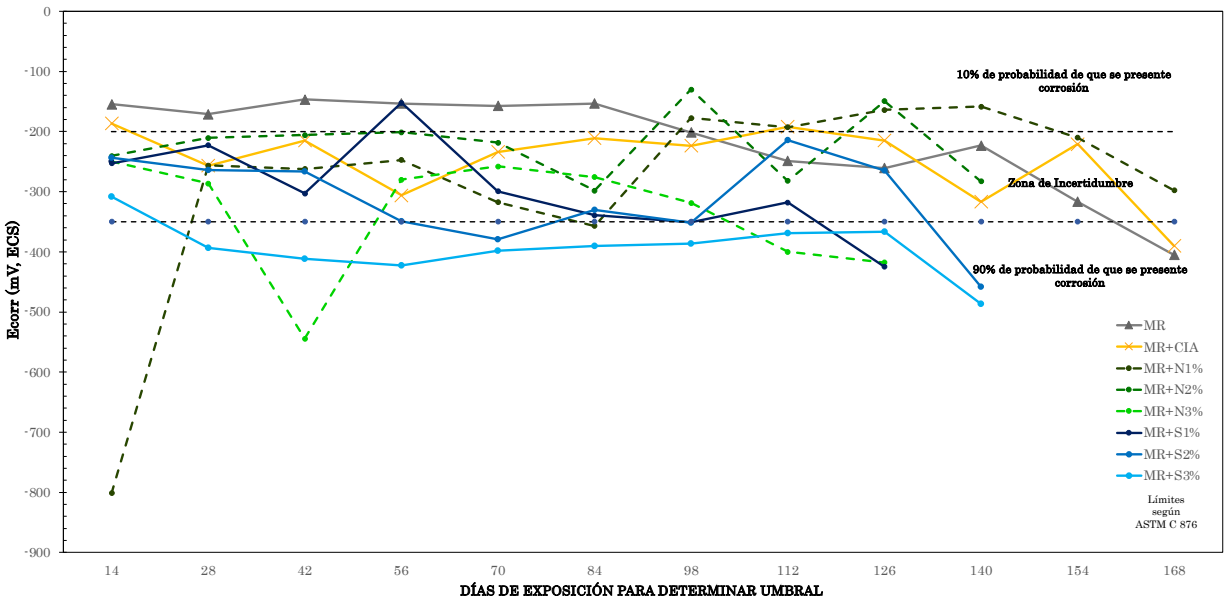


***Figura 71**. Evolución del potencial de media celda (Ecorr) para las probetas de umbral de cloruros.*

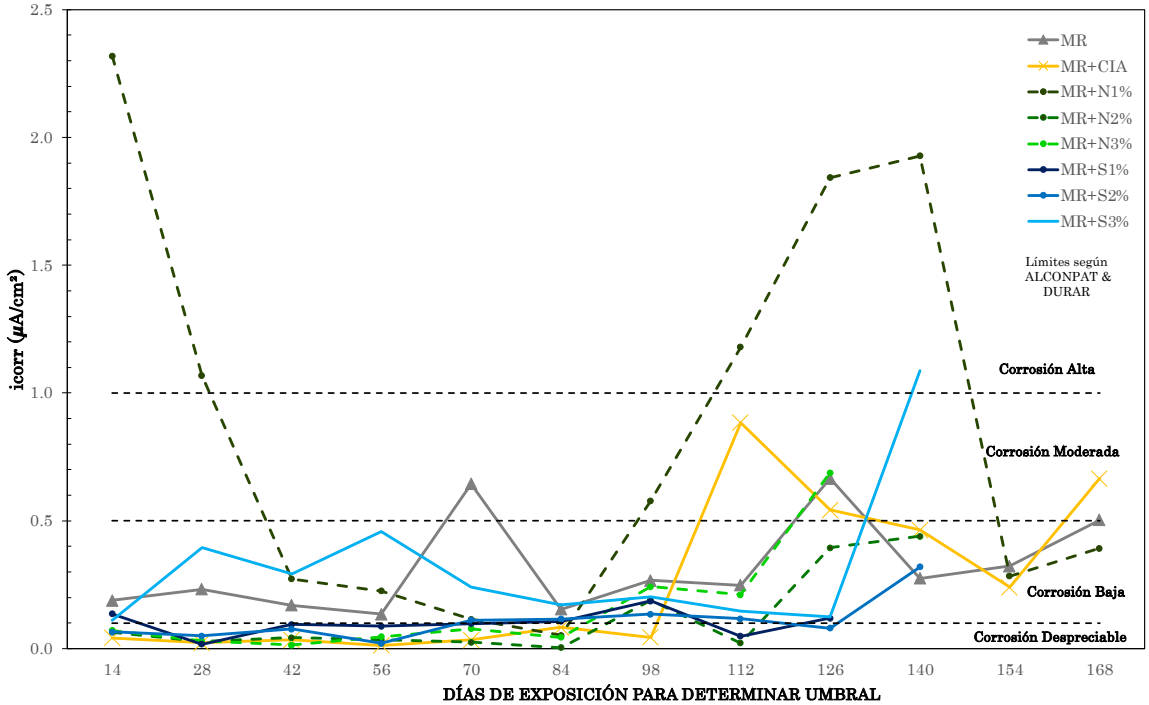
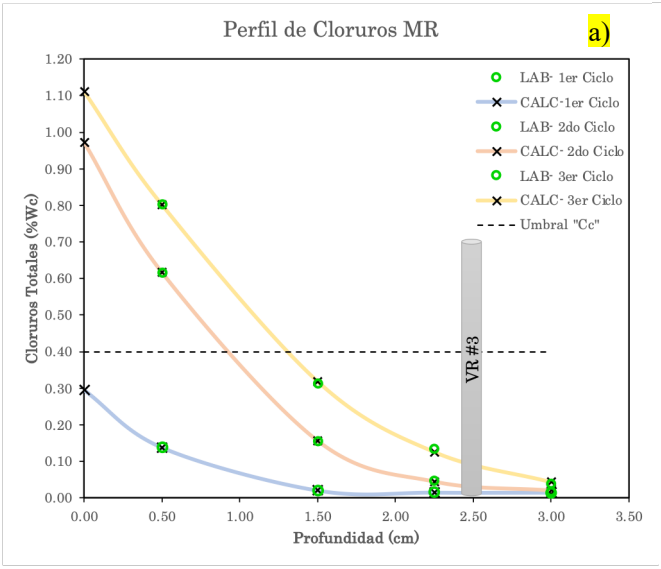
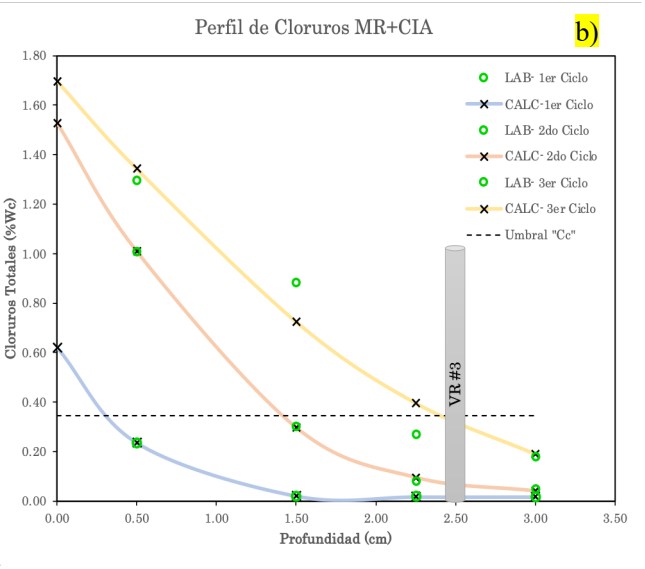


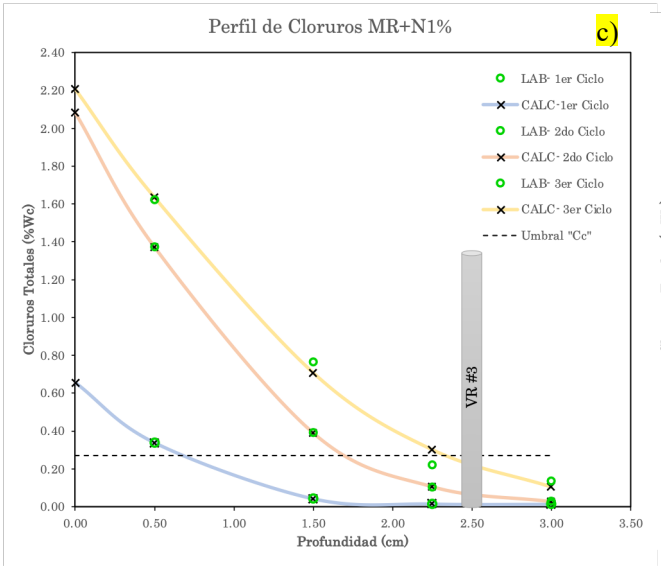
***Figura 70.** Evolución de la velocidad de corrosión (icorr) medida para las probetas de umbral de cloruros.*

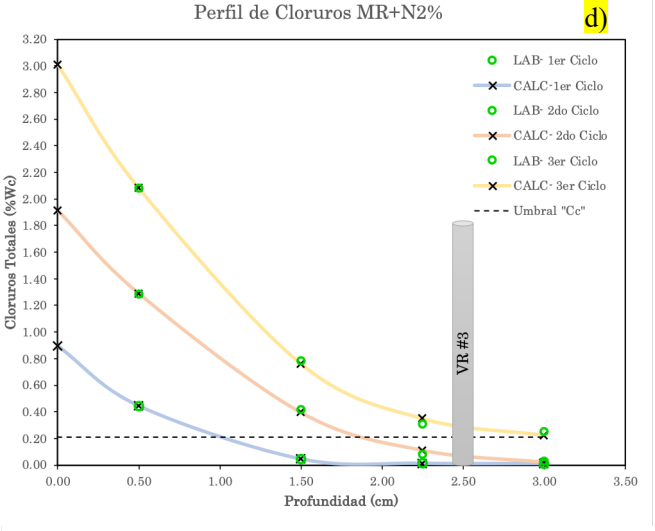
En la figura 70 se observa el monitoreo que se realizó del potencial, se puede notar que desde que se iniciaron las mediciones las probetas se encontraron en la zona de incertidumbre y al paso del tiempo fueron oscilando entre los rangos de 90% de probabilidad de que se presente la corrosión y zona de incertidumbre. Podemos notar que alrededor de los 126 días de monitoreo los valores de potencial se ubicaban en la zona con 90% de probabilidad de que se presente la corrosión, esta medición se tenía que complementar con el criterio (mostrado en la figura 71) de que la densidad de corriente se ubicara ente 0.1-0.2 μA/cm² para poder detener la prueba y proceder con la extracción de polvos en la interfaz acero-concreto.

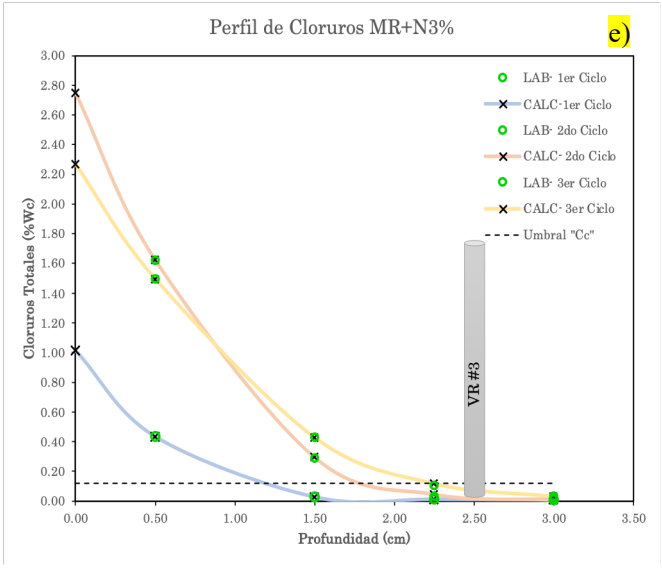
En la figura 72 se muestran los perfiles del contenido de cloruros para cada una de las mezclas con el valor obtenido en el laboratorio y el calculado. Para cada mezcla se realizó una gráfica con la estimación a 3 edades diferentes (primer ciclo, representado por la línea azul, segundo ciclo, por la línea naranja y tercer ciclo representado por la línea amarilla) con el umbral de cloruros / valor crítico de cloruros respectivo para cada mezcla representado por la línea horizontal punteada y por último se ubicó el acero de refuerzo a una profundidad de 2.50 cm, ya que en los especímenes sujetos a exposición por cloruros mostrados en la figura 29, se colocó la barra de acero a 25.4 mm de la superficie.

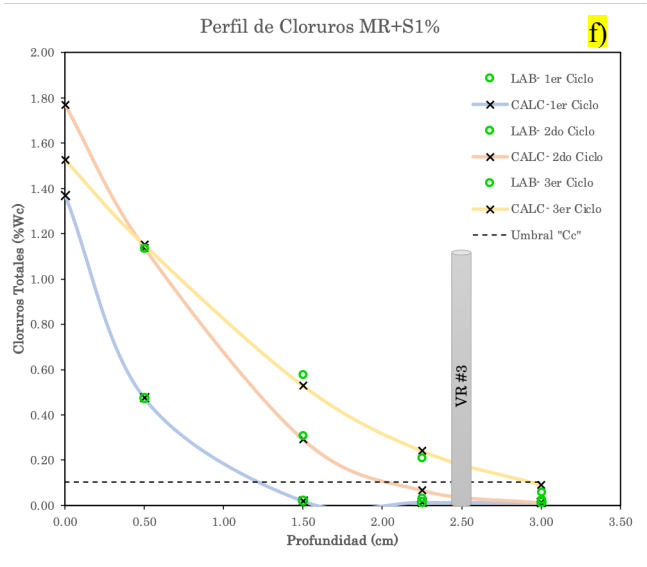

Perfil de Cloruros MR
a)
Cloruros Totales (%Wc)
Profundidad (cm)
LAB- 1er Ciclo
CALC-1er Ciclo
LAB- 2do Ciclo
CALC- 2do Ciclo
LAB- 3er Ciclo
CALC- 3er Ciclo
Umbral "Cc"
VR #3


Perfil de Cloruros MR+CIA
b)
Cloruros Totales (%Wc)
Profundidad (cm)
LAB- 1er Ciclo
CALC-1er Ciclo
LAB- 2do Ciclo
CALC- 2do Ciclo
LAB- 3er Ciclo
CALC- 3er Ciclo
Umbral "Cc"
VR #3


Perfil de Cloruros MR+N1%
c)
Cloruros Totales (%Wc)
Profundidad (cm)
LAB- 1er Ciclo
CALC-1er Ciclo
LAB- 2do Ciclo
CALC- 2do Ciclo
LAB- 3er Ciclo
CALC- 3er Ciclo
Umbral "Cc"
VR #3


Perfil de Cloruros MR+N2%
d)
Cloruros Totales (%Wc)
Profundidad (cm)
LAB- 1er Ciclo
CALC-1er Ciclo
LAB- 2do Ciclo
CALC- 2do Ciclo
LAB- 3er Ciclo
CALC- 3er Ciclo
Umbral "Cc"
VR #3


Perfil de Cloruros MR+N3%
e)
Cloruros Totales (%Wc)
Profundidad (cm)
LAB- 1er Ciclo
CALC-1er Ciclo
LAB- 2do Ciclo
CALC- 2do Ciclo
LAB- 3er Ciclo
CALC- 3er Ciclo
Umbral "Cc"
VR #3


Perfil de Cloruros MR+S1%
f)
Cloruros Totales (%Wc)
Profundidad (cm)
LAB- 1er Ciclo
CALC-1er Ciclo
LAB- 2do Ciclo
CALC- 2do Ciclo
LAB- 3er Ciclo
CALC- 3er Ciclo
Umbral "Cc"
VR #3

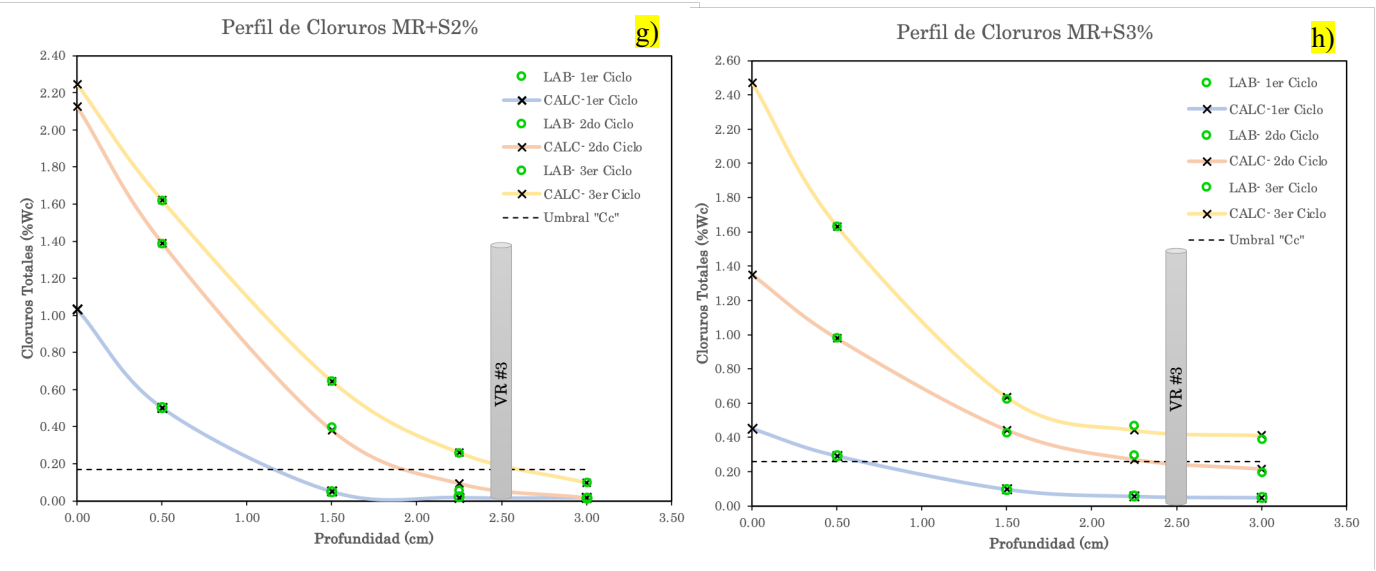


Figura 72. *Perfiles de cloruro de las mezclas de concreto, 1er ciclo (56 días), 2do ciclo (90 días), 3er ciclo (180 días). a) Perfil de cloruros de MR; b) Perfil de cloruros de MR+CIA; c) Perfil de cloruros para MR+N1%; d) Perfil de cloruros para MR+N2%; e) Perfil de cloruros para MR+N3%; f) Perfil de cloruros para MR+S1%; g) Perfil de cloruros para MR+S2%; h) Perfil de cloruros para MR+S3%.*

En la figura 72-a se puede observar la evolución de los perfiles de cloruros para la mezcla de referencia, cabe destacar que, pese a la exposición, el contenido de cloruros totales calculado a 180 días no logró superar el contenido crítico de 0.40% Wc a la profundidad de 2.50 cm en donde se supone está colocado el acero de refuerzo, por lo tanto, la capa pasiva no logró destruirse para dar paso a la activación de la varilla. Por otro lado, en la figura 72-b en el tercer ciclo de medición a 180 días, se aprecia que el valor de cloruros totales calculados de 0.39% Wc sobrepasa levemente el umbral de cloruros de 0.34% Wc. Así mismo, el comportamiento de la mezcla con adición de nopal en 1% observado en la figura 71-c a la profundidad de 2.50 cm mostró que el contenido de cloruros calculado para el tercer ciclo de exposición es de 0.30% Wc sobrepasó el umbral de cloruros de 0.26% Wc. Para la mezcla con adición de 2% de nopal ilustrada en la figura 72-d la tendencia fue la misma, en el tercer ciclo el valor total de cloruros calculado superó el valor crítico de cloruros de 0.20% Wc a una profundidad de 2.50 cm. Con respecto a la mezcla de nopal con 3% de adición mostrada en la figura 72-e, el comportamiento fue

similar, en el tercer ciclo de medición, el contenido de cloruros totales de 0.12% Wc, superó el umbral de 0.12% Wc, en la profundidad de 2.50 cm. Por otro lado, para la mezcla con adición de sábila en 1% mostrada en la figura 72-f, en el tercer ciclo de exposición se puede observar que el contenido de cloruros totales a la profundidad de 2.50 cm sobrepasa el valor critico de cloruros de 0.10% Wc. Así mismo, para la mezcla con 2% de adición de sábila ilustrada en la figura 72-g a 180 días de exposición se puede notar que el contenido de cloruros a una profundidad de 2.50 cm es mayor al valor del umbral de 0.16%. Por último, en la figura 72-h se muestra el comportamiento de la mezcla con 3% de adición de sábila, en donde a la edad de 90 días de exposición (2^{do} ciclo) el valor del contenido de cloruros de 0.27% sobrepasa el valor crítico de cloruros de 0.26%, lo cual indica que ocurrió la destrucción de la capa pasiva que otorga protección al acero de refuerzo dando paso a la etapa de iniciación.

Concluido el análisis del comportamiento de los perfiles de cloruros, por medio de la ecuación de la segunda Ley de Fick con los valores reales determinados de los coeficientes “Cs”, “Co”, “D”, el valor de umbral medido en laboratorio, y una propuesta de distancia que recorren los iones cloruro para llegar al acero de refuerzo se despejó de la ecuación la variable “t” que indica el tiempo de iniciación de la corrosión. Para cada una de las mezclas de concreto. En la tabla 19 se muestran los valores obtenidos de los tiempos de iniciación de la corrosión, del coeficiente de difusión, y de la concentración superficial de cloruros a 3 edades de exposición (56 días, 90 días, 180 días).

Como se puede observar en la tabla mostrada, para la mezcla de referencia en el primer ciclo con edad de 56 días, no fue posible determinar el tiempo de iniciación de la corrosión, ya que el umbral de cloruros obtenido en el laboratorio supera la concentración de cloruros en la superficie, por lo tanto, no es apropiado usar la Ley de Fick ya que no existe un gradiente Δ de concentración de una zona de mayor concentración a una zona de menor concentración.

