

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



TESIS

“EFECTO DEL MUCÍLAGO DE NOPAL EN LA VELOCIDAD DE
CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO”

Que para obtener el grado de
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Presenta:

M.C.I. Enrique Martínez Barrios
D91070176
CVU 903178

Director de tesis:

Dr. Ulises Páramo García

Codirector de tesis:

Dr. Edgardo Jonathan Suárez Domínguez

Ciudad Madero, Tamaulipas.

Septiembre de 2025.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, 01/Septiembre/2025

Oficio No. U10.057/2025

ASUNTO: Autorización de Impresión

C. ENRIQUE MARTÍNEZ BARRIOS
No. DE CONTROL D91070176
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DR. ULISES PÁRAMO GARCÍA
SECRETARIO:	DR. EDGARDO JONATHAN SUÁREZ DOMÍNGUEZ
VOCAL 1:	DR. JOSUÉ FRANCISCO PÉREZ SÁNCHEZ
VOCAL 2:	DR. LUIS FORTINO CISNEROS SINENCIO.
VOCAL 3:	DR. JUAN JAVIER GONZÁLEZ BARBOSA
SUPLENTE:	DRA. ANA LIDIA MARTÍNEZ SALAZAR

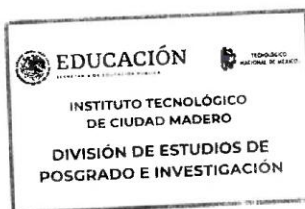
Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"EFECTO DEL MUCÍLAGO DE NOPAL EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO "

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica.
"Por Mi Patria y Por Mi Bien" ®


RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
RCG/NRV/jar



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. (833) 3574820 ext. 3110
e-mail: depl_cdmadero@tecnm.mx www.tecnm.mx
www.cdmadero.tecnm.mx



Efecto del mucílago de nopal en la velocidad de corrosión del acero de refuerzo.

M.C.I. Enrique Martínez Barrios.

Resumen.

El acero de refuerzo que se emplea en la industria de la construcción es susceptible a la degradación provocada por elementos ambientales y la calidad del concreto empleado. En este trabajo se emplea mucílago de nopal al 5, 10 y 15 % volumen en sustitución de agua de mezclado en el diseño de la mezcla. Se realizaron pruebas mecánicas a las mezclas de concreto: resistencia a la compresión, resistividad eléctrica y porosidad. También pruebas electroquímicas a probetas de concreto con varillas de acero embebidas: potencial a circuito abierto y resistencia a la polarización lineal. Las probetas fueron sometidas a tres condiciones ambientales diferentes: intemperie, alta humedad y alta humedad salina. Las micrografías muestran poros de mayor tamaño en las mezclas con mucílago y una menor capilaridad al realizar las pruebas de porosidad. Estos valores indican que las mezclas adicionadas con mucílago son más estables y menos permeables comparadas contra el blanco. Se realizó un monitoreo electroquímico durante un período de 430 días. Se observó que las mezclas con bajo contenido de mucílago presentaron una tasa baja de velocidad de corrosión de hasta el 50 % con respecto al blanco. La mezcla al 10 % de mucílago tuvo un mejor desempeño en la protección contra la corrosión de las varillas de refuerzo retardando su degradación electroquímica, protegiendo además al medio ambiente. Asimismo, se presentan las fases involucradas en cada una de las etapas del proceso general y la interacción del mucílago dentro del concreto.

Effect of cactus mucilage on the corrosión kinetics of reinforced steel.

M.C.I. Enrique Martínez Barrios.

Abstract.

The reinforcing steel used in the construction industry is susceptible to degradation caused by environmental elements and the quality of the concrete used. In this study, nopal mucilage was incorporated at 5, 10, and 15% by volume as a partial replacement of mixing water in the concrete mix design. Mechanical tests were conducted on the concrete mixtures, including compressive strength, electrical resistivity and porosity. Electrochemical tests were also performed on concrete specimens with embedded steel rebars, including open-circuit potential, and linear polarization resistance. The specimens were exposed to three different environmental conditions: outdoor exposure, high humidity, and high salinity humidity. Micrographs revealed larger pore sizes in the mucilage-modified mixtures, as well as reduced capillarity according to porosity testing. These values indicate that the mucilage-containing mixtures are more stable and less permeable compared to the control. Electrochemical monitoring was conducted out over a period of 430 days. It was observed that mixes with low mucilage content exhibited a corrosion rate up to 50% lower than the control. The mixture containing 10% mucilage showed the best performance in protecting the reinforcement steel from corrosion, delaying its electrochemical degradation, and contributing to environmental sustainability. In addition, the phases involved in each stage of the overall corrosion process are presented, along with the interaction of mucilage within the concrete matrix.