***Tabla 19**. Parámetros obtenidos a través de la segunda Ley de Fick para las mezclas de concreto.*

Mezclas	Ciclos	Cs (%Wc)	D (cm^2/año)	t (meses)
MR	1er / 56 días	0.295	1.359	–
	2do / 90 días	0.972	2.156	53
	3er / 180 días	1.111	1.960	57
MR+CIA	1er / 56 días	0.621	0.980	266
	2do / 90 días	1.527	2.518	24
	3er / 180 días	1.697	3.621	16
MR+N1%	1er / 56 días	0.656	1.840	73
	2do / 90 días	2.082	2.574	16
	3er / 180 días	2.209	2.310	17
MR+N2%	1er / 56 días	0.895	1.713	38
	2do / 90 días	1.914	2.865	13
	3er / 180 días	3.010	1.400	9
MR+N3%	1er / 56 días	1.015	1.263	15
	2do / 90 días	2.746	1.752	13
	3er / 180 días	2.266	1.297	19
MR+S1%	1er / 56 días	1.370	0.893	32
	2do / 90 días	1.770	2.358	11
	3er / 180 días	1.527	2.573	11
MR+S2%	1er / 56 días	1.032	1.612	29
	2do / 90 días	2.124	2.519	12
	3er / 180 días	2.246	1.931	14
MR+S3%	1er / 56 días	0.449	3.066	79
	2do / 90 días	1.349	2.911	9
	3er / 180 días	2.469	0.890	1

Para una mejor visualización del comportamiento del coeficiente de difusión en el transcurso del tiempo de exposición en la figura 73 se ilustran los resultados obtenidos mediante una gráfica de líneas.

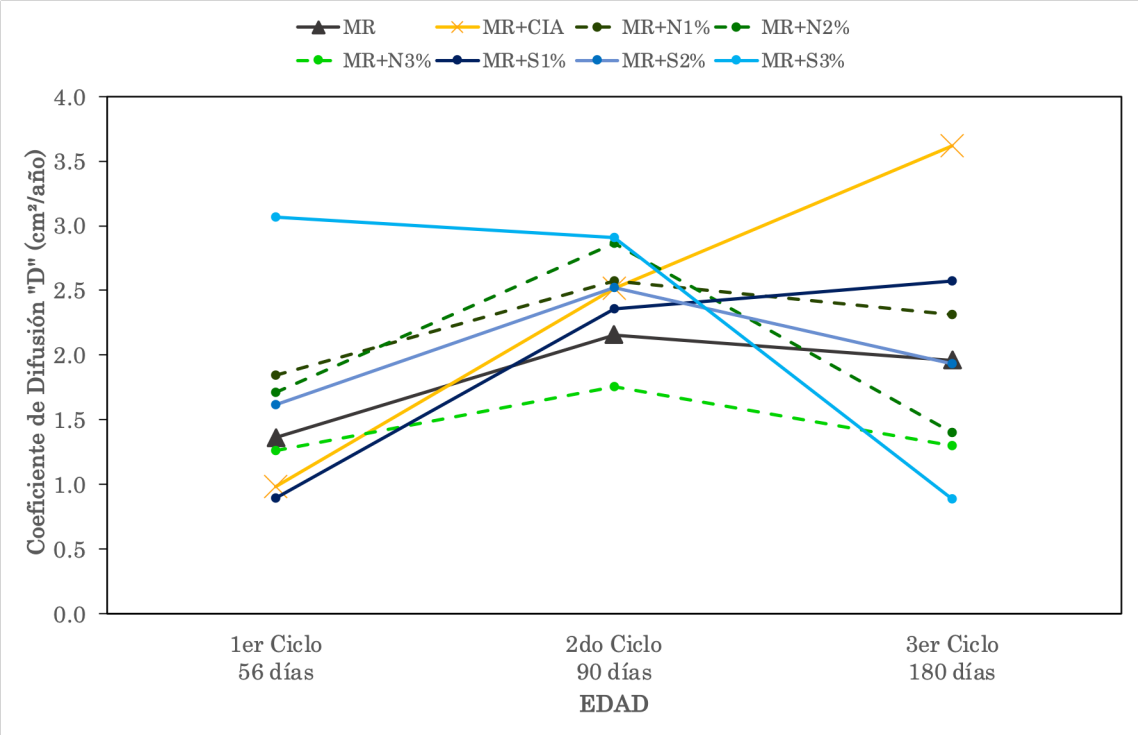


***Figura 73**. Comportamiento del coeficiente de difusión a lo largo del tiempo de exposición a cloruros.*

Es importante mencionar que el comportamiento del coeficiente de difusión está altamente relacionado con la estructura porosa del concreto; así como otros factores como el ambiente al que se encuentre expuesto, la capacidad de enlace de la matriz, la permeabilidad y la tortuosidad. Por lo tanto, se puede concluir que a relaciones a/c altas el coeficiente de difusión aumentará, ya que existe una matriz menos densa, en la que se generan más poros. A mayor edad de exposición de la estructura el coeficiente tiende a disminuir, al menos en concretos con CPO ya que la matriz tiende a densificarse con el paso del tiempo debido a la reacción de los productos de hidratación logrando así una microestructura menos porosa que a edades tempranas. Suponiendo que será más difícil que los iones de Cl^- se difundan en la matriz.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en la figura 73 se puede observar que el comportamiento a la edad de 90 días para la mayoría de las mezclas fue similar, en donde cumple con la disminución del coeficiente para 180 días, dado a que los productos de hidratación tienden a reaccionar y densificar la matriz, a excepción del coeficiente para la

mezcla con inhibidor de corrosión (MR+CIA) y sábila con 1% de adición en donde a mayor edad presentaron mayor coeficiente de difusión. La mezcla de referencia en el último ciclo de análisis a 180 días tuvo un coeficiente de difusión de 1.96 cm^2/año, mientras que las adiciones con nopal en 2% y 3% lograron disminuir este coeficiente a 1.40 cm^2/año y 1.29 cm^2/año respectivamente. De la misma forma las adiciones de sábila en 2% y 3% lograron disminuir este coeficiente a valores de 1.93 cm^2/año y 0.89 cm^2/año respectivamente. El resto de las mezclas (MR+CIA, MR+N1% y MR+S1%) aumentaron el coeficiente de difusión.

Sin embargo, no se puede concluir qué mezcla es más o menos efectiva, ya que se puede tener un coeficiente de difusión muy bajo, pero el contenido de cloruros que se requiere para la despasivación de la varilla es muy bajo, por consiguiente, la etapa de iniciación ocurrirá primero qué en una mezcla con un coeficiente de difusión bajo, pero con un umbral de cloruros alto. Por lo tanto, en la figura 74 se muestra una gráfica de barras para representar el tiempo en el que se alcanza una concentración de [Cl^-] mínima suficiente que podría dar inicio a la corrosión para cada mezcla de concreto con la evolución a diferentes ciclos monitoreados.

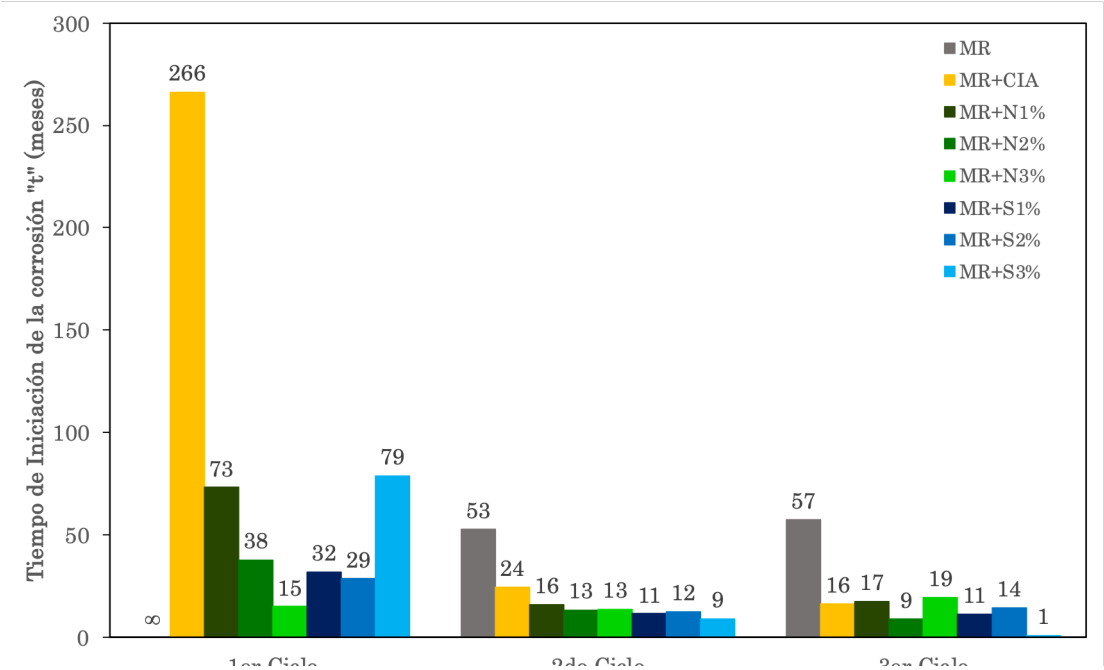


***Figura 74**. Tiempo de iniciación de la corrosión a diferentes edades de exposición a cloruros.*

En la figura mostrada previamente se puede evidenciar que las adiciones de nopal, sábila e incluso el aditivo inhibidor de la corrosión a una edad de 180 días de exposición a cloruros disminuyeron el tiempo de iniciación de la corrosión en más del 50% con respecto a la mezcla de referencia.

Así mismo, en la figura 75 se puede evidenciar que el contenido crítico de cloruros (umbral) necesario en la interfaz acero-concreto para que ocurra la despasivación de la varilla y de comienzo a la etapa de iniciación de la corrosión fue menor para todas las mezclas con respecto a la de referencia. Algo interesante de destacar es que a mayor adición del nopal el umbral disminuía, sin embargo, por el contrario, para las mezclas de sábila, a mayor adición el umbral aumentaba.

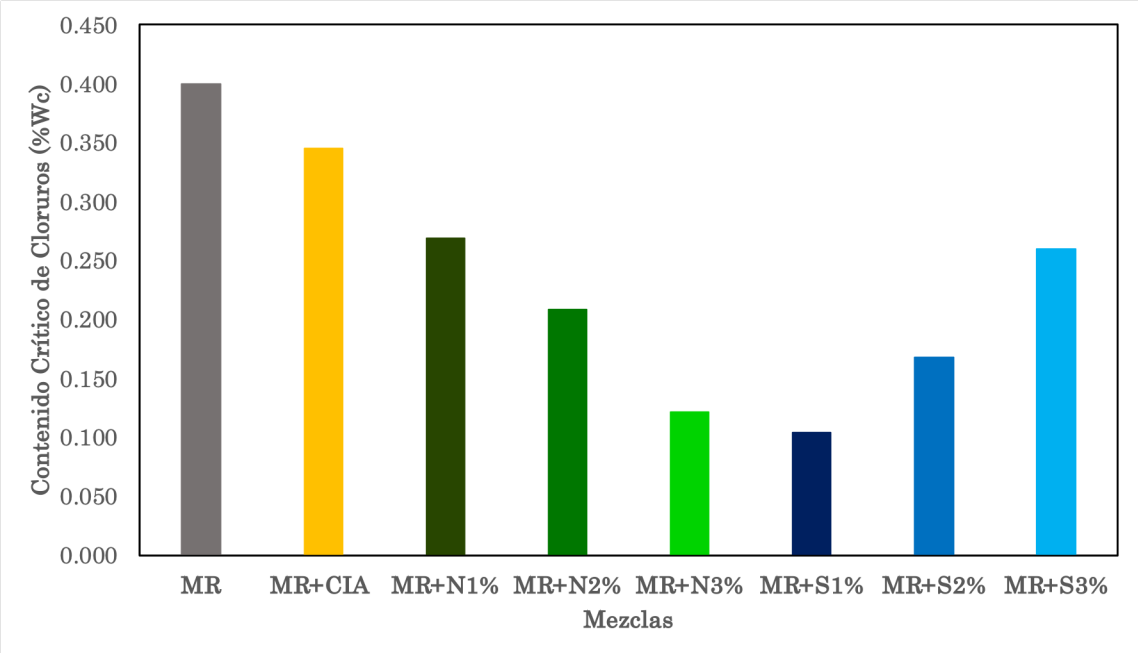


***Figura 75**. Contenido crítico de cloruros de las mezclas de concreto.*

Como se mencionó anteriormente, los cloruros totales son la sumatoria de los cloruros libres y los cloruros fijados, en donde a los cloruros libres se les atribuye el inicio de la corrosión ya que son los que viajan libremente en la solución de poro y reaccionan en la interfaz del acero de refuerzo. Sin embargo, los cloruros fijados ya sea (física o químicamente) desempeñan un rol importante, ya que pueden retrasar efectivamente el

transporte de cloruros a través del concreto y a su vez el inicio de la corrosión como se explicó en el apartado 2.1.4.5 de este proyecto.

Para poder determinar el contenido de cloruros fijados calculado fue necesario emplear los isotermas de fijación de cloruros de Tutti (Ec. 17), Langmuir (Ec. 18) y Freundlich (Ec. 19). En donde cada modelo matemático relaciona los cloruros fijados ("Cb") contra los cloruros libres ("*Cf*"). Mostrados en las siguientes ecuaciones.

$$Cb = \alpha Cf \tag{17}$$

$$Cb = \frac{\alpha Cf}{(1 + \beta Cf)} \tag{18}$$

$$Cb = \alpha Cf^{\beta} \tag{19}$$

A partir de las ecuaciones mostradas previamente se realizó una propuesta de valores para Alpha "α" y Betha "β" en cada una de las ecuaciones, para calcular un valor de "Cb" preliminar, posterior a esto se minimizó el error de los cuadrados con el valor de "Cb" obtenido aritméticamente para así obtener los valores reales de las constantes. Concluido esto, se graficaron los valores reales de "Cb" para cada isoterma junto con los aritméticos, el objetivo fue seleccionar el isoterma que más se ajustara a los datos de cloruros fijados obtenidos aritméticamente a partir de los cloruros totales y libres. Para el análisis de datos el isoterma que más se ajustó en todas las mezclas fue el de Langmuir.

Una vez seleccionado el isoterma se procedió a determinar la fijación de cloruros la cual está dada por la siguiente ecuación. En donde "K" es el coeficiente de fijación y "*CLf*" representa los cloruros límite de fijación.

$$Cb^{-1} = (K * Cf)^{-1} + CLf^{-1} \tag{20}$$

Dichos valores se obtienen a partir de graficar el inverso de cloruros libres (1/Cf) versus el inverso de cloruros fijados (1/Cb). En donde "K" representa la pendiente de la recta y "CLf" la intersección con el eje "y".

El procedimiento descrito anteriormente se realizó para cada una de las ocho mezclas a 3 ciclos de exposición (1er /56 días; 2do / 90 días y 3er / 180 días). Debido a que el cálculo es repetitivo, y las gráficas son muy similares, se optó por mostrar solamente una gráfica de cada paso. En el Apéndice I se muestran las gráficas para cada mezcla a cada edad correspondiente.

En la figura 76 se muestran los isotermas de fijación ya calculados contra los valores obtenidos de laboratorio para la mezcla de referencia. Como se puede observar, el isoterma de Langmuir es el más apegado a la relación cloruros libres Vs cloruros fijados de laboratorio. Por lo tanto, es el seleccionado para determinar los parámetros de fijación de cloruros.

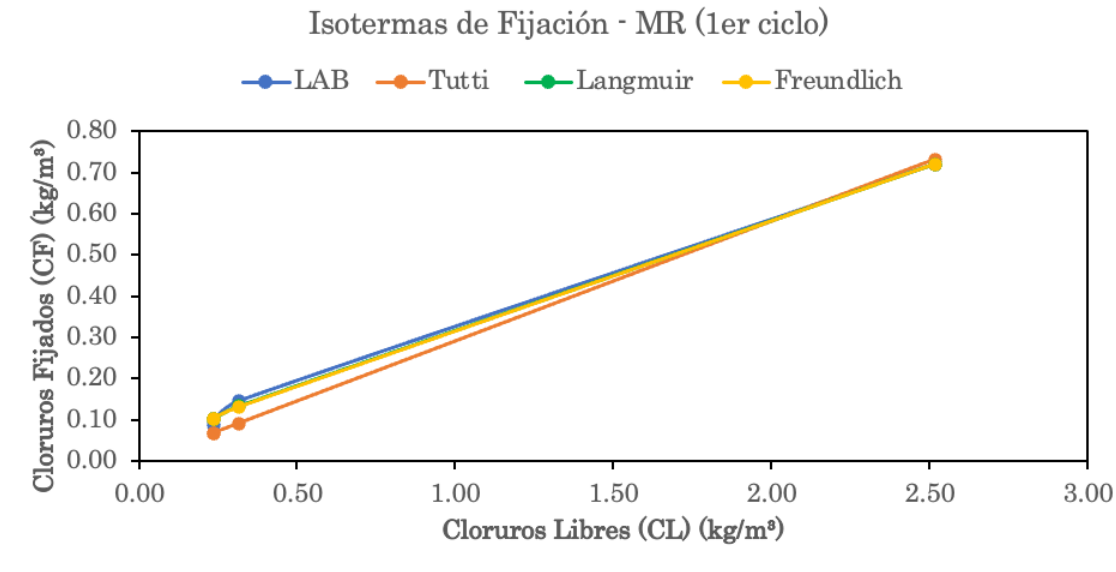


***Figura 76**. Determinación de los isotermas de fijación para la mezcla de referencia.*

Posteriormente se calculan los inversos del contenido de cloruros libres de laboratorio y contenido de cloruros fijados calculados por Langmuir (ya que fue el isoterma que más se ajusta a los valores de cloruros fijados de laboratorio). En la figura 77 se observan los resultados graficados para la misma mezcla de referencia a la edad de 56 días.

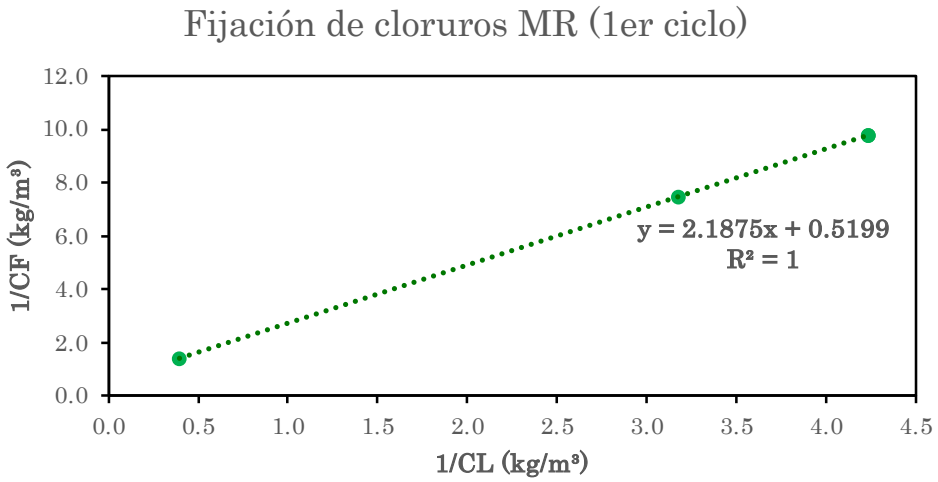


***Figura** 77. Fijación de cloruros de la mezcla de referencia a 56 días de edad.*

En la imagen previa se puede observar que el coeficiente de fijación “K” para la mezcla de referencia a 56 días de edad es de 2.18% y la capacidad de cloruros límite de fijación “CLf” es de 0.52kg/m^3.

Descrito el procedimiento que se siguió para la obtención de los parámetros, en la figura 78 y 79 se muestran los resultados para el coeficiente de fijación y contenido de cloruros límite de fijación respectivamente.

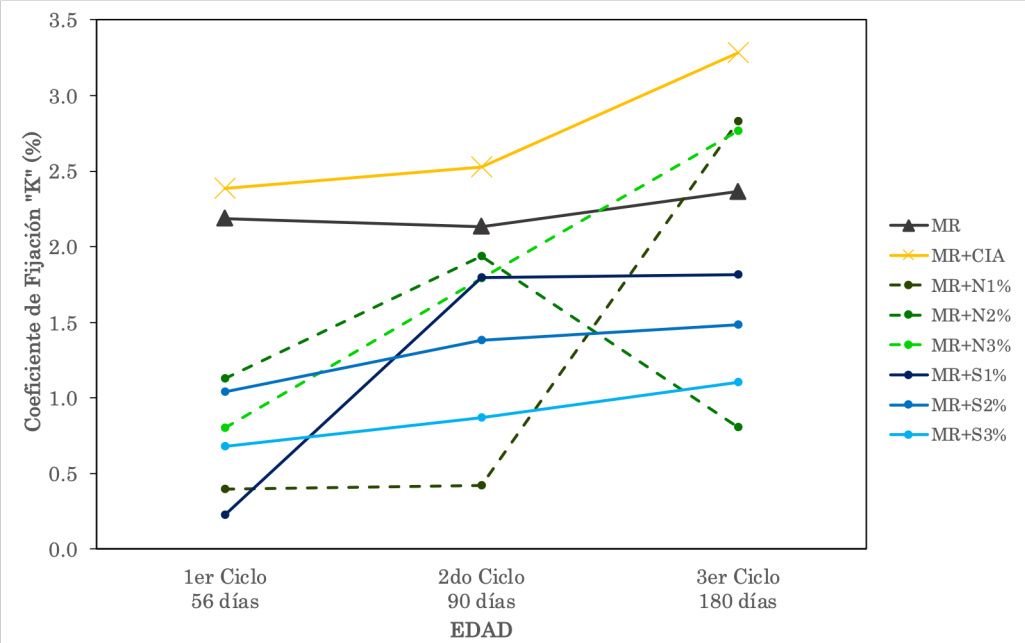


***Figura 78.** Coeficiente de fijación "K" de las mezclas de concreto expuestas a cloruros.*

La figura anterior muestra que el coeficiente de fijación de las mezclas de concreto a 180 días de exposición con adiciones de sábila en todos los porcentajes es mucho menor a la de referencia, así como la adición de nopal en 2%. Por el contrario, el aditivo inhibidor de la corrosión, y la adición del nopal en 1% y 3% presentaron mayor coeficiente de fijación que la mezcla de referencia. Cabe mencionar que se desconoce si la capacidad de fijación es química o por adsorción.

Por otro lado, la cantidad de cloruros límites de fijación que tenía cada mezcla fue disminuyendo conforme aumentaba la edad de exposición tal como se muestra en la figura 79. Se puede notar que a la edad de 56 días la mezcla de referencia tenía 0.52kg/m^3 de fijación, seguida de las mezclas con adición de nopal al 3% y 2% con 0.53 kg/m^3 y 0.51 kg/m^3 respectivamente. Al término de la exposición de 180 días la cantidad de cloruros límite de fijación disminuyó en más del 50% para todas las mezclas. Siendo la mezcla de referencia con mayor porcentaje de fijación de cloruros con 0.14 kg/m^3, seguida de las adiciones de sábila en 1% y 2% con 0.06 kg/m^3 y 0.05 kg/m^3 respectivamente. La cantidad de cloruros límite de fijación puede estar condicionada por la matriz cementante, la cantidad de ferroaluminato tetracálcico, la cantidad de aluminato tricálcico y la cantidad de sulfatos.

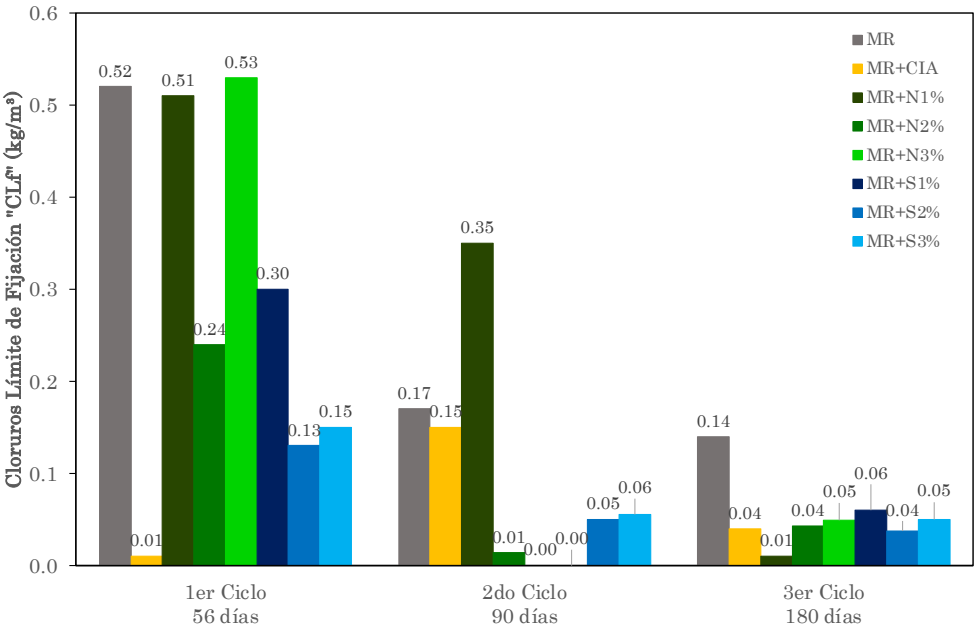


Figura 79. *Cantidad de cloruros límite de fijación de las mezclas de concreto a diferentes edades de exposición.*

5.1.4.6 Profundidad de carbonatación

Se realizó el seguimiento de la profundidad de carbonatación en 3 ciclos durante el periodo de exposición; la primera medición fue a 56 días, la segunda a la edad de 90 días y la última a 180 días. Los valores reportados son el promedio de cuatro mediciones en cada una de las cuatro caras del prisma cortado. En la figura 80 se puede observar que la mezcla con adición de sábila al 3% presentó mayores profundidades de penetración del CO_2, logrando así una carbonatación de 28.65 mm a 180 días de exposición. Cabe destacar que en las probetas electroquímicas para exposición a CO_2 mostradas en la figura 32 el acero de refuerzo se ubicó al centro del espécimen, dejando un recubrimiento desde la superficie hasta la cara de la varilla de 32.74 mm. Por otro lado, la mezcla de referencia, la mezcla con aditivo inhibidor de la corrosión y aquella con adición del 3% de nopal mantuvieron valores de profundidad de penetración del CO_2 menores a 4.0 mm a la edad de 180 días.

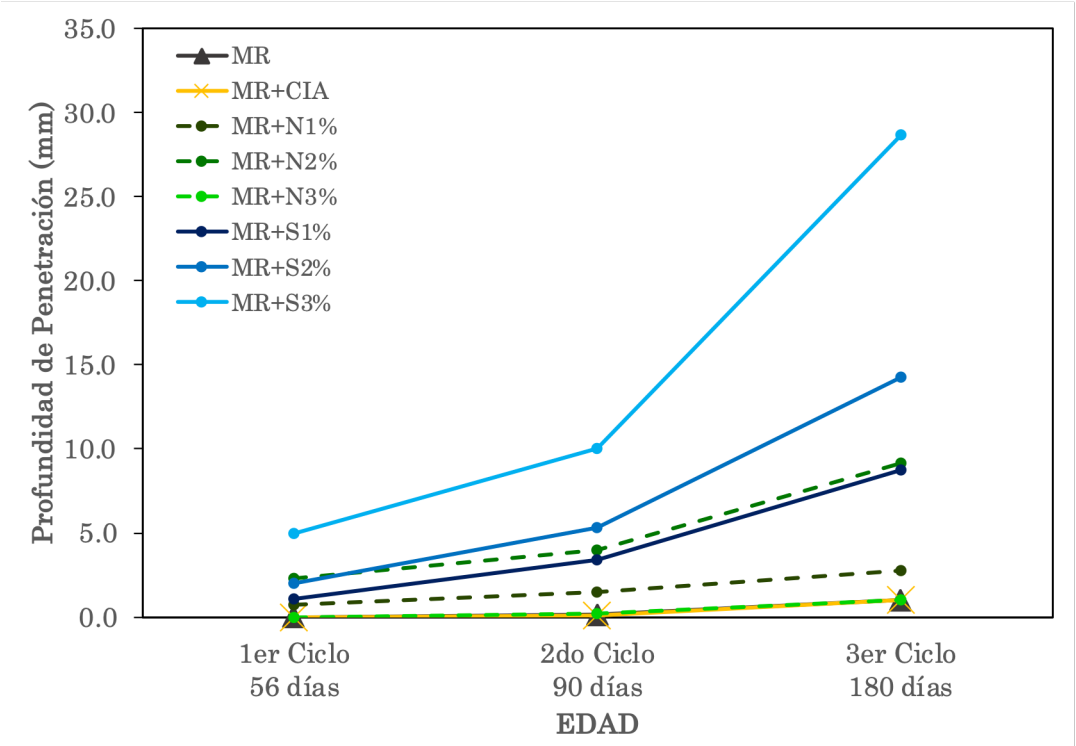
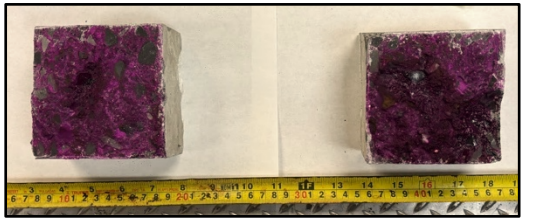
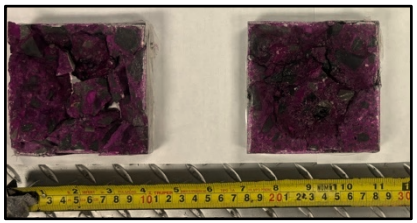
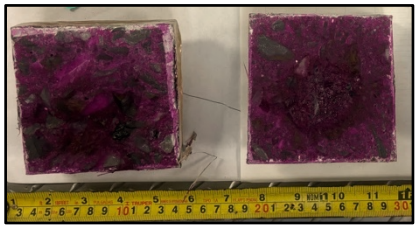
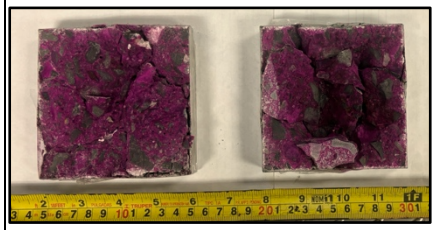
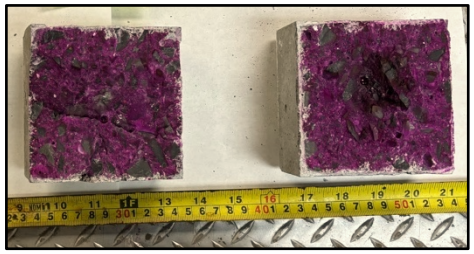
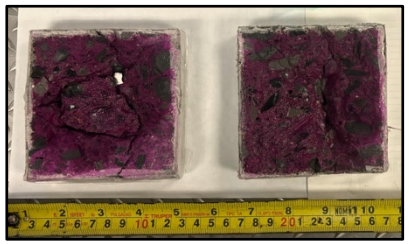
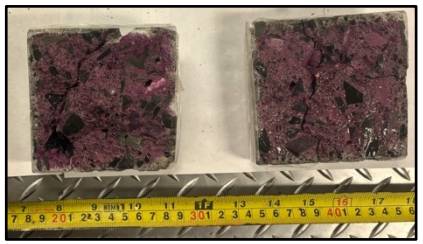
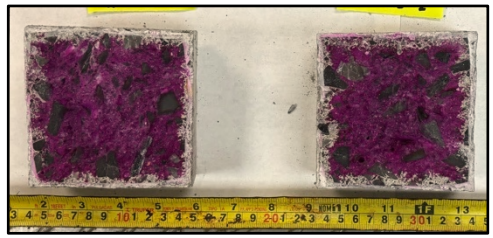
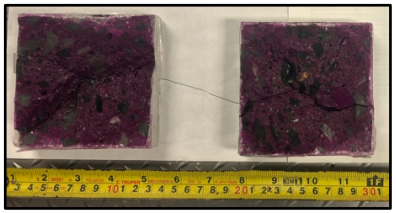
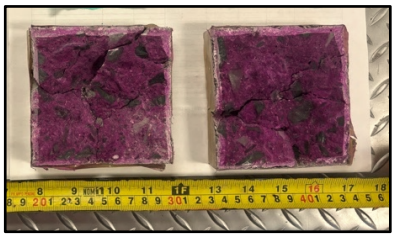
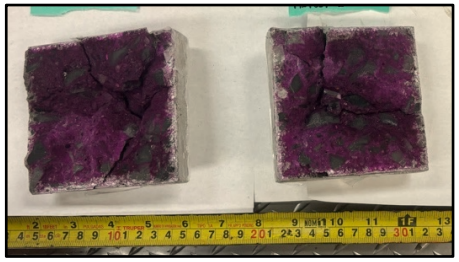
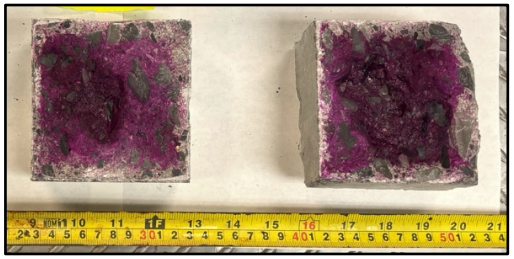
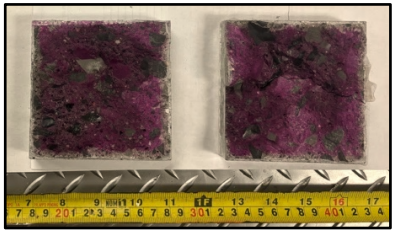
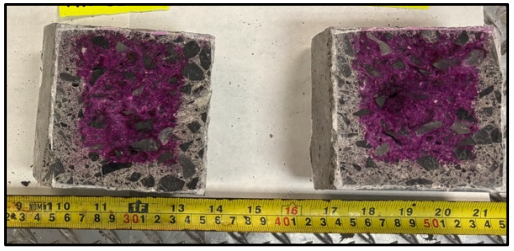
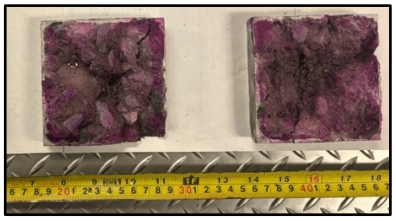
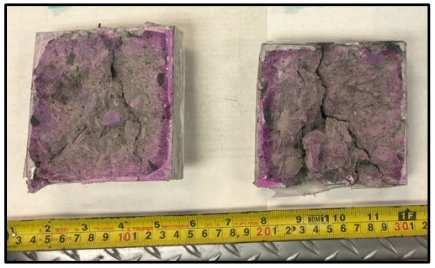
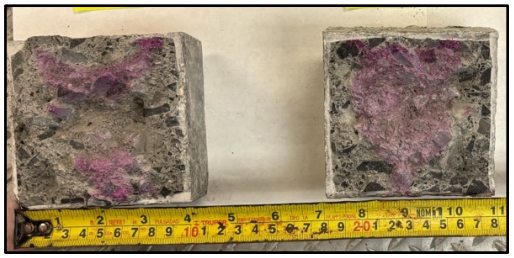


***Figura 80**. Evolución de la profundidad de carbonatación de las mezclas de concreto.*

A continuación, en la tabla 20 se mostrará un reporte fotográfico de las mediciones de carbonatación.

Tabla 20. *Reporte fotográfico de la evolución de la profundidad de carbonatación de las mezclas de concreto.*

MEZCLA	1er CICLO	2do CICLO	3er CICLO
MR			
MR+CIA			
MR+N1%			
MR+N2%			

MR+N3%			
MR+S1%			
MR+S2%			
MR+S3%			

5.1.4.7 Capacidad antioxidante

El objetivo de esto análisis fue cuantificar la cantidad de compuestos antioxidantes que se identificaran en las mezclas de concreto, sujetas a un ambiente estándar bajo condiciones de laboratorio, mezclas expuestas a cloruros y a CO_2. En tres edades, 56 días, 90 días y 180 días.

Los polvos recolectados se analizaron por triplicado utilizando métodos establecidos en la literatura [55], [56], [57]. Como punto de partida se analizaron las muestras bajo condiciones estándar a la edad de 56 días, los resultados se muestran en la tabla 21.

***Tabla 21**. Capacidad antioxidante para las mezclas de concreto sujetas a un ambiente estándar a 56 días.*

Método	Muestra	Concentración Equivalente Trólox (μM/g muestra)
ABTS	MR	N.D
	MR+CIA	16.66 ± 3.53
	MR+N1%	6.94 ± 3.75
	MR+N2%	N.D
	MR+N3%	16.66 ± 6.66
	MR+S1%	N.D
	MR+S2%	N.D
	MR+S3%	17.77 ± 1.27
DPPH	MR	N.D
	MR+CIA	N.D
	MR+N1%	N.D
	MR+N2%	N.D
	MR+N3%	N.D
	MR+S1%	N.D
	MR+S2%	N.D
	MR+S3%	N.D

N.D. = No detectado (por debajo del límite de detección).

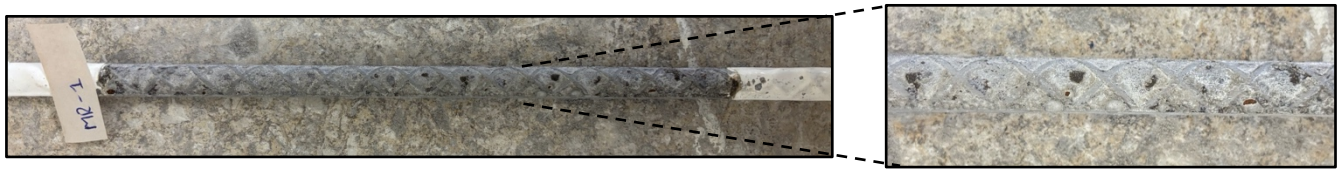
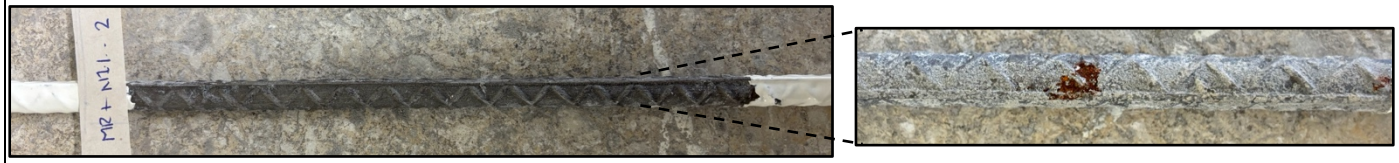
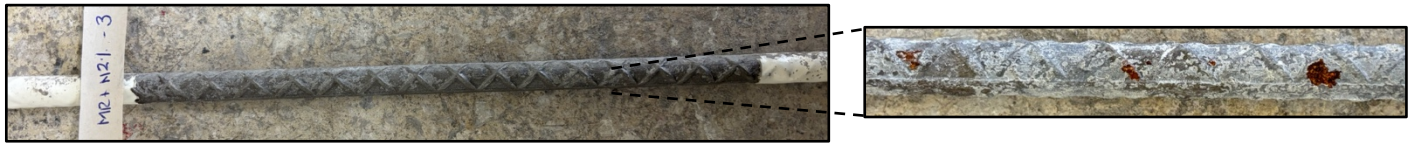
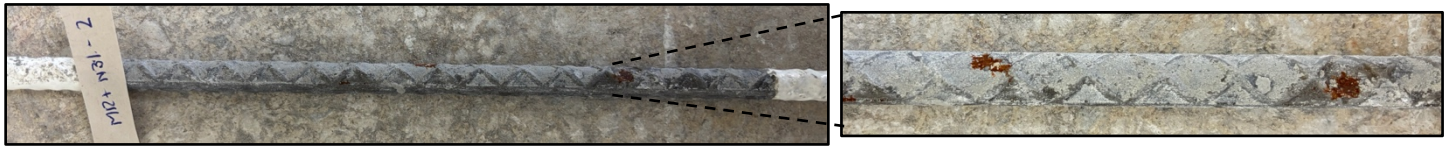
Como se puede observar los resultados de las mezclas sin exposición alguna no fueron favorables ya que no se detectaron compuestos antioxidantes que pudieran estar funcionando como captadores de electrones. Por lo tanto, se tomó la decisión de no analizar el resto de las muestras a edades tardías y bajo ambientes de exposición a cloruros y CO_2, debido a que se requiere de personal capacitado, las condiciones y disponibilidad del laboratorio son complejas, así como los insumos necesarios para las pruebas representan un costo económico muy elevado para el proyecto.

Algunas de las razones del porque no se detectaron estos compuestos pudieron deberse a que, al ser incorporados en la mezcla de concreto el porcentaje de adición es muy mínimo como para poder ser captados por las técnicas de medición, ya que, si se observan los resultados, la mezcla con 3% de nopal logró presentar 16.66 μM/g muestra de concreto, así como la adición del 3% de sábila con 17.77 M/g muestra de concreto. Otro motivo puede deberse a que son compuestos orgánicos y tienden a tener una descomposición más temprana que los materiales inorgánicos.

5.1.4.8 Reporte fotográfico de especímenes para pruebas electroquímicas.

En las tablas 22 y 23 se ilustra un reporte fotográfico de las probetas sometidas a exposición de cloruros y carbonatación respectivamente al término de la experimentación (180 días).

***Tabla 22**. Reporte fotográfico de probetas sometidas a exposición de cloruros.*

Mezclas	Probetas sometidas a exposición de cloruros
MR	
MR+CIA	
MR+N1%	
MR+N2%	
MR+N3%	