ÍNDICE GENERAL.

	Página.
Resumen.	i
Abstract.	ii
Índice de tablas.	vi
Índice de figuras.	vii
Capítulo 1. Introducción.	1
1.1. Planteamiento del problema.	3
1.2. Objetivos.	6
1.2.1. Objetivo general.	6
1.2.2. Objetivos específicos.	6
1.3. Justificación.	7
1.4. Contexto de la investigación.	10
1.5. Organización de la tesis.	11
Capítulo 2. Marco teórico.	15
2.1. Nopal.	16
2.1.1. Mucílago.	16
2.1.2. pH.	17
2.2. Concreto armado.	17
2.2.1. Cemento.	18
2.2.2. Agregados.	19
2.2.3. Varilla de refuerzo.	19
2.2.4. Degradación de las construcciones.	19
2.2.5. Agua de mezclado.	20
2.3. Técnicas de análisis.	21
2.3.1. Espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR).	21
2.3.2. Porosidad.	22
2.3.3. Micrografía.	22
2.3.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM).	23
2.3.5. Resistencia a la compresión.	23

2.3.6. Resistividad eléctrica.	24
2.3.7. Potencial a circuito abierto.	25
2.3.8. Velocidad de corrosión.	25
2.3.9. Eficiencia.	26
Capítulo 3. Estado del arte.	27
Capítulo 4. Metodología experimental.	39
4.1. Nopales.	40
4.1.1. Mucílago.	40
4.1.2. pH.	40
4.2. Concreto.	41
4.2.1. Agregados finos y gruesos.	41
4.2.2. Diseño de mezcla.	42
4.2.3. Matriz experimental.	43
4.2.4. Diseño de probetas.	45
4.3. Pruebas de laboratorio.	46
4.3.1. Espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR).	46
4.3.2. Porosidad.	46
4.3.3. Micrografía.	47
4.3.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM).	47
4.3.5. Resistencia a la compresión.	48
4.3.6. Resistividad eléctrica.	48
4.3.7. Potencial a circuito abierto.	49
4.3.8. Velocidad de corrosión.	49
4.3.9. Eficiencia.	50
Capítulo 5. Resultados y discusiones.	51
5.1. Mucílago.	51
5.2. Concreto.	51
5.3. Pruebas de laboratorio.	52
5.3.1. Espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR).	52
5.3.2. Porosidad.	53
5.3.3. Micrografía.	55

5.3.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM).	57
5.3.5. Resistencia a la compresión.	59
5.3.6. Resistividad eléctrica.	60
5.3.7. Potencial a circuito abierto.	62
5.3.8. Velocidad de corrosión.	68
5.3.9. Eficiencia.	73
Capítulo 6. Conclusiones.	76
Anexos.	79
Anexo A. Concreto.	80
Anexo B. Acero de refuerzo.	83
Anexo C. Mucílago.	87
Anexo D. Cloruros.	90
Referencias.	93

ÍNDICE DE TABLAS.

	Página.
2.1. Clasificación por tipo de cemento.	18
2.2. Parámetros fisicoquímicos del agua potable.	21
2.3. Criterios para determinar la resistencia de un concreto.	24
2.4. Criterios de evaluación de riesgo de corrosión con base en la resistividad eléctrica.	25
2.5. Vida útil del acero en función de la velocidad de corrosión.	26
4.1. Matriz experimental.	44
5.1. Caracterización de los agregados.	52
5.2. Diseño de la mezcla de concreto.	52

ÍNDICE DE FIGURAS.