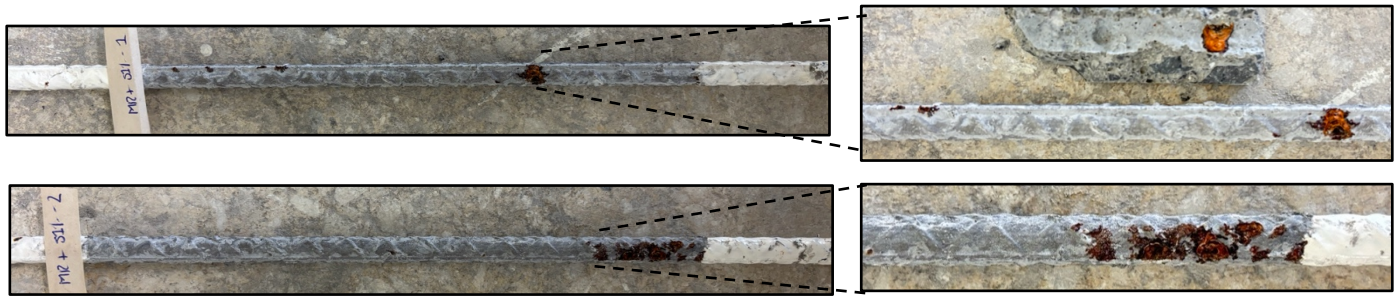
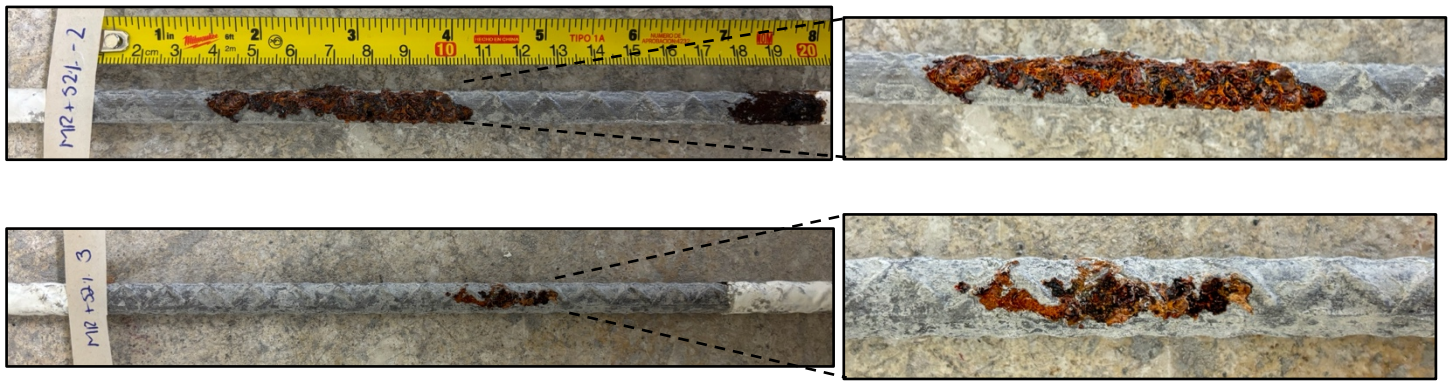
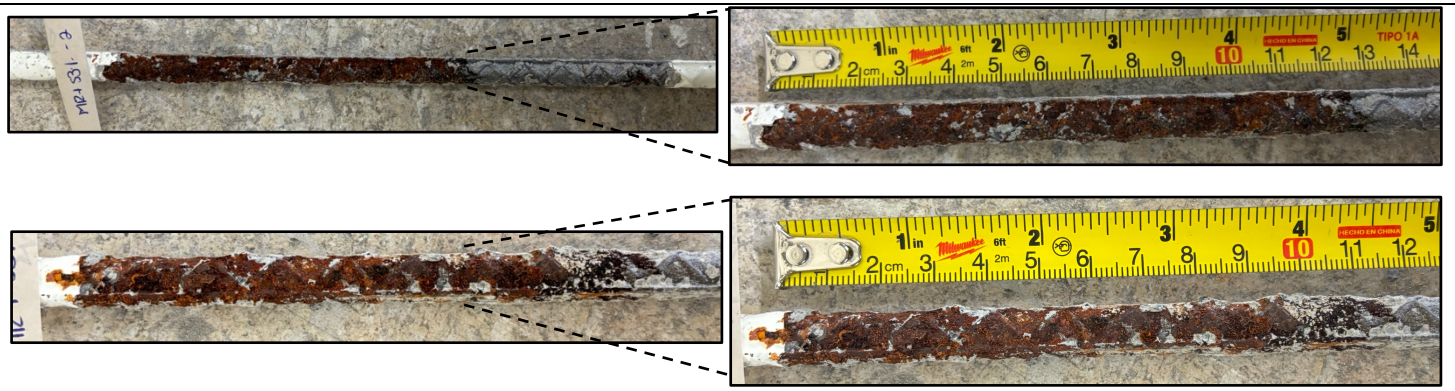
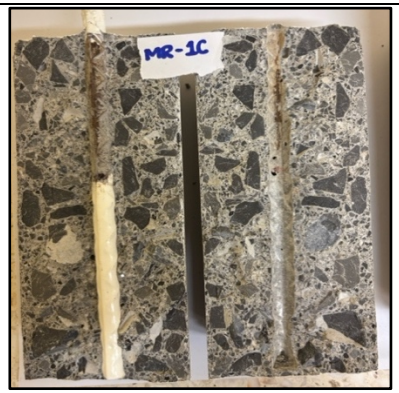
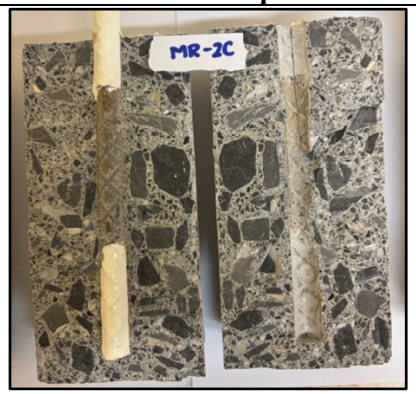
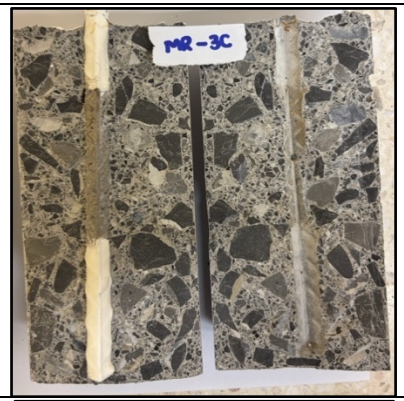
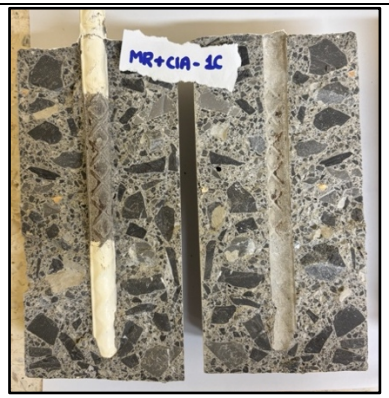
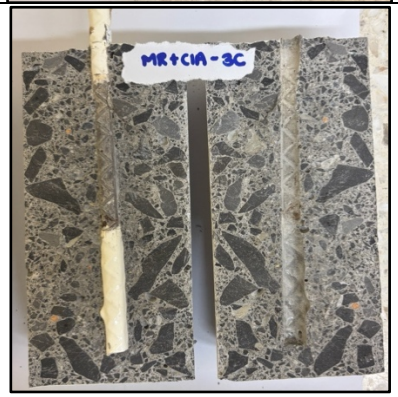
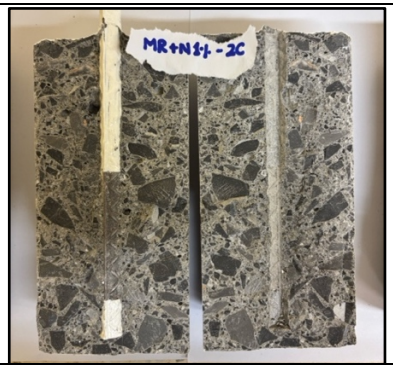
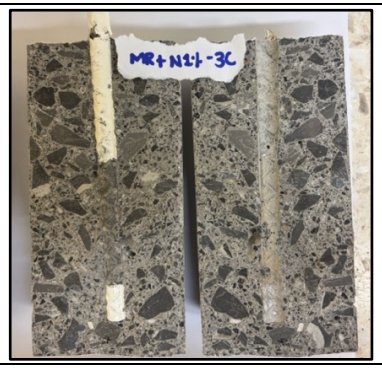
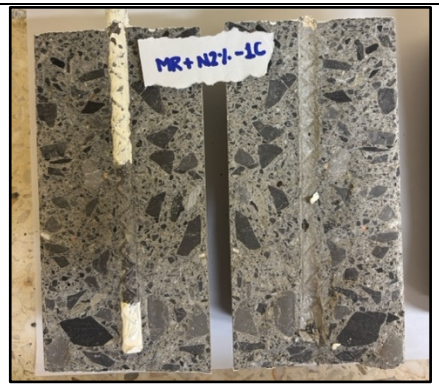
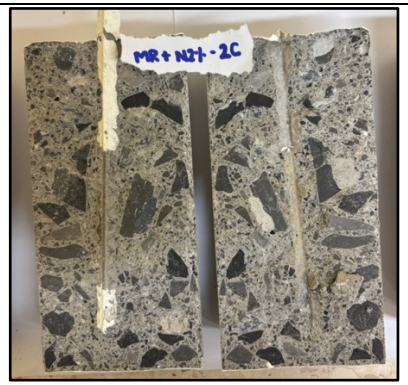
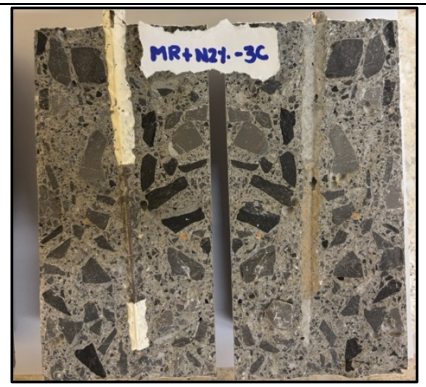
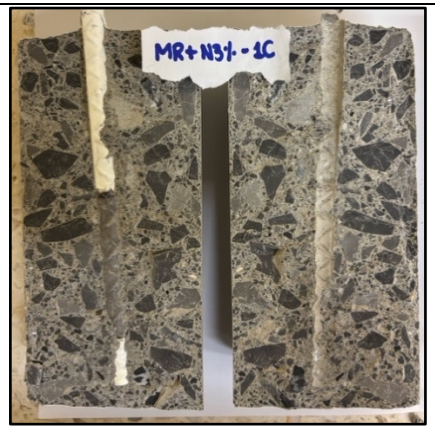
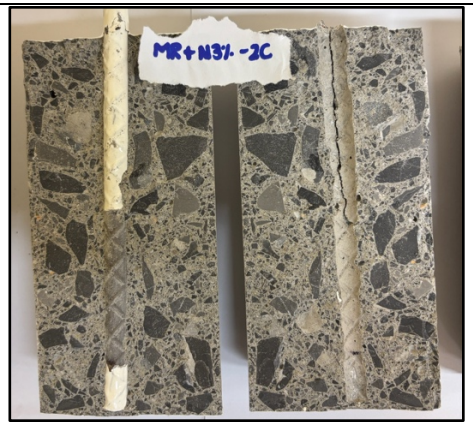
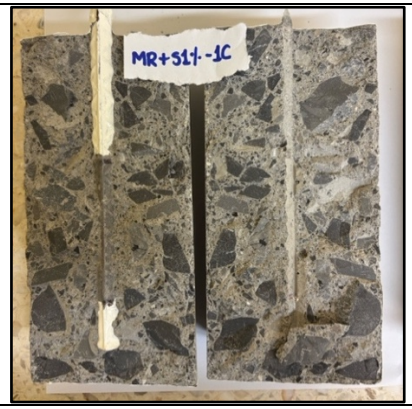
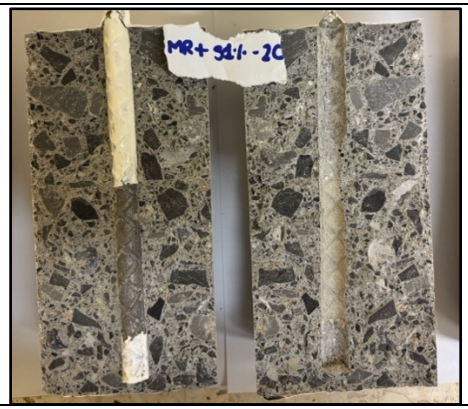
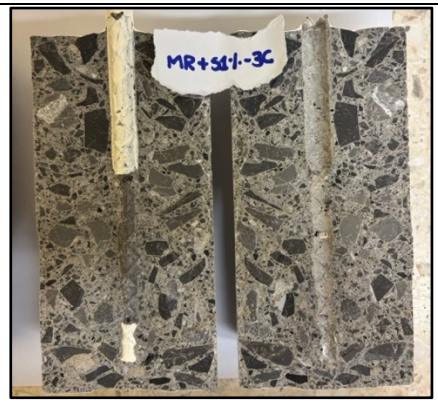
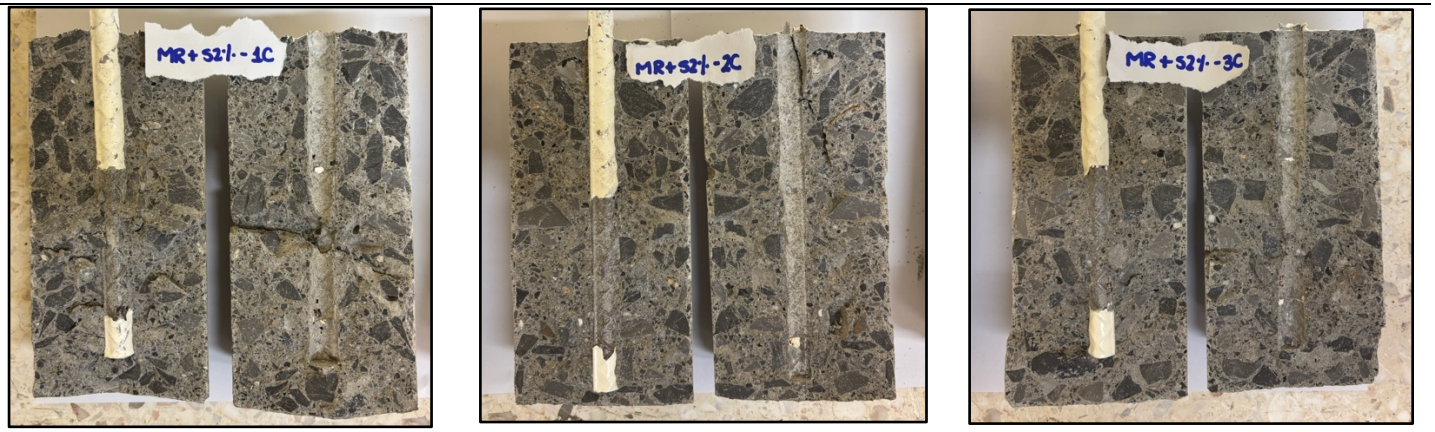
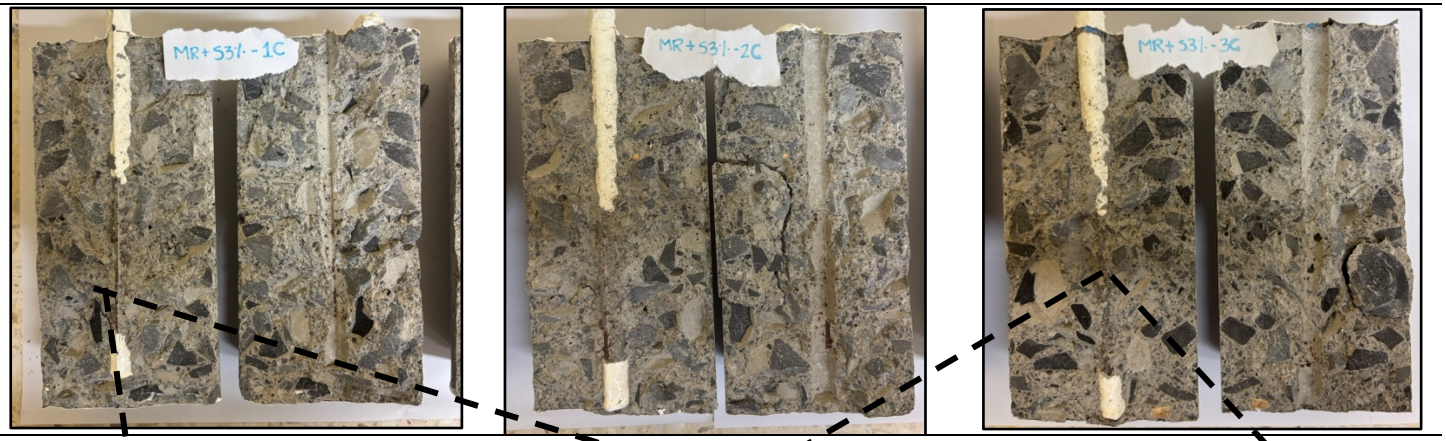
MR+S1%	
MR+S2%	
MR+S3%	

***Tabla 23**. Reporte fotográfico de probetas sometidas a exposición de CO_2.*

Mezclas	Probetas sometidas a exposición de CO_2		
MR			
MR+CIA			
MR+N1%			

MR+N2%			
MR+N3%			
MR+S1%			

MR+S2%	
MR+S3%	

CAPÍTULO 6

6.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la mayoría de los casos, al analizar las características químicas de los materiales se podrá encontrar la explicación a comportamientos físicos o mecánicos que pudieran presentar.

Por ejemplo, el comportamiento antioxidante que presentaron las mezclas de pastas de sábila y nopal se puede validar dado a la caracterización química que se evidenció en los espectros de infrarrojo correspondientes. Donde los grupos funcionales corresponden a fases minerales de Calcio y Carbono que se agrupan como compuestos fenólicos que confieren dicha capacidad antioxidante. Relacionando esto con los resultados de los difractogramas, los picos donde se pudieran identificar estos compuestos son los marcados con la letra A (Aminoácidos) y D (Mineral Diópsido) de las figuras 51 b-c respectivamente.

El comportamiento de fraguado que presentaron las mezclas de nopal y sábila fue aproximadamente 4 y 5 veces mayor al tiempo de fraguado de un concreto convencional. Si consideramos que el tiempo de fraguado de un concreto normal ronda a las 5 horas, para los concretos con el máximo porcentaje de adición de nopal y sábila (3%) fue de 19 y 27 horas respectivamente. Esto se puede atribuir a que en la caracterización química se observó que el nopal contiene sulfato de calcio (yeso), el cual en contacto con el agua actúa como un retardante del fraguado, por el otro lado la sábila contiene carbohidratos (azucares), moléculas del grupo hidroxilo (mostrado en el espectro de infrarrojo Fig. 54b-c) que se adsorben en la superficie de las partículas del cemento, impidiendo que el agua reaccione con el cemento y retrasando así la formación de cristales de silicato de calcio.

Respecto a la trabajabilidad que presentaron las mezclas de concreto con las adiciones naturales, se puede destacar que a medida que se incrementaba la adición, la trabajabilidad de las mezclas aumentaba. Al determinar las propiedades de los

materiales para establecer el diseño de mezcla, tanto la sábila como el nopal presentaron una humedad de obra del 8% lo cual se considera elevada a comparación de la arena y la grava con valores por debajo de 1%. Se puede intuir que el comportamiento que se presentó se debe a la presencia excesiva de humedad de los materiales, a pesar de realizar las correcciones por humedad y absorción en los diseños, pudieran estar comportándose como agentes de curado interno.

La resistencia a la compresión es un parámetro mecánico fundamental para aceptación o rechazo de un concreto, ya que es el indicador de cuantos kilos por centímetro cuadrado puede resistir el material. Usualmente se consideran concretos con aplicaciones estructurales aquellos con resistencias superiores a 250 kgf/cm^2. Para este proyecto se diseñó una mezcla testigo (concreto convencional) con 330 kgf/cm^2 de resistencia. Se observó que a 180 días de evaluación las mezclas con adición de sábila en todas las dosificaciones (1%, 2% y 3%) presentaron disminución de la resistencia en un 20%, 25% y 30% respectivamente contra la mezcla de referencia. Este comportamiento se puede atribuir a que no existió una adecuada densificación de la matriz cementante, así como no ocurrió una correcta hidratación de la matriz ocasionada por la composición química de la sábila en donde contenía carbohidratos y no permitieron una hidratación adecuada de las partículas de cemento. Por otro lado, a la edad de 180 días la adición del nopal en 1% incremento 5% la resistencia a compresión con respecto al concreto testigo, mientras que el resto de las dosificaciones (2% y 3%) presentaron disminución de un 15% y 20% respectivamente. Este resultado se puede deber a que es un material orgánico el que se está incorporando a la mezcla, el cual, al reaccionar químicamente con el resto de los componentes, no permite una correcta homogenización de la matriz mismo que se puede deducir del comportamiento que presentaron al fraguar; requirieron más tiempo para lograr generar los productos de hidratación que propician el endurecimiento de la matriz.

Otro parámetro fundamental al momento de la evaluación de un concreto es su durabilidad, cuan "durable" es, ante ambientes con contenidos de CO_2 y cloruros. Para las mezclas de este proyecto se realizaron pruebas electroquímicas en donde todas las probetas excepto aquellas de la mezcla con aditivo inhibidor de la corrosión comercial (MR+CIA) que estuvieron sometidas a cloruros los valores registrados de impedancia indican que existió una destrucción de la capa pasiva e inicio de la corrosión del acero de refuerzo. Esto puede corroborarse con la inspección visual, en donde las mezclas MR, MR+N1% y MR+N2% presentan leves picaduras sobre la superficie, en cambio MR+N3%, MR+S1%, MR+S2% y MR+S3% presentaron mayor corrosión en la superficie de la varilla.

Algo importante de destacar es que, de acuerdo con los resultados obtenidos electroquímicamente de potencial de corrosión para los especímenes estudiados bajo un ambiente de cloruros a una edad de 196 días indican qué; las probetas de las mezclas con adición de nopal en 1%, 2% y 3% así como las mezclas de sábila en 1%, 2% y 3% se sitúan en una zona de incertidumbre, mientras que la mezcla de referencia MR y la adicionada con aditivo inhibidor comercial (MR+CIA) se situaron en la zona con 10% de probabilidad de que se presente la corrosión. Al comparar estos resultados contra la inspección visual, podemos notar que no son muy concordantes, probablemente las mediciones en las mezclas de sábila no sean completamente representativas, ya que ni si quiera existía una correcta densificación de la matriz de forma visual. Por otro lado, para el resto de las mezclas que no concuerdan, se tendrían que tomar en consideración la batería completa de pruebas que se realizaron, ya que algunas suelen ser indicadores y se complementan con otros análisis, no se puede tomar un solo resultado como ley general verídica.

En los resultados obtenidos para la obtención de los perfiles de cloruro, específicamente para las mezclas de referencia (MR) y aquella con la adición del inhibidor de la corrosión comercial (MR+CIA) discrepan de la inspección visual realizada. Los resultados del perfil para la mezcla MR indican que el contenido de cloruros totales calculado no supero el contenido de cloruros crítico (umbral) por

lo que se concluye que la capa pasiva no logro destruirse, sin embargo, en la inspección visual se observan ligeras picaduras (lo cual concuerda con el análisis de impedancia electroquímica). Mientras que para MR+CIA, el análisis de perfil indica que el valor de cloruros totales calculados sobrepasa el umbral de cloruros, indicando así una destrucción de la capa pasiva, sin embargo, tanto en la inspección visual como en los resultados de impedancia electroquímica se evidencia que no hay presencia de corrosión. Alguna explicación a este suceso podría ser que existió algún error al momento de realizar las evaluaciones en polvo, ya que es muy delicada la prueba, y contiene pasos muy metódicos para determinar el contenido de cloruros, inclusive pudo existir alguna confusión con el registro de la muestra. Los resultados del contenido de cloruros para resto de muestras (MR+N1%, N2%, N3%, S1%, S2% y S3%) concuerdan con la inspección visual y los análisis de impedancia electroquímica.

Para las probetas sometidas a un ambiente de dióxido de carbono, en los resultados obtenidos de la prueba de impedancia electroquímica se puede observar que entre más a la derecha se muevan las gráficas, habla de una matriz más resistiva, aquella que se opone más al flujo de corriente eléctrica. Como se puede observar en la figura 63, las mezclas de sábila con 2% y 3% de adición parecer ser más resistivas, sin embargo, no se consideran estos resultados como verídicos ya que las mezclas no se densificaron adecuadamente. En la inspección visual la mezcla con 3% de sábila (MR+S3%) presento productos de corrosión, sin embargo, en la prueba de medición de carbonatación no se llegó a la interfaz acero-concreto. Una explicación a este comportamiento se puede atribuir a que la medición de la profundidad de carbonatación se realizó en especímenes prismáticos de (10x10x40cm) el procedimiento de llenado fue en dos capas, con compactación en mesa vibratoria; mientras que el procedimiento de vaciado para los especímenes cilíndricos (7.5x15cm) para medición de EIS fue en una sola capa con compactación vibratoria. Sin embargo, dado a que solo es una capa y se tiene la interferencia de la varilla, puede ser que quedarán más poros y vacíos debido a una mala

compactación en la mesa de vibrado, por consiguiente, la penetración del CO_2 en dichas probetas fue de forma más rápida que en los prismas.

En los resultados de la densidad de corriente de corrosión (figura 65) para las mezclas de concreto expuestas a cloruros se puede notar que los valores para las mezclas de sábila con 2% y 3% de adición no corresponden con las imágenes de inspección visual mostradas. Los valores indican que la densidad de corriente de corrosión es baja, mientras que las fotografías muestran productos de corrosión considerables. Una explicación a esta incongruencia posiblemente se puede atribuir a que las lecturas de la velocidad de corrosión ya no se estaban tomando de forma adecuada, dado que a partir de 126 días los especímenes drenaban completamente la solución que se les colocaba en la zona de pounding. Como se comentó previamente, no se logró una correcta densificación de la matriz, sin embargo, se optó por evaluarlas.

Para la medición de profundidad de carbonatación a los 180 días, se puede observar que las mezclas (MR, MR+CIA MR+N1%, MR+N2% y MR+N3%) presentaron penetraciones menores a 5.0 mm, mientras que las mezclas con adición de sábila en 3%, 2% y 1% (MR+S3%) mostraron una profundidad de 28.65, 14.27 y 9.10 mm respectivamente. Esto concuerda con la medición del potencial de corrosión para la mezcla de S3% ya que se ubicó en el rango con 90% de probabilidad de que se presente la corrosión, obteniendo la mayor profundidad de penetración y en la inspección visual se observan productos de corrosión. Este comportamiento se puede deber a que al momento de fabricación de la mezcla, la adición de sábila por su composición química no permite que se generen los enlaces entre las partículas de cemento y el agua, por consiguiente, no se genera una hidratación correcta de la matriz cementante, retardando los tiempos de fraguado, causando a su vez disminución de la resistencia a la compresión y por los resultados electroquímicos no se considera un concreto durable.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación y con base en la revisión bibliográfica se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Mediante las técnicas de caracterización de FTIR y DRX se logró probar que los materiales naturales *Opuntia Ficus-Indica y Aloe Vera* presentan grupos funcionales y fases minerales característicos de compuestos antioxidantes.

2. Las pruebas fitoquímicas (DPPH y ABTS) mostraron actividad antioxidante a 14 días de 70.3% y 62.1% en pastas de cemento con adición de nopal y sábila al 3% respectivamente.

3. Respecto a las propiedades en estado fresco, las adiciones de sábila y nopal en todas las dosificaciones (1%, 2% y 3%) causaron retardo del fraguado del concreto. Siendo la mezcla con 3% de adición de sábila la más tardía, presentando un fraguado final de 27 horas. El aditivo inhibidor de la corrosión comercial acelero ~1 hora el T.F.F.

4. Las adiciones de sábila en 1%, 2% y 3% mejoran la trabajabilidad de las mezclas entre 16 – 18% con respecto a la mezcla de referencia.

5. Las mezclas de concreto con adición de nopal en 2% y 3%, así como las de sábila en todas las dosificaciones presentaron un contenido de aire mayor a 3% siendo perjudicial para un concreto convencional.

6. Con el monitoreo del desarrollo de resistencia a la compresión se concluye que la adición de nopal en 1% para todas las edades evaluadas incremento la resistencia con respecto a la mezcla de referencia. A 180 días el aumento fue del 5%. Así mismo el aditivo inhibidor de la corrosión incremento la resistencia a la compresión en 14% a 180 días. Por otro lado, el resto de las mezclas (MR+N2%, MR+N3%, MR+S1%, MR+S2% Y MR+S3%) causo un decremento de dicha propiedad, hasta un máximo del 30% en todas las edades evaluadas.

7. Los resultados de resistividad bruta al paso de 196 días mostraron que todas las mezclas se ubicaron en una zona de velocidad de corrosión despreciable, exceptuando las mezclas con adición de nopal en 1% y 2%, que presentaron una velocidad baja de corrosión.

8. De acuerdo con las pruebas electroquímicas para las probetas sometidas a exposición de cloruros, a 196 días las mezclas con adición de sábila en todas las dosificaciones (1%, 2% y 3%) se ubicaron en una zona de incertidumbre de presentarse la corrosión, así como la mezcla con adición del 3% de nopal. Complementando con el análisis del contenido de cloruros, dichas mezclas superaron el contenido crítico de cloruros con lo cual da inicio el proceso de corrosión. Con el reporte fotográfico se puede corroborar que el acero de refuerzo en dichas mezclas se encontraba en la etapa de propagación, ya que se encontraron productos de corrosión visibles.

9. Las mezclas de concreto con adición de sábila, nopal e incluso el aditivo inhibidor comercial expuestas a un ambiente de 3.5% de NaCl disminuyeron el tiempo de iniciación de la corrosión en más del 50% con respecto a la mezcla de referencia.

10. Las mezclas con adición de nopal en 1% y 2% así como la mezcla con aditivo inhibidor de la corrosión presentaron un mayor coeficiente de fijación de cloruros que la mezcla de referencia a la edad de 180 días.

11. Todas las mezclas presentaron menor contenido crítico de cloruros en la interfaz acero-concreto para que de inicio la despasivación del acero de refuerzo.

12. Las pruebas electroquímicas para los especímenes expuestos al 4% de dióxido de carbono mostraron que la mezcla con adición de sábila en 3% tiene 90% de probabilidad de que se presente la corrosión, mientras que el resto de las mezclas se ubicó en la zona de 10% de probabilidad de presentarse dicho proceso. Complementando con la evolución de la profundidad de carbonatación la mezcla con 3% de adición de sábila tuvo la mayor penetración ~30 mm. En el reporte fotográfico se observa que el acero de refuerzo se encuentra posiblemente en la etapa de iniciación.

13. Las mezclas de concreto no presentaron capacidad antioxidante a la edad de 56 días, bajo un ambiente controlado de laboratorio. Una razón por la cual no fue posible la detección de compuestos que confieran la capacidad antioxidante pudo ser debido a que la adición del *opuntia ficus-indica* y *aloe vera* en 3% con respecto al peso del cemento es muy mínima, por lo tanto, en la muestra por analizar no hay materia orgánica suficiente.

14. De acuerdo con los resultados electroquímicos las adiciones de nopal y sábila no pueden ser considerados como inhibidores de la corrosión por cloruros. A diferencia del aditivo inhibidor de la corrosión comercial que si tuvo un efecto positivo con respecto a la mezcla de referencia.

RECOMENDACIONES

- De acuerdo con los resultados de caracterización química del nopal y la sábila se encontró alta presencia de SO_3. Por lo tanto, sería importante medir los cambios volumétricos (contracciones y/o expansiones) que pudieran ocasionar dichas adiciones. Así mismo la reacción alcalí-agregado por la presencia de K^-.

- Evitar el empleo de sábila en polvo como posible aditivo inhibidor de la corrosión. Así como porcentajes de nopal > 1%.

- Analizar con detalle los compuestos del nopal que pudieran interactuar en la reacción electroquímica de corrosión para poder determinar cómo es su funcionamiento.

- Se evidenció que existieron discrepancias entre los resultados electroquímicos y la inspección visual en un ambiente de exposición a cloruros para las mezclas de sábila con 2% y 3% de adición. Evidentemente estos porcentajes ya no se consideran aptos como adición por que los resultados que se obtengan no se consideran confiables dado a que no existe una integración de la matriz cementante adecuada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Antonio, T. Acosta, W. Martínez, M. María, G. Lomelí gonzález, and A. P. Gallardo, "Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto", 2010.

[2] M. Ben harb, S. Abubshait, N. Etteyeb, M. Kamoun, and A. Dhouib, "Olive leaf extract as a green corrosion inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater", *arabian journal of chemistry*, vol. 13, no. 3, pp. 4846–4856, mar. 2020, doi: 10.1016/j.arabjc.2020.01.016.

[3] V. F. Soberón, "Gestión integral de las regiones más dinámicas del territorio nacional", 2018, [online]. Available: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5545511&fecha=30/11/2018#gsc.tab=0

[4] E. Bowman, N. Thompson, D. Gl, O. Moghissi, M. Gould, and J. Payer, "International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study", NACE International Impact, 2016.

[5] A. Zomorodian and A. Behnood, "Review of corrosion inhibitors in reinforced concrete: conventional and green materials", may 01, 2023, *mdpi*. Doi: 10.3390/buildings13051170.

[6] P. B. Raja *et al.*, "Reviews on corrosion inhibitors: a short view", sep. 01, 2016, *taylor and francis ltd.* Doi: 10.1080/00986445.2016.1172485.

[7] P. B. Raja, S. Ghoreishiamiri, and M. Ismail, "natural corrosion inhibitors for steel reinforcement in concrete - a review", jun. 14, 2015, *world scientific*. Doi: 10.1142/s0218625x15500407.

[8] Y. Díaz Blanco, E. C. Menchaca Campos, C. I. Rocabruno Valdés, and J. Uruchurtu Chavarín, "Natural additive (nopal mucilage) on the electrochemical properties of concrete reinforcing steel", *revista alconpat*, vol. 9, no. 3, pp. 260–276, aug. 2019, doi: 10.21041/ra.v9i3.429.

[9] A. Torres-Acosta and l. Alejandra Díaz-Cruz, "Concrete durability enhancement from nopal (opuntia ficus-indica) additions", *constr build mater*, vol. 243, may 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118170.

[10] A. Torres-Acosta and P. Y. González-Calderón, "Opuntia ficus-indica (ofi) mucilage as corrosion inhibitor of steel in co2-contaminated mortar" *materials*, vol. 14, no. 5, mar. 2021, doi: 10.3390/ma14051316.

[11] I. J. Faustino and E. Moratto, "El uso de aditivos de origen natural integral a masas de concreto para la protección contra la corrosión del acero estructural embebido (caso de estudio: sábila) indira babilonia escallón sandy paola urango rojas estudiantes proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniera civil" 2015.

[12] H. Herrera Hernández *et al*, "Gel de aloe-vera como potencial inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo estructural aloe-vera gel as potential corrosion inhibitor for concrete steel reinforcement" [online]. Available: http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/9

[13] V. C. L. Alberto, "*Uso del aloe vera y opuntia ficus para mejorar las propiedades físicomecánicas del concreto de 245 kg/cm2, huaraz 2021*", 2021. [online]. Available: https://hdl.handle.net/20.500.12692/86020

[14] M. Bodian, D. Keinde, K. Hannawi, M. Fall, A. Darquennes, and P. W. Agbodjan, "*Evaluation of the inhibitory gel aloe vera; against corrosion of reinforcement concrete in nacl medium*", *materials sciences and applications*, vol. 15, no. 05, pp. 101–112, 2024, doi: 10.4236/msa.2024.155008.
[15] S. H. Kosmatka, "*Diseño y control de mezclas de concreto"*, Portland cement association, 2004.
[16] Jack C. Mccormac and Russell H. Brown, "*Diseño de concreto reforzado*", 2011.
[17] Guangling Song Ahmad Shayan, "*Corrosion of steel in concrete causes, detection and prediction*" jul. 1998.
[18] Manuel Alejandro Giraldo and Jorge Iván Tobón, "*Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación*", Vol 73. Medellín: dyna, 2005.
[19] Pedro Nicolás Molina Aldino, "*Estudio electroquímico comparativo de aceros al carbono utilizados como acero de refuerzo embebidos en concreto y expuestos en un ambiente marino-tropical: efecto del tratamiento térmico*", apr. 2018.
[20] Clara Escrivá Cerdán, "*Caracterización de la pasividad del acero inoxidable una en ácido fosfórico contaminado mediante técnicas electroquímicas*", mar. 2013.
[21] P. C. Borges, "*Corrosión en estructuras de concreto armado: teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones"*. Instituto mexicano del cemento y del concreto, 1998. [online]. Available: https://books.google.com.mx/books?id=03sstwaacaaj
[22] A.M. Neville, "*Tecnología del concreto"*, Instituto mexicano del cemento y del concreto: arquine ediciones, 1995.
[23] A. Del Valle Moreno, A. Torres Acosta, J. Guillén Terán, J. T. Quiroz Pérez, and P. Salinas Oidor, "*Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos*", *No 290*, 2006.
[24] F. González Díaz, "*Realcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión*", jul. 2010.
[25] M. J. Sánchez de Rojas Noguera, "*Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento*", 2004.
[26] H. Abd el-fattah, y. Abd el-zaher, and M. Kohail, "*A study of chloride binding capacity of concrete containing supplementary cementitious materials*", *sci rep*, vol. 14, no. 1, dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-62778-6.
[27] M. L. Sousa Rivetti, J. Da S. Andrade Neto, N. S. De Amorim Júnior, and D. Ribeiro Véras, "*Corrosion inhibitors for reinforced concrete*", in american concrete institute, aci special publication, american concrete institute, pp. 95–102. Doi: 10.5772/intechopen.72772.
[28] J. M. Gaidis, "*Chemistry of corrosion inhibitors*", cem concr compos, vol. 26, no. 3, pp. 181–189, apr. 2004, doi: 10.1016/s0958-9465(03)00037-4.
[29] T. A. Söylev and M. G. Richardson, "*Corrosion inhibitors for steel in concrete: state-of-the-art report*", constr build mater, vol. 22, no. 4, pp. 609–622, apr. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013.
[30] J. Tovar del Río, "*Determinación de la actividad antioxidante por dpph y abts de 30 plantas recolectadas en la ecoregión cafetera*", universidad tecnológica de pereira, 2013.

[31] A. L. Monzón, D. Vega Moreno, M. A. Suárez de Tangil Navarro, and M. R. Santos, "*Estudio de la capacidad antioxidante del aloe vera cultivado en canarias*"
[32] P. Benites *et al.*, "*Composición química, propiedades fisicas y reológicas del mucílago de aloe barbadensis miller resumen*", 2019.
[33] H. Herrera- Hernández *et al.*, "*Gel de aloe-vera como potencial inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo estructural aloe-vera gel as potential corrosion inhibitor for concrete steel reinforcement*", [online]. Available: http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/9
[34] H. Dib, M. Belarbi, M. C. Beghdad, and M. Seladji, "*Antioxidant activity of opuntia ficus-indica flowers phenolic extracts*", int j pharm sci res, vol. 5, no. 10, p. 4574, 2014, doi: 10.13040/ijpsr.0975-8232.5(10).4574-82.
[35] l. Manzanarez-Tenorio *et al.*, "*Caracterización fisicoquímica, actividad antioxidante y contenido de fenoles y flavonoides totales de nopal morado (opuntia gosseliniana) en dos etapas de coloración*", biotecnia, vol. 24, no. 3, pp. 101–106, oct. 2022, doi: 10.18633/biotecnia.v24i3.1662.
[36] C. E. Aruwa, S. O. Amoo, and T. Kudanga, "*Opuntia (cactaceae) plant compounds, biological activities and prospects – a comprehensive review*", oct. 01, 2018, *elsevier ltd*. Doi: 10.1016/j.foodres.2018.06.047.
[37] C. Andrade and C. Alonso, "*Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*", constr build mater, vol. 10, no. 5, pp. 315–328, jul. 1996, doi: 10.1016/0950-0618(95)00044-5.
[38] M. Bodian, D. Keinde, K. Hannawi, M. Fall, A. Darquennes, and P. W. Agbodjan, "*Evaluation of the inhibitory gel aloe vera against corrosion of reinforcement concrete in nacl medium*", materials sciences and applications, vol. 15, no. 05, pp. 101–112, 2024, doi: 10.4236/msa.2024.155008.
[39] F. Lee, o. Andrés, A. Torres, A. Jorge, T. Guillén, and M. M. Madrid, "*Caracterización de un sistema de refuerzo-protección en elementos de concreto reforzado dañados por corrosión, utilizando compuestos base fibras de carbón*".
[40] Y. Villagrán Z and Matiasic, "*Capacidad de fijación y adsorción de cloruros en morteros elaborados con distintos cementos*"
[41] S. Eduardo, J. Paredes, and J. L. R. Prieto, "*Corrosión del acero en elementos de hormigón armado: vigas y columnas*" dspole, apr. 2013, [online]. Available: http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24384/1/paper%20paredes-prieto.pdf
[42] I. Montanari, "*Toward a mixture design methodology for internally cured concrete that considers filling specific pore sizes caused by self-desiccation"*, 2017. [online]. Available: https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/1c18dm12k
[43] S. Galicia, O. Velázquez, V. Luna-monterrojo, and A. P. Vovides, "*Cristales de oxalato de calcio en plantas: morfología y función*" apr. 2017. [online]. Available: https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/2092-cristales-de-oxalato-de-calcio-en-plantas-morfologia-y-funcion
[44] I. Domenech, "*Diópsido: qué es, propiedades, tipos y usos*" | dimateria," apr. 2024. [online]. Available: https://dimateria.com/minerales/diopsido
[45] R. O. Cruz and M. Ángel, "*Efecto del ácido glutámico en plantas de tomate (solanum lycopersicum l.)*", apr. 2021. [online]. Available: http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/liter_ciidiroax/512

[46] M. R. Marín López, "*Disminución del contenido en p-nitroanilina de disoluciones acuosas mediante membranas líquidas en emulsión, utilizando un mecanismo de transporte facilitado tipo i*", sep. 2009, accessed: apr. 21, 2024. [online]. Available: http://hdl.handle.net/10317/1783

[47] F. Mannai, M. Ammar, J. G. Yanez, E. Elaloui, and Y. Moussaoui, "*Cellulose fiber from tunisian barbary fig 'opuntia ficus-indica' for papermaking*" cellulose, vol. 23, no. 3, pp. 2061–2072, jun. 2016, doi: 10.1007/s10570-016-0899-9.

[48] M. Andonegi, A. Irastorza, A. Izeta, K. De la Caba, and P. Guerrero, "*Physicochemical and biological performance of aloe vera-incorporated native collagen films*", pharmaceutics, vol. 12, no. 12, p. 1173, dec. 2020, doi: 10.3390/pharmaceutics12121173.

[49] D. J. M. De Lourdes Virginia and S. C. Hernández, "*Estabilización de alicina mediante su encapsulación en mucílago de nopal*" 2022. [online]. Available: https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/4127

[50] B. E. Moreno García, "*Evaluación de la actividad anti-inflamatoria de flavonoides recuperados con un tratamiento alcalino presentes en opuntia ficus indica variedad jalpa*", 2010, instituto tecnológico y de estudios superiores de monterrey. [online]. Available: http://hdl.handle.net/11285/570728

[51] M. Nayeli Domínguez Carrillo, "*Obtención y caracterización del polvo de nopal secado por aspersión*", 2017.

[52] J. Uruchurtu and J. L. Ramirez-Reyes, "*Métodos experimentales en la ciencia de la corrosión impedancia electroquímica*" 2011. [online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/271851470

[53] K. Annaba *et al.*, "*Mechanical, electrochemical (eis), and microstructural characterization of reinforced concrete incorporating natural volcanic pozzolan"* case studies in construction materials, vol. 19, dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02620.

[54] P. Garcés Terradillos, O. Troconis de Rincón, P. Castro Borges, E. E. Maldonado Bandala, and C. Andrade Perdrix, "*Recomendaciones sobre velocidad de corrosión*", sep. 2020. Doi: 10.21041/alconpatinternacional/rectec/2020-03-velocidaddecorrosion.

[55] W. Brand-Williams, M. E. Cuvelier, and C. Berset, "*Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity*", 1995.

[56] C. Drosou, K. Kyriakopoulou, A. Bimpilas, D. Tsimogiannis, and M. Krokida, "*A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts*" ind crops prod, vol. 75, pp. 141–149, nov. 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.05.063.

[57] D. A. Guzmán-Díaz, M. Z. Treviño-Garza, B. A. Rodríguez-Romero, C. T. Gallardo-Rivera, C. A. Amaya-Guerra, and J. G. Báez-González, "*Development and characterization of gelled double emulsions based on chia (salvia hispanica l.) Mucilage mixed with different biopolymers and loaded with green tea extract (camellia sinensis)*", foods, vol. 8, no. 12, dec. 2019, doi: 10.3390/foods8120677.

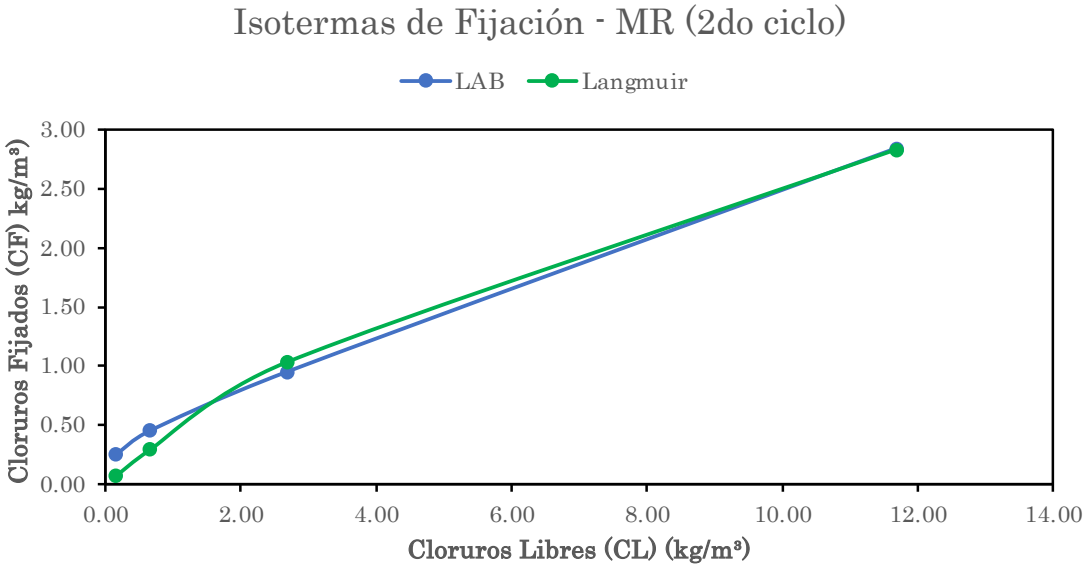
[58] P. Kumar Mehta and Paulo J.M. Monteiro, "*Concrete microstructure, properties, and materials*", 2016.

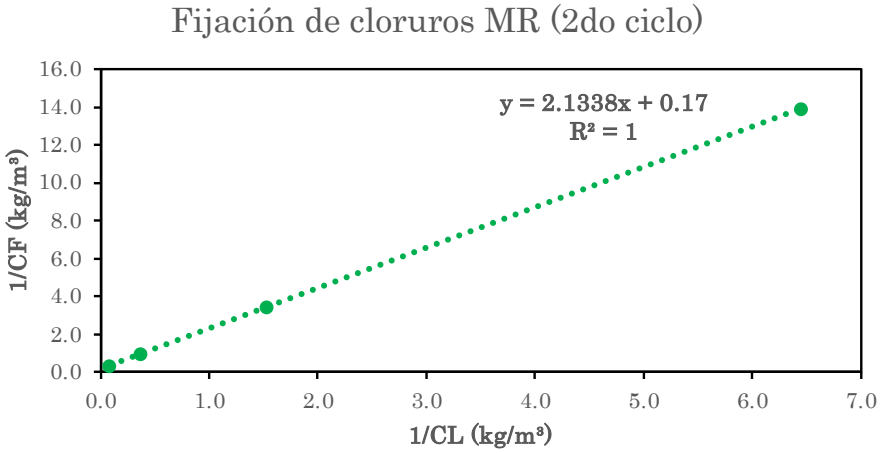
[59] Q. Yuan, C. Shi, G. De Schutter, K. Audenaert, and D. Deng, "*Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment - a review*", jan. 2009. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.004.