	Página.
4.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.	39
4.2. Arreglos cuadrado y lineal de los electrodos.	46
5.1. Espectro FTIR del mucílago de nopal.	53
5.2. Porosidad de las mezclas a diferentes edades.	54
5.3. Micrografías de las probetas a diferentes edades.	56
5.4. Imagen SEM del acero al carbón en especímenes expuestos a condiciones ambientales.	57
5.5. Imagen SEM del concreto en especímenes expuestos a condiciones ambientales.	58
5.6. Resistencia a la compresión a diferentes edades.	59
5.7. Resistividad eléctrica de las mezclas a diferentes edades.	61
5.8. Potencial a circuito abierto en ambiente A, a diferentes edades.	63
5.9. Potencial a circuito abierto en ambiente B, a diferentes edades.	65
5.10. Potencial a circuito abierto en ambiente C, a diferentes edades.	66
5.11. Potencial a circuito abierto en ambiente A, a diferentes distancias y edades.	67
5.12. Velocidad de corrosión en probetas expuestas al ambiente A.	69
5.13. Velocidad de corrosión en probetas expuestas al ambiente B.	70
5.14. Velocidad de corrosión en probetas expuestas al ambiente C.	72

1. Introducción.

Uno de los métodos de construcción más empleados en México, tanto en zonas urbanas como rurales, es el concreto reforzado con varillas de acero, debido principalmente a su bajo costo, amplia disponibilidad de materiales y notable resistencia estructural. Esta popularidad se debe a la facilidad de obtener los insumos y a la relativa sencillez en su aplicación. Sin embargo, a pesar de sus múltiples ventajas y de su extenso uso a lo largo del territorio nacional, el concreto reforzado puede ser fácilmente atacado y deteriorado por una combinación de agentes atmosféricos, tales como la elevada humedad relativa, las variaciones extremas de temperatura y otros factores ambientales propios de la zona de construcción [1]. Esta interacción constante con el medio ambiente provoca un deterioro gradual, progresivo y, en muchos casos irreversible de las edificaciones afectando principalmente a las varillas de acero embebidas en el concreto, las cuales son fundamentales para otorgar resistencia mecánica a la estructura.

El acero al carbón, que constituye la mayoría de las varillas empleadas en el refuerzo estructural, se ha convertido en un elemento esencial e insustituible dentro de la industria de la construcción a nivel mundial debido a su gran versatilidad, disponibilidad y características mecánicas sobresalientes. No obstante, a pesar de sus múltiples ventajas, los daños ocasionados por la corrosión de este material han generado pérdidas de gran magnitud, no solo en el ámbito económico, con costos elevados de reparación y sustitución de estructuras, sino también en pérdidas humanas asociadas a fallos estructurales [2]. Aunque en la actualidad existen diversos métodos y técnicas desarrolladas para dar mantenimiento preventivo y correctivo a las construcciones que emplean concreto armado, estos procedimientos suelen representar un costo elevado. Además, en muchos casos requieren de mano de obra altamente especializada, maquinaria específica y procedimientos complejos para su correcta implementación.

Esta situación se torna particularmente crítica y preocupante en zonas rurales y comunidades apartadas, donde las limitaciones económicas, la falta de infraestructura y la situación geográfica dificultan considerablemente la posibilidad de brindar un mantenimiento adecuado y oportuno a las edificaciones, sobre todo a las casas-habitación que representan el patrimonio familiar de sus habitantes. En este contexto, el aprovechamiento de materiales endémicos y de fácil acceso en cada región representa una alternativa viable y de gran beneficio económico y social para los habitantes de dichas zonas [3], permitiéndoles mejorar la durabilidad de sus construcciones de una manera más asequible y sostenible.

El uso, manejo y aprovechamiento de los recursos naturales en México tiene una larga tradición histórica, que se remonta a épocas prehispánicas [4], en las cuales las culturas originarias de mostraron un profundo conocimiento de su entorno natural y una notable capacidad para emplear los recursos disponibles de manera eficiente. Inspirados en estas prácticas ancestrales, en algunas regiones de países orientales se ha investigado y aplicado el uso de productos naturales, como el azúcar, para modificar las propiedades del mortero y mejorar su resistencia a las inclemencias atmosféricas [5][6], reduciendo así la vulnerabilidad de las construcciones frente a agentes externos.