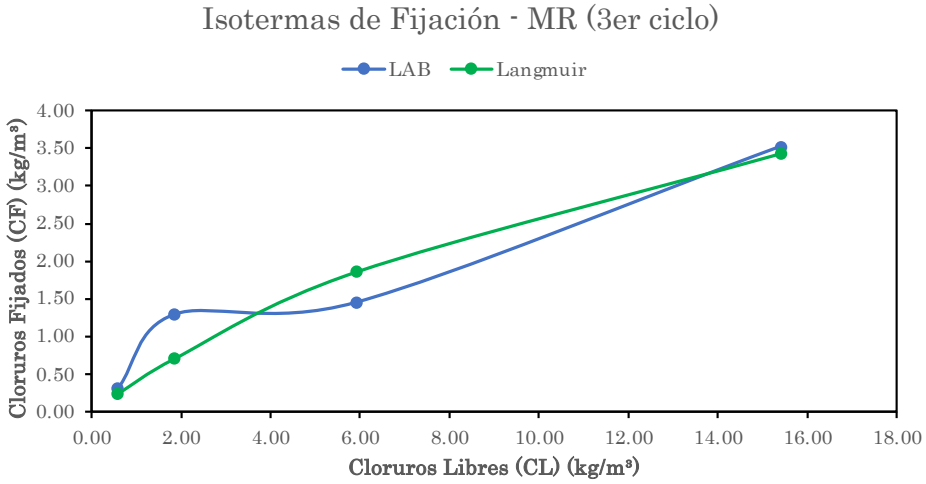
[60] M. Ormellese, F. Bolzoni, and A. Brenna, "*Effect of a nitrate-based corrosion inhibitor on carbonation-induced corrosion*" corrosion, vol. 79, no. 4, pp. 388–394, apr. 2023, doi: 10.5006/4160.

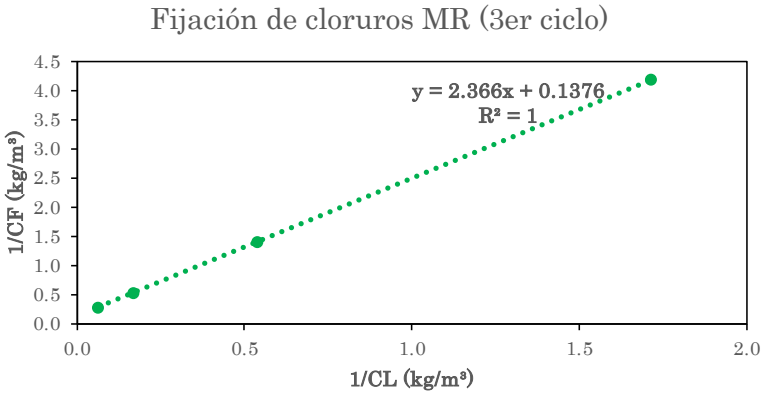
APÉNDICE I

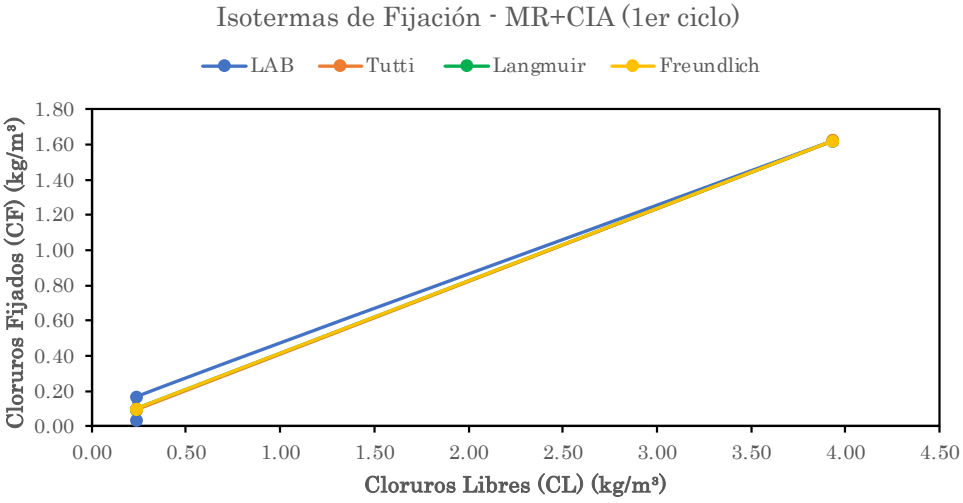
En las siguientes gráficas se muestran los isotermas de fijación para cada mezcla a su edad respectiva (1er ciclo / 56 días; 2do ciclo / 90 días y 3er ciclo / 180 días), junto con el coeficiente de fijación y el contenido límite de cloruros fijados, obtenido mediante un análisis de regresión lineal.



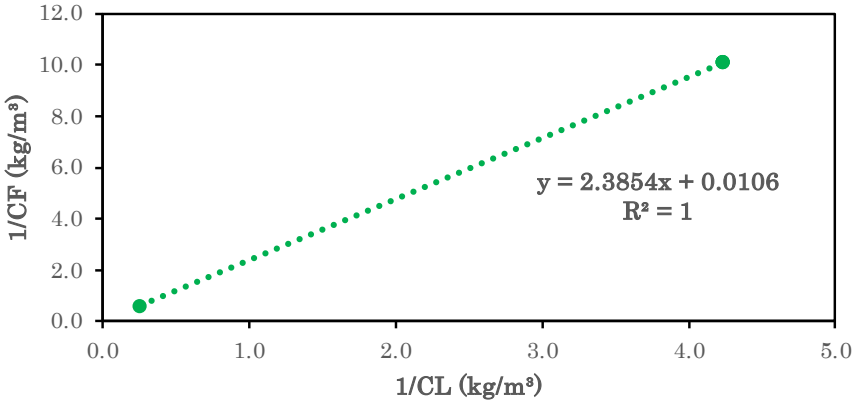



Isotermas de Fijación - MR (3er ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
2.50
3.00
3.50
4.00
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00

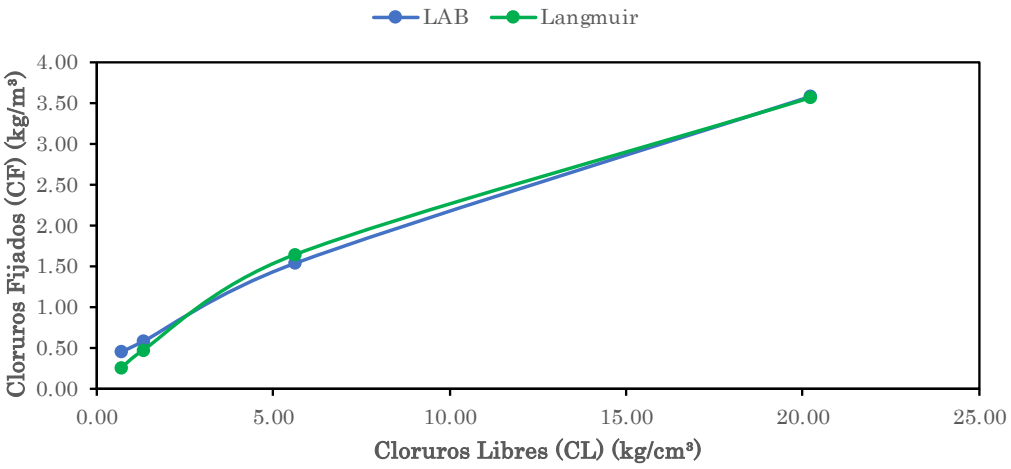

Fijación de cloruros MR (3er ciclo)
y = 2.366x + 0.1376
R² = 1
1/CF (kg/m³)
1/CL (kg/m³)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0


Isotermas de Fijación - MR+CIA (1er ciclo)
LAB
Tutti
Langmuir
Freundlich
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)
0.00
0.20
0.40
0.60
0.80
1.00
1.20
1.40
1.60
1.80
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
2.50
3.00
3.50
4.00
4.50

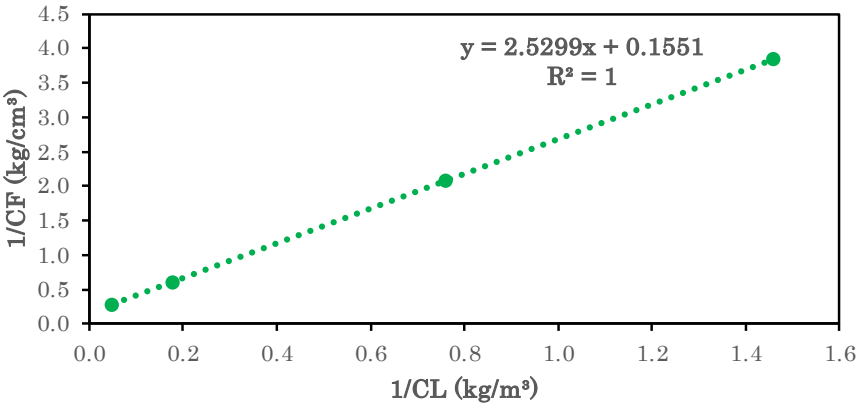
Fijación de cloruros MR+CIA (1er ciclo)

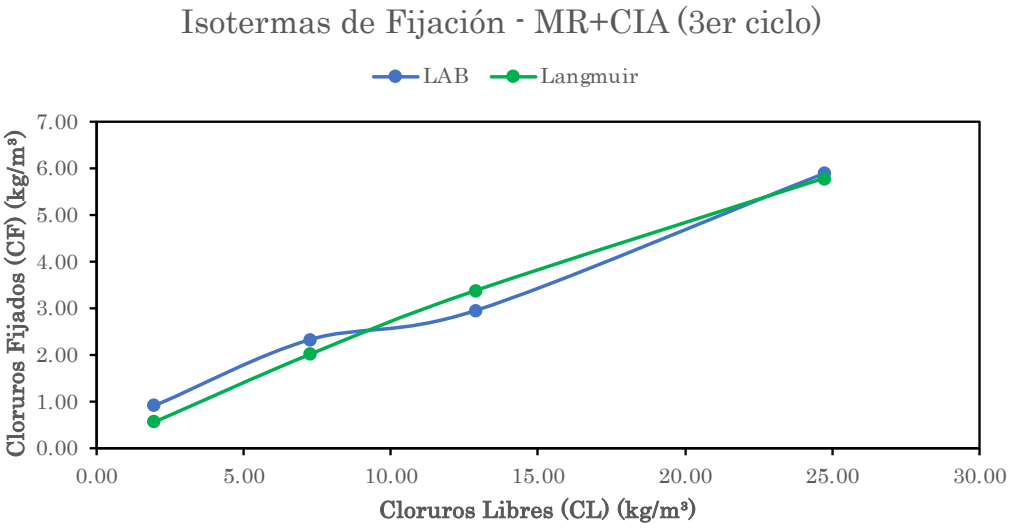


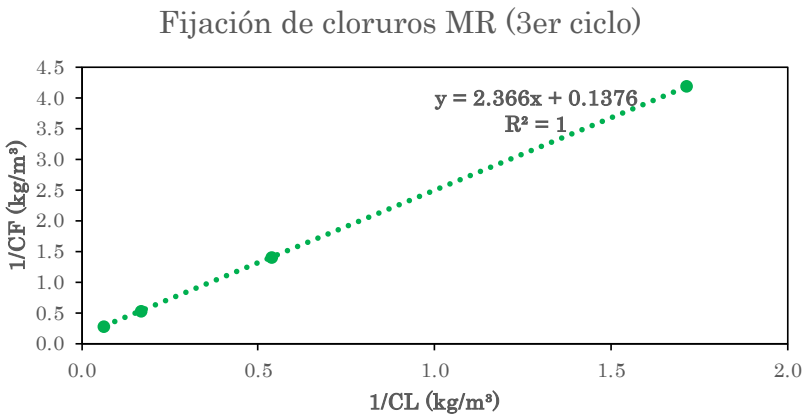
Isotermas de Fijación - MR+CIA (2do ciclo)

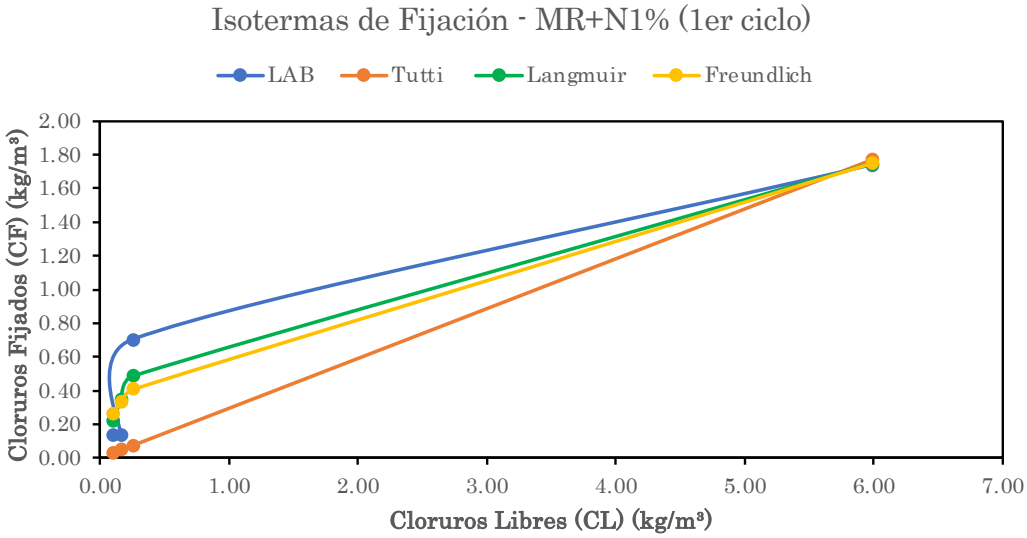


Fijación de cloruros MR+CIA (2do ciclo)

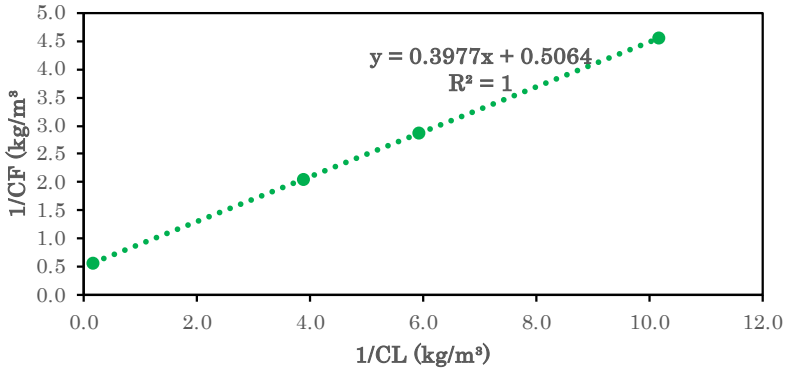



Isotermas de Fijación - MR+CIA (3er ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00
30.00

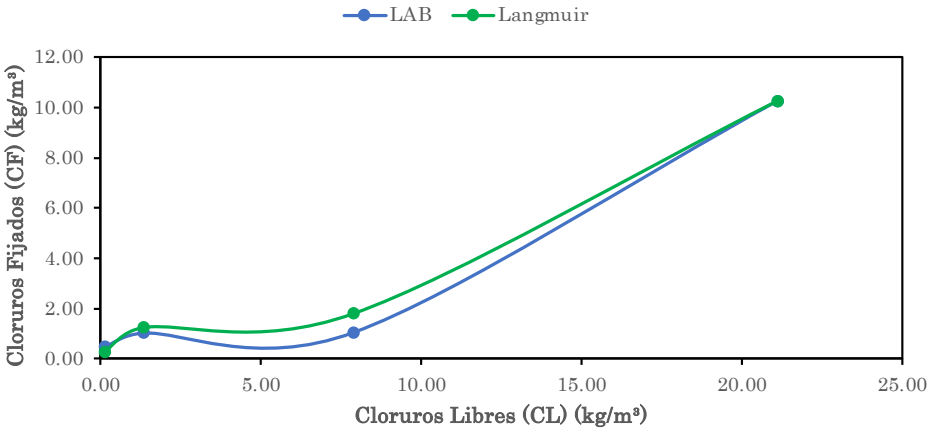

Fijación de cloruros MR (3er ciclo)
y = 2.366x + 0.1376
R² = 1
1/CF (kg/m³)
1/CL (kg/m³)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0


Isotermas de Fijación - MR+N1% (1er ciclo)
LAB
Tutti
Langmuir
Freundlich
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)
0.00
0.20
0.40
0.60
0.80
1.00
1.20
1.40
1.60
1.80
2.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00

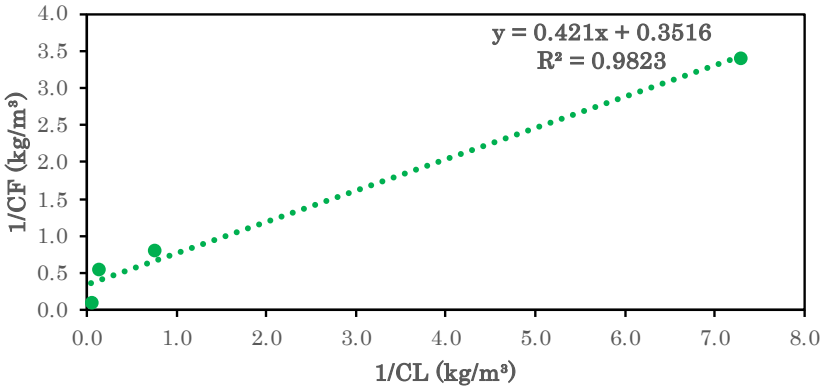
Fijación de cloruros MR+N1% (1er ciclo)

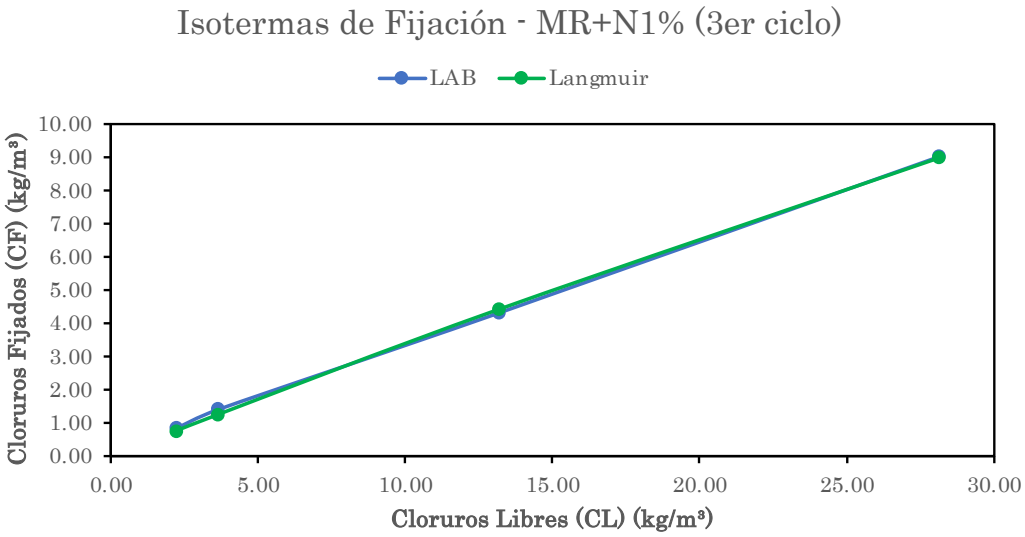


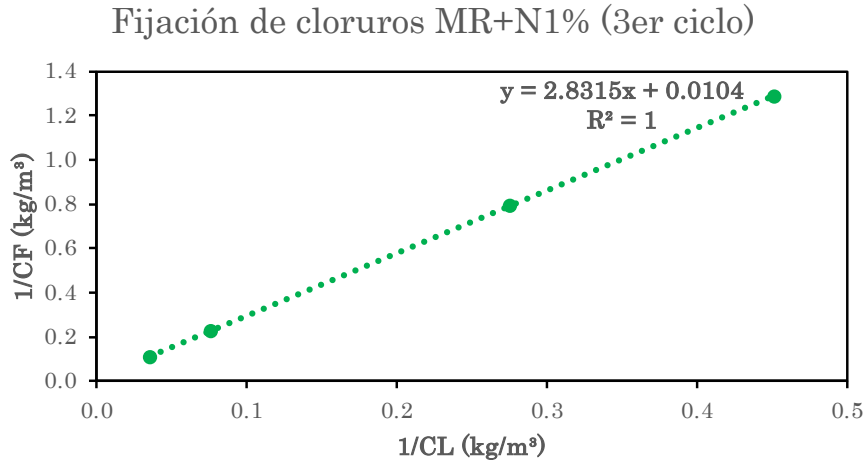
Isotermas de Fijación - MR+N1% (2do ciclo)

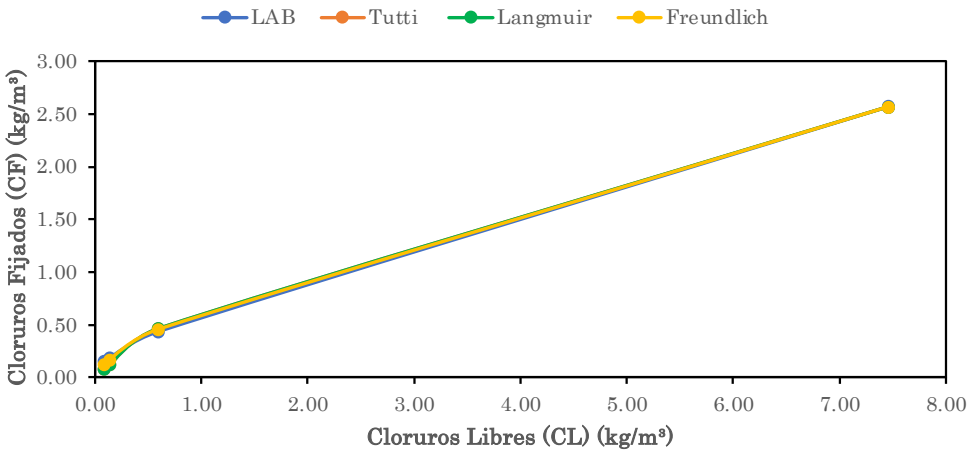


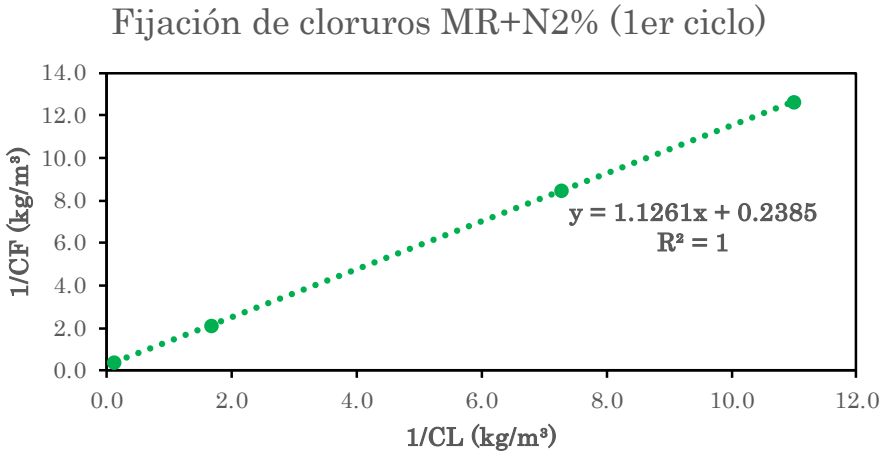
Fijación de cloruros MR+N1% (2do ciclo)