Dentro de los recursos naturales destacados en México se encuentran diversas especies de cactáceas, entre las que sobresale el nopal, una planta con múltiples aplicaciones a nivel industrial [7]. El nopal ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones que han demostrado su utilidad en campos como la farmacología, la industria cosmética [8][9] y la alimentación. Adicionalmente, diversas investigaciones científicas han profundizado en el análisis de las propiedades fisicoquímicas del mucílago de extraído del nopal [10], evidenciando su potencial uso en nuevas aplicaciones tecnológicas. El nopal también ha encontrado usos relevantes en comunidades rurales, como en la purificación de agua para consumo humano [11] y como aditivo natural en la formulación de morteros de concreto armado utilizados en la construcción de viviendas [12], contribuyendo así a mejorar la calidad de vida en regiones marginadas.

En las zonas urbanas, a diferencia de las rurales, los ambientes de exposición para las estructuras de concreto armado son generalmente más agresivos debido a factores como la

contaminación ambiental, el tráfico vehicular y la concentración de compuestos químicos corrosivos en el aire [13]. En el caso particular de las zonas costeras, las condiciones ambientales son aún más severas: la alta humedad relativa y la salinidad del ambiente son factores altamente agresivos que afectan de manera directa tanto al concreto como al acero de refuerzo, acelerando notablemente los procesos de degradación estructural. Cuando el acero embebido en el concreto entra en contacto con la humedad ambiental, esta puede transportar sales y otros elementos agresivos que penetran en el concreto a través de microfisuras o porosidad [2]. Estos elementos, en solución acuosa, reaccionan químicamente con el acero, iniciando así los procesos de corrosión interna de las estructuras, lo que conlleva una degradación prematura del concreto armado, reduciendo su vida útil y generando elevados costos de reparación y mantenimiento [14].

Por estas razones, en los últimos años ha cobrado mayor relevancia el estudio y la implementación de materiales de origen natural como una alternativa sostenible y económica para mejorar la durabilidad de las estructuras de concreto. En este contexto, el siguiente trabajo tiene como objetivo estudiar de manera detallada el efecto del mucílago de nopal en la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto armado, explorando su potencial para convertirse en un aditivo natural que contribuya a prolongar la vida útil de las construcciones de manera económica y ecológica.

1.1. Planteamiento del problema.

Uno de los principales factores que contribuyen al deterioro y pérdida de funcionalidad de las construcciones basadas en concreto reforzado es la corrosión de las varillas de acero utilizadas como refuerzo estructural. Este fenómeno puede originarse debido a la combinación de múltiples factores, entre los que destacan los agentes ambientales [14], tales como humedad, temperatura y contaminantes atmosféricos. También influye de manera significativa la ejecución deficiente de los procesos constructivos y la aparición de imperfecciones y microfisuras durante las etapas de fraguado y curado del concreto [15], que comprometen su integridad y favorecen la migración de sustancias agresivas hacia el interior de la matriz cementicia.

México es un país caracterizado por una gran diversidad climática, dentro de la cual destaca la presencia de regiones costeras con alta humedad y salinidad, que suman aproximadamente 10,000 km de extensión litoral [16]. En estas zonas, las condiciones ambientales, temperaturas elevadas combinadas con niveles de humedad relativa superiores al 80 %, son especialmente propicias para acelerar la corrosión de los metales, incluidos el hierro y sus aleaciones [1]. La existencia de contaminantes atmosféricos, como el dióxido de azufre (SO₂) y la sal común (NaCl), presentes en ambientes industriales y marítimos, también favorece y agrava este proceso corrosivo, motivo por el cual han sido objeto de numerosas investigaciones científicas en el campo de los materiales de construcción [17].

Para mitigar este problema, se han desarrollado diversos productos industriales de protección, como recubrimientos, inhibidores de corrosión y sistemas de protección catódica. Sin embargo, estos métodos presentan desventajas significativas, como el elevado costo de adquisición e implementación, la necesidad de mano de obra altamente especializada y, en muchos casos, un impacto negativo sobre el medio ambiente. Frente a esta situación, surge como alternativa prometedora el uso de materiales orgánicos naturales, obtenidos de plantas locales, como aditivos para morteros y concretos en la construcción [18].

Estos aditivos naturales, conocidos como polímeros naturales, poseen la capacidad de mejorar las propiedades fisicoquímicas del hormigón, incrementando su resistencia a la penetración de humedad y agentes agresivos. Además, su localización en las inmediaciones del sitio de construcción y su carácter renovable y biodegradable hacen de estos materiales una opción de bajo costo, accesible y ambientalmente sostenible [12].