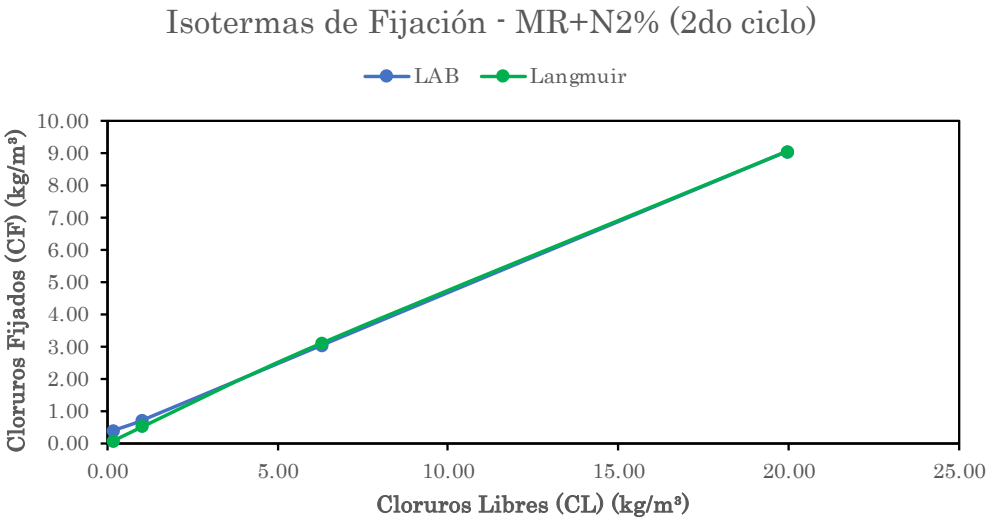


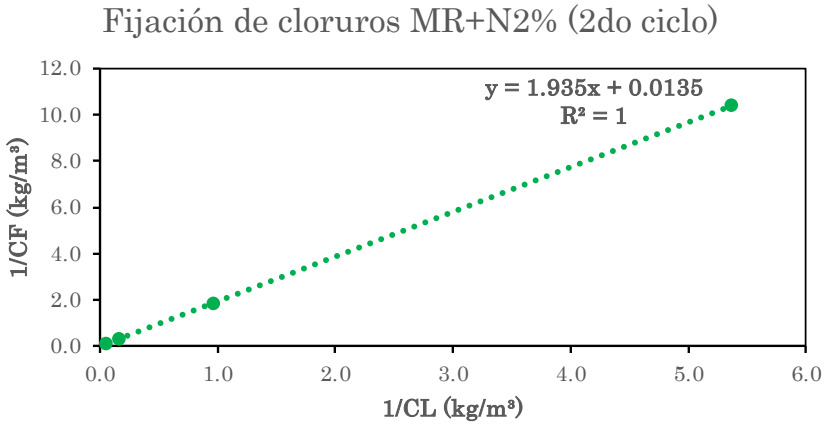

Isotermas de Fijación - MR+N1% (3er ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
10.00
9.00
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00
30.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

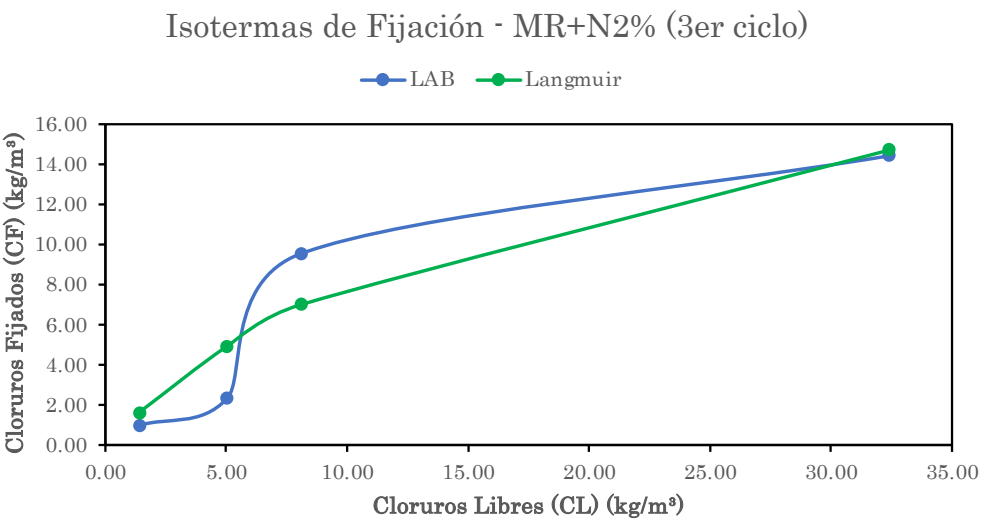

Fijación de cloruros MR+N1% (3er ciclo)
y = 2.8315x + 0.0104
R² = 1
1/CF (kg/m³)
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
1/CL (kg/m³)

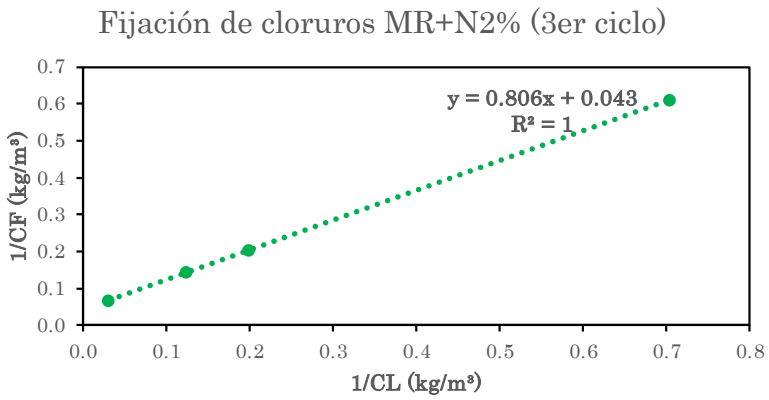

Isotermas de Fijación - MR+N2% (1er ciclo)
LAB
Tutti
Langmuir
Freundlich
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

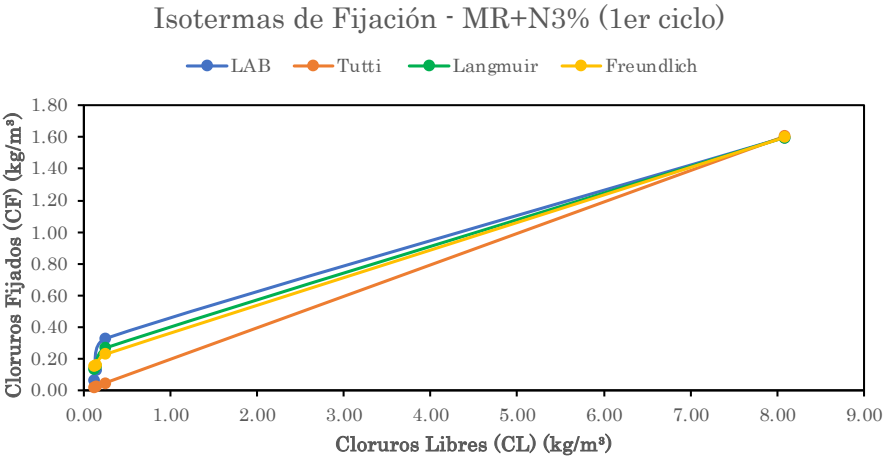

Fijación de cloruros MR+N2% (1er ciclo)
y = 1.1261x + 0.2385
R² = 1
1/CF (kg/m³)
1/CL (kg/m³)
0.0
2.0
4.0
6.0
8.0
10.0
12.0
14.0


Isotermas de Fijación - MR+N2% (2do ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00

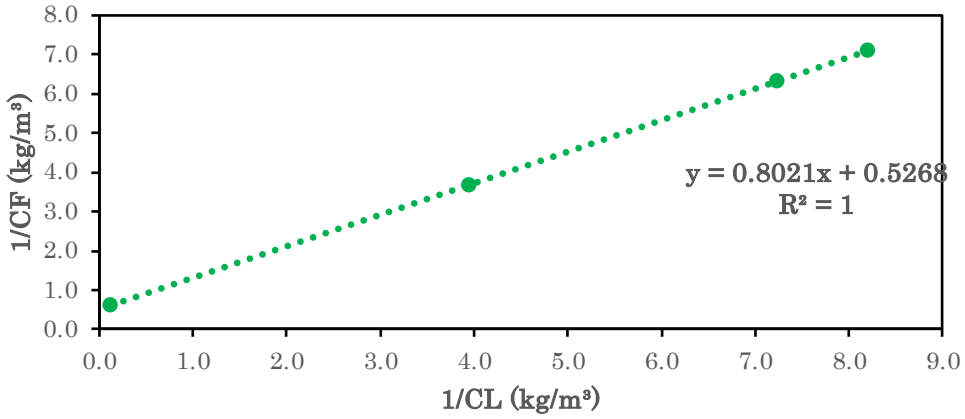

Fijación de cloruros MR+N2% (2do ciclo)
y = 1.935x + 0.0135
R² = 1
1/CF (kg/m³)
1/CL (kg/m³)
0.0
2.0
4.0
6.0
8.0
10.0
12.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0


Isotermas de Fijación - MR+N2% (3er ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
16.00
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00
30.00
35.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

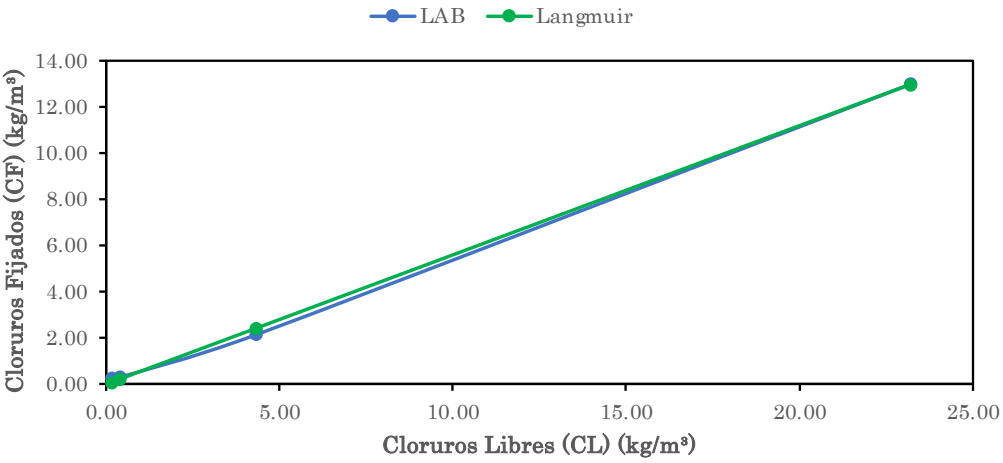

Fijación de cloruros MR+N2% (3er ciclo)
y = 0.806x + 0.043
R² = 1
1/CF (kg/m³)
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
1/CL (kg/m³)


Isotermas de Fijación - MR+N3% (1er ciclo)
LAB
Tutti
Langmuir
Freundlich
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
9.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

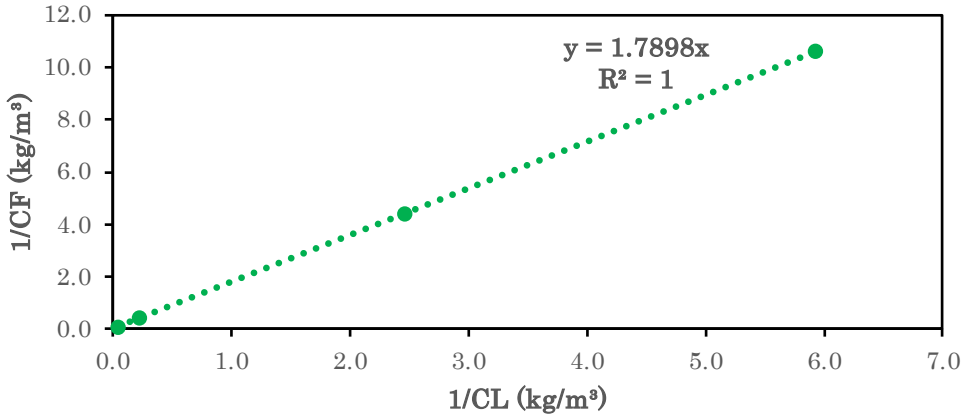
Fijación de cloruros MR+N3% (1er ciclo)

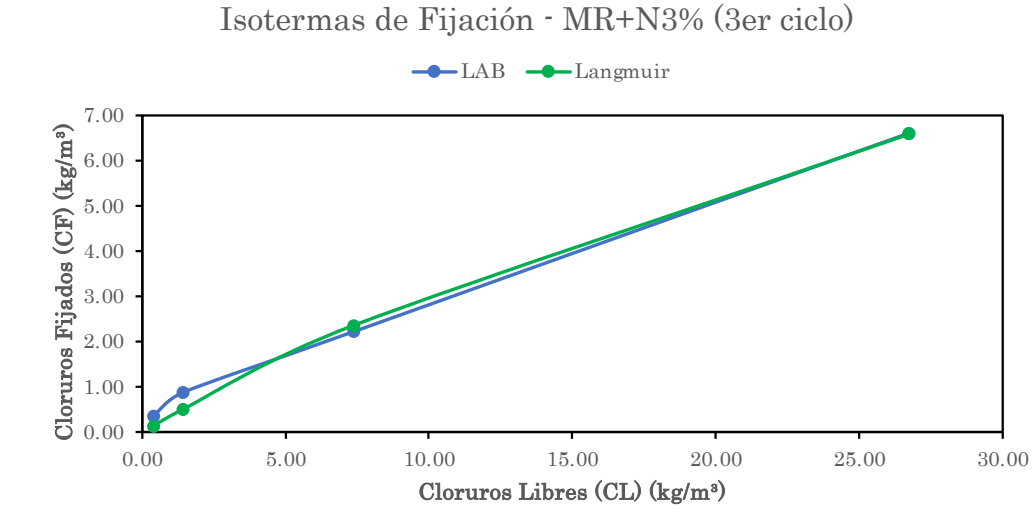


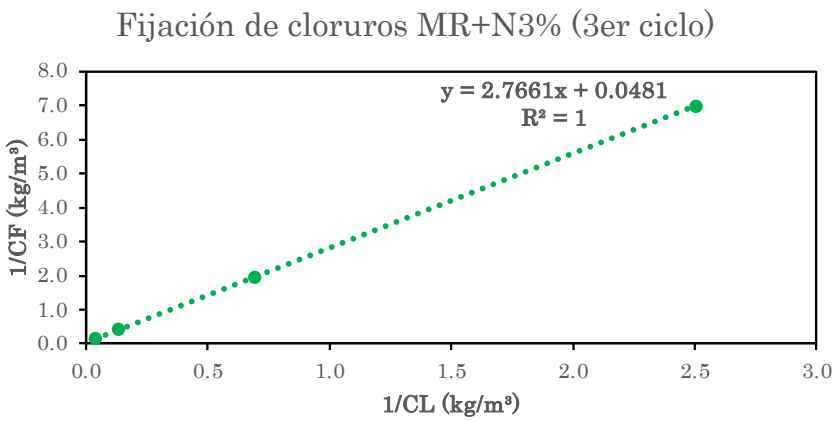
Isotermas de Fijación - MR+N3% (2do ciclo)

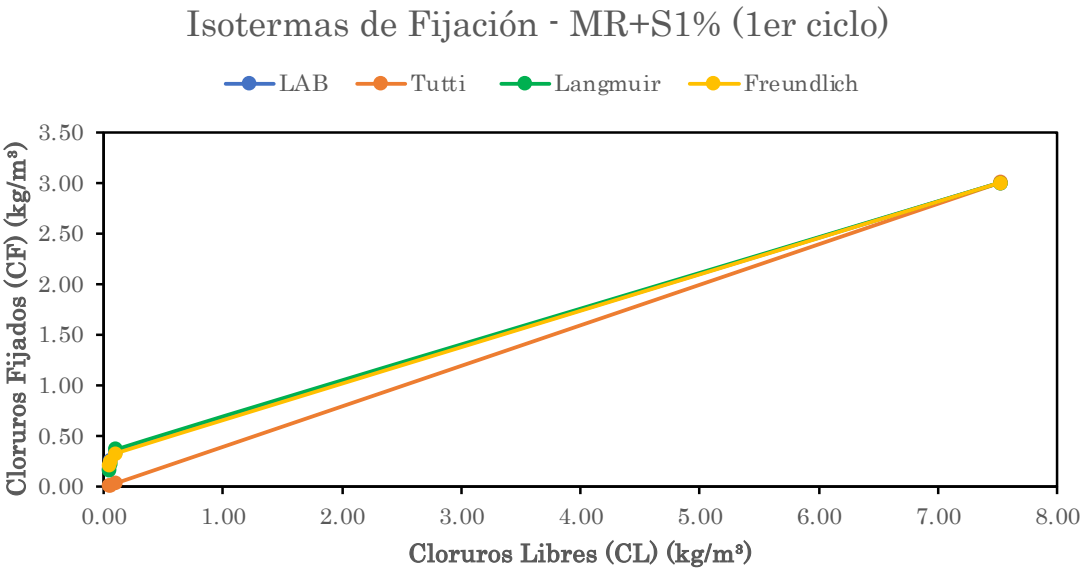


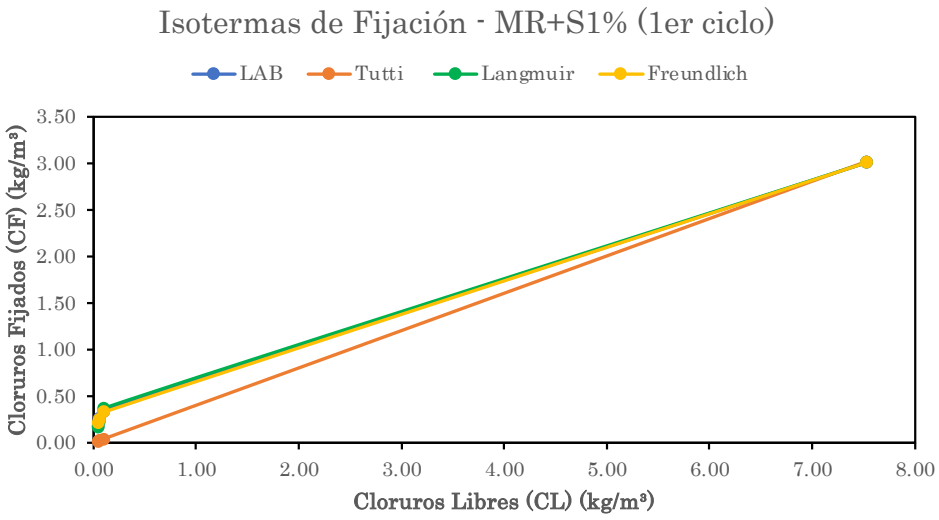
Fijación de cloruros MR+N3% (2do ciclo)

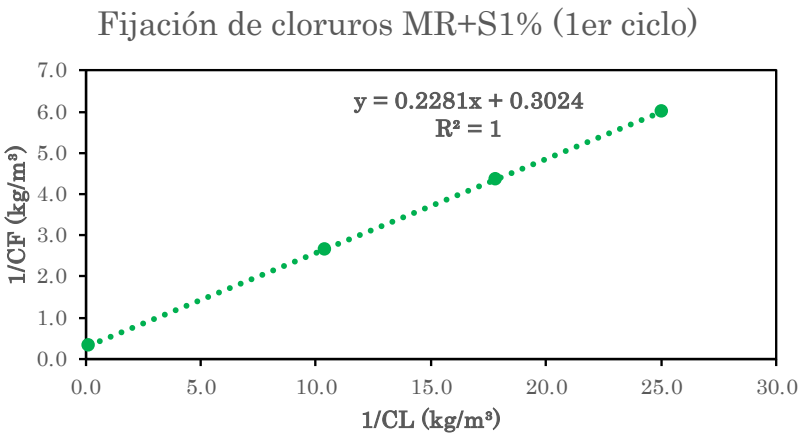


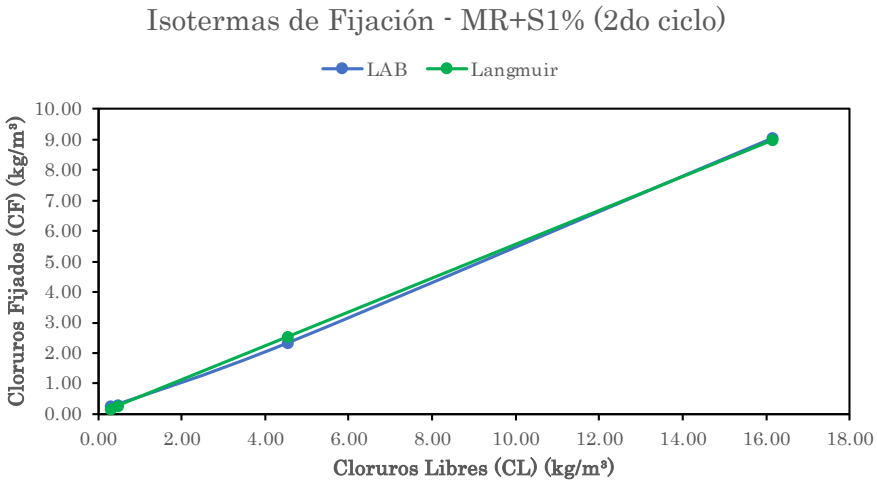

Isotermas de Fijación - MR+N3% (3er ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00
30.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

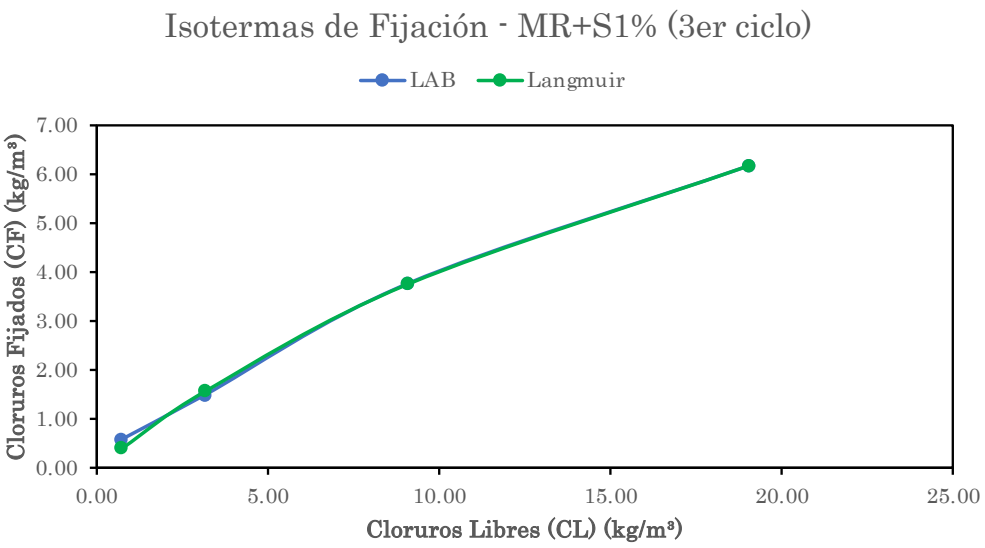

Fijación de cloruros MR+N3% (3er ciclo)
y = 2.7661x + 0.0481
R² = 1
1/CF (kg/m³)
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
1/CL (kg/m³)

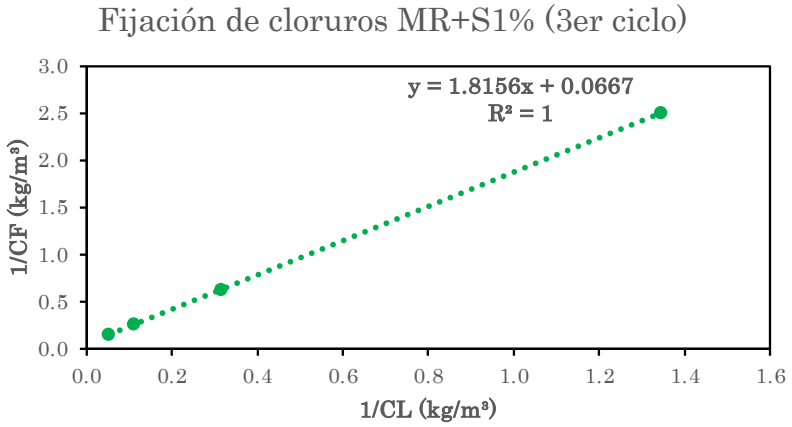

Isotermas de Fijación - MR+S1% (1er ciclo)
LAB
Tutti
Langmuir
Freundlich
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

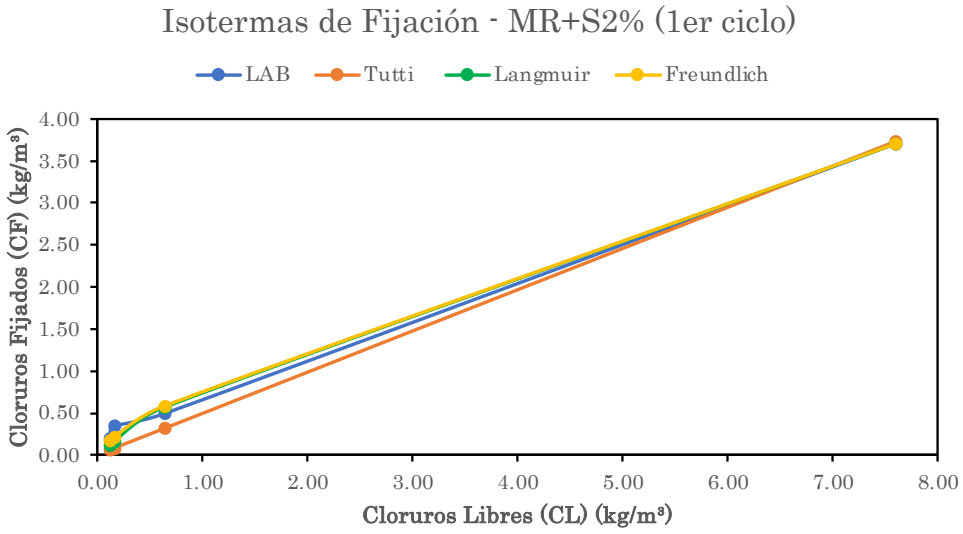

Isotermas de Fijación - MR+S1% (1er ciclo)
LAB
Tutti
Langmuir
Freundlich
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

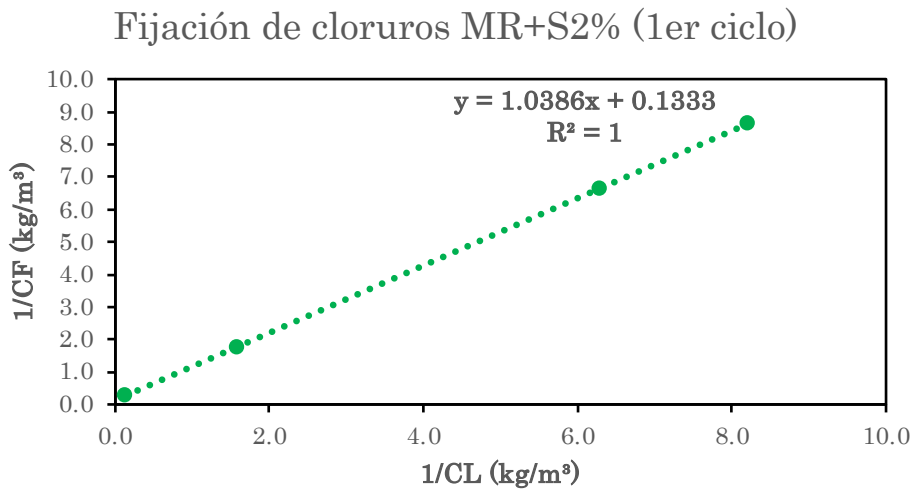

Fijación de cloruros MR+S1% (1er ciclo)
y = 0.2281x + 0.3024
R² = 1
1/CF (kg/m³)
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
1/CL (kg/m³)

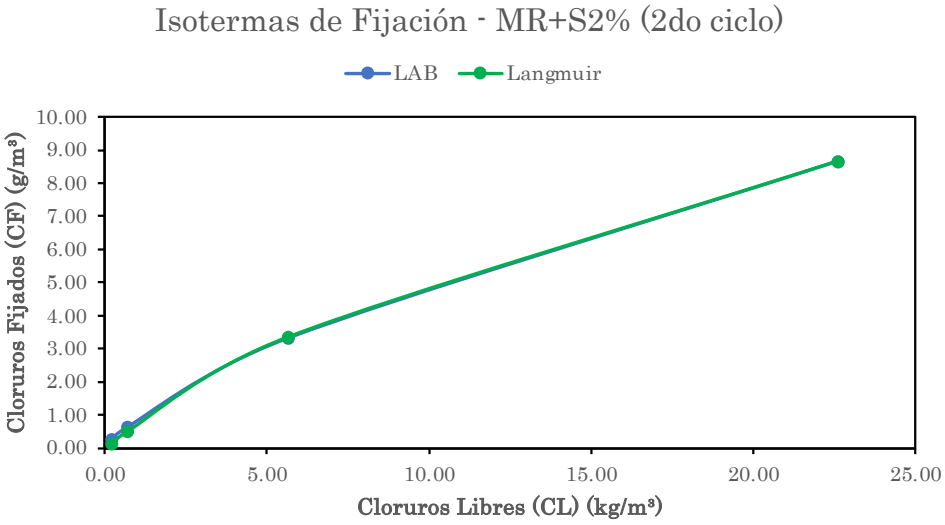

Isotermas de Fijación - MR+S1% (2do ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
10.00
9.00
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0.00
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
12.00
14.00
16.00
18.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

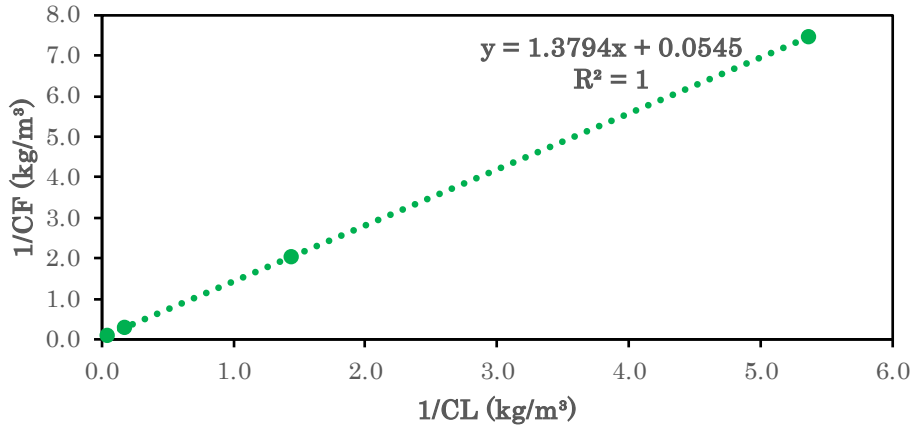

Isotermas de Fijación - MR+S1% (3er ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

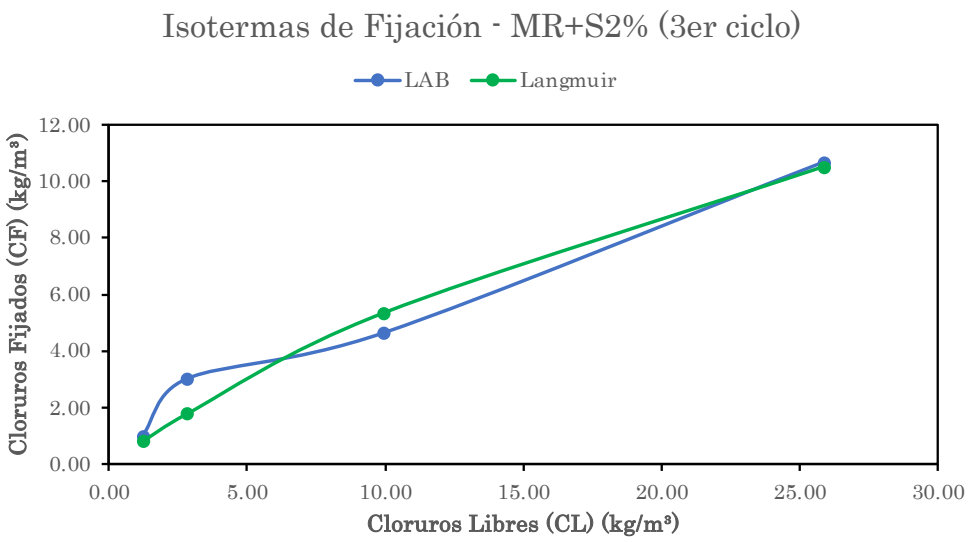

Fijación de cloruros MR+S1% (3er ciclo)
y = 1.8156x + 0.0667
R² = 1
1/CF (kg/m³)
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1/CL (kg/m³)

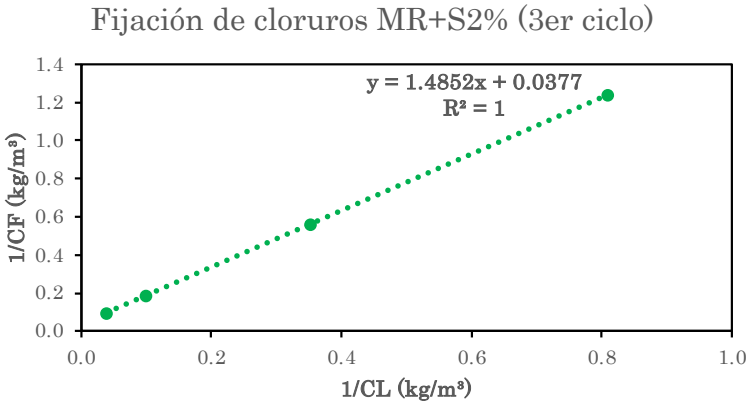

Isotermas de Fijación - MR+S2% (1er ciclo)
LAB
Tutti
Langmuir
Freundlich
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
4.00
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

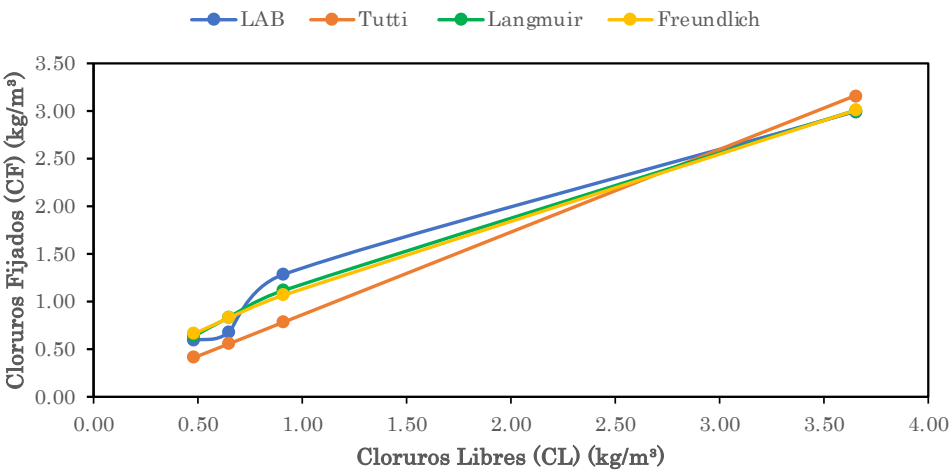

Fijación de cloruros MR+S2% (1er ciclo)
y = 1.0386x + 0.1333
R² = 1
1/CF (kg/m³)
1/CL (kg/m³)
10.0
9.0
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
2.0
4.0
6.0
8.0
10.0


Isotermas de Fijación - MR+S2% (2do ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (g/m³)
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)
10.00
9.00
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00

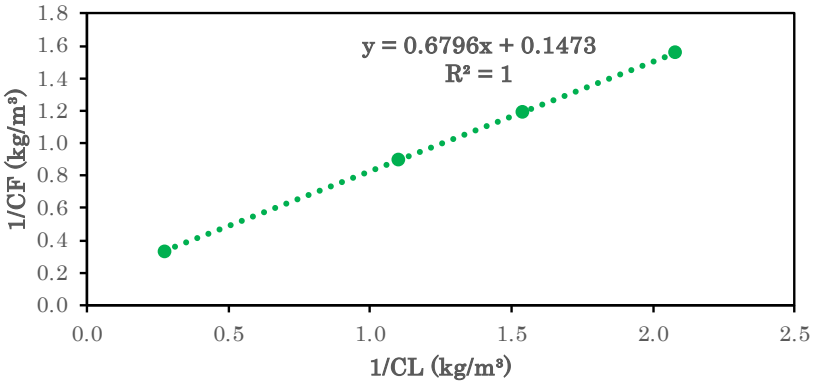

Fijación de cloruros MR+S2% (2do ciclo)
y = 1.3794x + 0.0545
R² = 1
1/CF (kg/m³)
1/CL (kg/m³)
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0


Isotermas de Fijación - MR+S2% (3er ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00
30.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

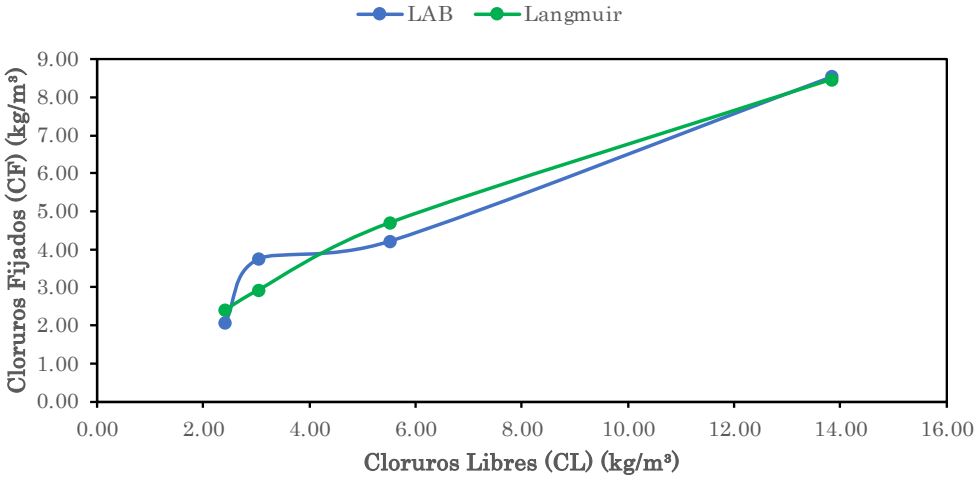

Fijación de cloruros MR+S2% (3er ciclo)
y = 1.4852x + 0.0377
R² = 1
1/CF (kg/m³)
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1/CL (kg/m³)


Isotermas de Fijación - MR+S3% (1er ciclo)
LAB
Tutti
Langmuir
Freundlich
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0.00
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
2.50
3.00
3.50
4.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)

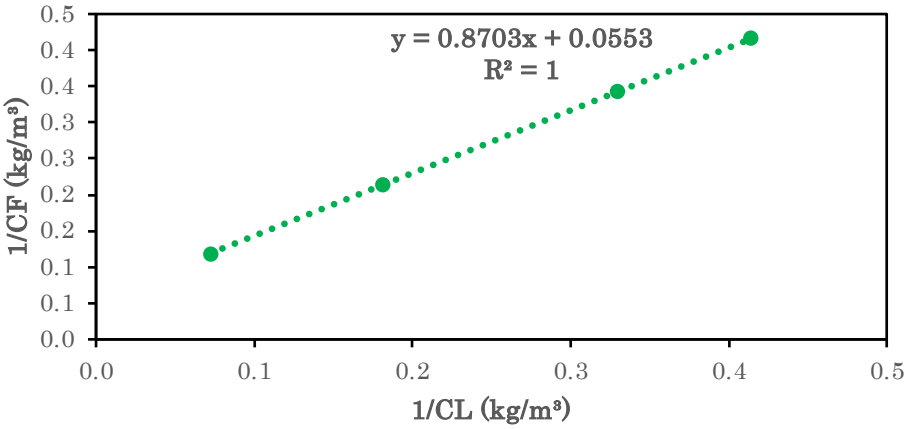
Fijación de cloruros MR+S3% (1er ciclo)

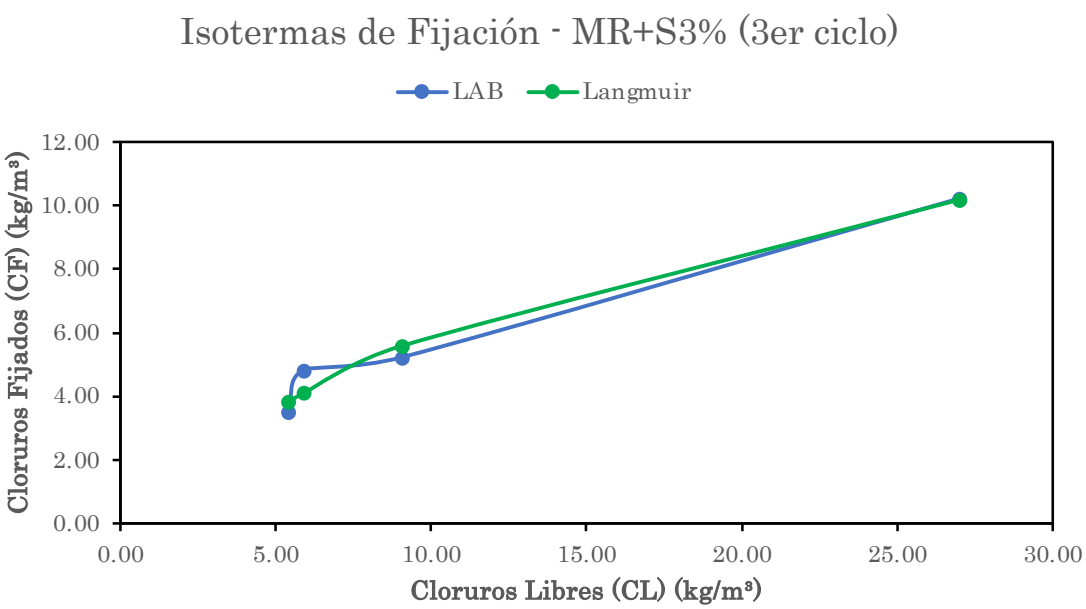


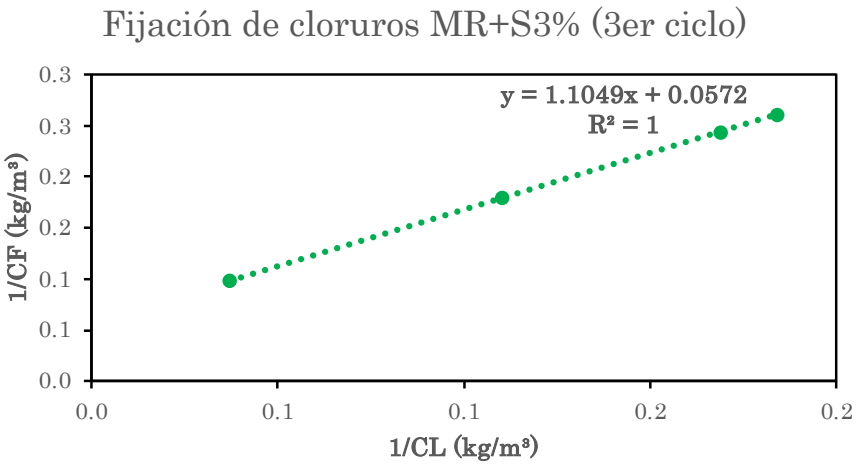
Isotermas de Fijación - MR+S3% (2do ciclo)



Fijación de cloruros MR+S3% (2do ciclo)




Isotermas de Fijación - MR+S3% (3er ciclo)
LAB
Langmuir
Cloruros Fijados (CF) (kg/m³)
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
25.00
30.00
Cloruros Libres (CL) (kg/m³)


Fijación de cloruros MR+S3% (3er ciclo)
y = 1.1049x + 0.0572
R² = 1
1/CF (kg/m³)
0.3
0.3
0.2
0.2
0.1
0.1
0.0
0.0
0.1
0.1
0.2
0.2
1/CL (kg/m³)