El mucílago extraído del nopal (*Opuntia ficus-indica*) ha sido históricamente utilizado, por ejemplo, en la producción artesanal de morteros de cal, desempeñando funciones de modificador de viscosidad y agente aglutinante. Asimismo, ha sido empleado en labores de restauración de edificios históricos, dada su capacidad para mejorar la trabajabilidad de los morteros y su compatibilidad con materiales tradicionales [19].

Desde el punto de vista químico, la fibra insoluble del nopal está compuesta principalmente por celulosa, lignina y hemicelulosa, mientras que su fracción soluble contiene mucílagos,

gomas, pectinas y, en menor medida, hemicelulosa [20]. Estas características confieren al extracto de cactus propiedades que pueden modificar el comportamiento del mortero del cemento, proporcionándole características especiales que ayudan a proteger las varillas de refuerzo embebidas en su interior [21]. Así, la adición de este extracto podría retrasar o incluso disminuir el progreso de la corrosión en las varillas metálicas, contribuyendo a extender significativamente la vida útil de las construcciones [22].

Entre los factores ambientales más agresivos que afectan la durabilidad del concreto armado destacan los iones cloruro, los cuales, debido a su pequeño tamaño y alta reactividad, logran penetrar los poros del concreto e iniciar la corrosión electroquímica del acero de refuerzo [2]. Este tipo de ataque provoca la generación de productos de corrosión voluminosos que ejercen presiones internas sobre el concreto circundante, originando fisuras, deterioraciones y pérdida progresiva de adherencia entre el refuerzo y la matriz cementicia [23][24][25].

En aceros de alta resistencia como los de clasificación 316, se ha observado que la corrosión por picadura, inducida por cloruros, se inicia con pérdidas mínimas de material, del orden de micrómetros, pero puede alcanzar profundidades considerables, comprometiendo la resistencia mecánica de las piezas sometidas a cargas estructurales [16].

Otros parámetros que afectan el proceso de corrosión son el pH del medio circundante y la presencia de agentes oxidantes. Estos factores pueden acelerar o retardar la corrosión dependiendo de su influencia sobre la formación de capas pasivas protectoras en la superficie del acero [16]. La alcalinidad intrínseca del concreto confiere una primera barrera de protección al acero, dado que la fase acuosa contenida en los poros del material posee valores de pH elevados, en un intervalo de entre 12.6 y 14 [26][27], debido a la presencia de hidróxido de calcio generado durante la hidratación de los silicatos de cemento. Esta alta alcalinidad ayuda a mantener pasivado al acero evitando el inicio de procesos corrosivos mientras no haya penetración significativa de agentes agresivos.

No obstante deben considerarse también factores internos relacionados con la fabricación del acero, como tiempos inadecuados de homogenización o concentraciones de silicio superiores

a las especificaciones, que pueden genera defectos en el material y provocar la aparición prematura de grietas en las estructuras [28].

Es importante recordar que las propiedades de los materiales de construcción evolucionan con el tiempo y que la vida útil de una edificación finaliza cuando su integridad estructural deja de ser segura para su uso. La durabilidad y porosidad del concreto están directamente relacionadas con su resistencia a la difusión de contaminantes, lo cual influye en su capacidad para proteger el acero de refuerzo [27].

Actualmente, la incorporación de polímeros naturales en morteros y concretos como estrategia para mejorar la durabilidad de las estructuras expuestas a ambientes agresivos es un campo de investigación emergente y poco explorado. En este contexto, el presente trabajo tiene como finalidad estudiar el efecto del mucílago de nopal sobre la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto armado, analizando la interacción de este aditivo con los mecanismos de degradación y evaluando su viabilidad como una solución sostenible y de bajo impacto ambiental.

1.2. Objetivos.

A continuación, se presentan los objetivos de este trabajo de investigación.

1.2.1. Objetivo general.

Evaluar el efecto del mucílago de nopal en la velocidad de corrosión del acero estructural en el concreto armado.

1.2.2. Objetivos específicos.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Definir el proceso para obtener el mucílago de nopal.
- Diseñar la mezcla para la elaboración de las probetas de concreto.
- Diseñar las pruebas de aplicación del mucílago en probetas de concreto armado.
- Caracterizar el concreto armado con y sin dosificación de mucílago.
- Estudiar el proceso de degradación por técnicas electroquímicas.

- Analizar el potencial a circuito abierto de las probetas de prueba.
- Determinar la velocidad de reacción para probeta de trabajo.
- Evaluar los resultados obtenidos.
- Describir el proceso involucrado en la corrosión del acero de refuerzo.

1.3. Justificación.

El proceso de construcción ha experimentado una evolución significativa a lo largo de los siglos, pasando desde los métodos rudimentarios que empleaban únicamente materiales naturales disponibles en el entorno inmediato, utilizados por nuestros antepasados, hasta la adopción del concreto armado, que hoy en día constituye uno de los materiales más empleados a nivel mundial en la industria de la construcción. Este desarrollo tecnológico ha permitido dejar atrás los métodos de construcción tradicionales, reemplazándolos por el uso de materiales procesados que ofrecen una mayor seguridad estructural y una durabilidad considerablemente superior bajo condiciones normales de servicio.

Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos en la formulación y procesamiento de materiales de construcción modernos, se ha observado que éstos continúan siendo susceptibles a fenómenos de degradación ocasionados por factores ambientales. La exposición prolongada a la humedad, los contaminantes atmosféricos, las variaciones térmicas y la acción de sales, entre otros agentes, genera daños estructurales que comprometen la vida útil de las construcciones. Este conocimiento ha propiciado el desarrollo de una amplia gama de productos y tecnologías orientadas a detener, minimizar o retrasar el proceso de deterioro de las estructuras. No obstante, la mayoría de estos productos presenta ciertas limitaciones: requieren mano de obra altamente especializada para su correcta aplicación, suelen tener un impacto ambiental negativo debido a su composición química y, en muchos casos, resultan económicamente inaccesibles para una parte considerable de los usuarios o comunidades vulnerables.

Por otro lado, una gestión deficiente en los procesos de construcción ya sea por negligencia, falta de conocimiento o intereses económicos, ha derivado en la degradación prematura de edificaciones. Esta situación ha ocasionado derrumbes en distintas ciudades alrededor del mundo, resultando no solo en pérdidas económicas cuantiosas, sino también en lamentables

pérdidas humanas. Algunos ejemplos representativos incluyen el derrumbe ocurrido en 2013 en la ciudad de Medellín, Colombia; el colapso de un edificio en 2020 en Bhiwandi, India; el trágico derrumbe en junio de 2021 en Surfside, Miami, Estados Unidos; así como el colapso estructural en la ciudad de Gwangju, Corea del Sur. En todos estos casos se identificó como causa probable el mal proceso de construcción, abarcando desde el incumplimiento de normativas y leyes locales, el uso de materiales de baja calidad, hasta la ejecución inadecuada de las obras [29].

Esta problemática se agrava considerablemente en México, particularmente en el caso de las casas habitación de interés social, donde las especificaciones técnicas exigidas para la construcción suelen ser menos rigurosas que aquellas aplicables a edificaciones destinadas a otros fines, como el comercial o industrial. En muchas ocasiones, se sacrifica el factor de durabilidad en favor de intereses económicos inmediatos, beneficiando a empresas constructoras, desarrolladores inmobiliarios y otras entidades involucradas en estos proyectos. De este modo, se deja de lado la necesidad de garantizar viviendas seguras, resilientes y con una vida útil adecuada para sus habitantes.

Debido a este contexto, existe un creciente interés por explorar y promover el uso de métodos constructivos alternos que involucren materiales más naturales, eficientes y sustentables, especialmente aquellos que estén disponibles en zonas cercanas al lugar de construcción. Este enfoque cobra particular relevancia en las zonas costeras, donde la atmósfera, caracterizada por altos niveles de humedad y salinidad, presenta condiciones ambientales extremadamente agresivas para las construcciones [30]. Por lo tanto, resulta imperioso desarrollar y proponer técnicas constructivas y materiales que sean adecuados para soportar climas tropicales, húmedos y salinos.

El uso de materiales endémicos como parte de la estrategia de construcción sostenible se fundamenta en la premisa de que dichos materiales presentan una mejor adaptabilidad a las condiciones ambientales locales. Esto los convierte en alternativas viables y estratégicas para su incorporación en los procesos constructivos [12]. Un caso específico es la zona sur del estado de Tamaulipas, la cual se caracteriza por su actividad industrial intensa y por su clima

predominantemente caluroso y húmedo durante la mayor parte del año. Estas condiciones ambientales adversas serán el punto de partida para el desarrollo de la presente investigación.

En este estudio se propone aprovechar una planta endémica de la región, el nopal (*Opuntia ficus-indica*), para emplearlo como aditivo en la formulación de concretos armados. Para ello, se plantea caracterizar adecuadamente los materiales involucrados durante el proceso de fabricación, realizar pruebas electroquímicas orientadas a evaluar las propiedades inhibitoras o retardantes de la corrosión que ofrece el mucílago de nopal sobre las varillas de refuerzo de acero, y analizar los resultados obtenidos mediante metodologías científicas robustas y reproducibles.

El alcance de esta investigación trasciende el análisis electroquímico tradicional, ya que busca no solo generar conocimiento básico en el ámbito científico, sino también ofrecer aplicaciones prácticas que impacten directamente en la vida cotidiana de las personas, especialmente en la edificación de viviendas y en la preservación de edificios de interés social. Este tipo de aplicaciones prácticas resulta especialmente relevante considerando el actual problema nacional relacionado con el déficit y deterioro de viviendas adecuadas y seguras.

En este contexto, la adecuada selección de los materiales que conforman una construcción representa uno de los primeros procesos más relevantes y críticos dentro del ciclo de vida de una obra, siendo determinante para su correcto diseño, ejecución y durabilidad [31]. La correcta elección de materiales no solo impacta en la resistencia estructural y funcionalidad, sino también en la sostenibilidad y en la reducción de costos de mantenimiento a largo plazo.

El impacto del presente proyecto de investigación puede clasificarse en tres ámbitos fundamentales: social, económico y ambiental. En el ámbito social, contribuirá a mejorar la calidad de vida de las personas mediante construcciones más seguras y duraderas; en el ámbito económico, reducirá los costos de reparación y mantenimiento de las infraestructuras; y en el ámbito ambiental, promoverá el uso de recursos renovables y disminuirá el impacto ambiental asociado a los materiales tradicionales.

Finalmente, el aporte específico de esta investigación radica en el estudio del efecto del mucílago de nopal sobre la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en estructuras de

concreto armado, empleando técnicas electroquímicas avanzadas para comprender con mayor profundidad el proceso de protección o pasivación de las varillas ante los fenómenos de corrosión. De este modo, se espera sentar bases sólidas para el desarrollo de nuevas estrategias de construcción más sostenibles, accesibles y adaptadas a las condiciones ambientales locales.

1.4. Contexto de la investigación.

La presente investigación se llevó a cabo en dos fases fundamentales que abarcaron diversos aspectos relacionados con el diseño de las mezclas de concreto, la obtención del mucílago de nopal como aditivo, la realización de pruebas mecánicas, así como la elaboración y análisis de probetas.

La primera fase de la investigación, que comprendió el diseño de la mezcla de concreto y la obtención del mucílago, así como las primeras pruebas mecánicas para evaluar las propiedades básicas de los materiales, se desarrolló en el laboratorio de Resistencia de materiales y Mecánica de suelos de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Campus Tampico. En esta fase, se llevaron a cabo una serie de procedimientos técnicos y experimentales orientados a obtener una mezcla adecuada de concreto reforzado que sirviera de base para las pruebas subsiguientes, además de realizar la obtención y procesamiento del mucílago de nopal, que fue el aditivo clave en el estudio.

La obtención del mucílago se realizó mediante técnicas adecuadas que permitieron la extracción eficiente de este compuesto natural, asegurando su calidad y pureza, elementos fundamentales para su aplicación efectiva en la mezcla de concreto. Además, en esta fase se diseñaron y prepararon las probetas que serían sometidas a las pruebas mecánicas correspondientes para evaluar la resistencia del concreto modificado con mucílago de nopal en comparación con las propiedades del concreto convencional sin este aditivo. Estos procedimientos fueron la clave para la validación inicial de la viabilidad de usar mucílago de nopal en la mejora de las propiedades mecánicas y durabilidad de las estructuras de concreto.

Por otro lado, la segunda parte de la investigación se centró en el mantenimiento de las probetas bajo diversas condiciones de trabajo, simulando las situaciones a las que se enfrentan las construcciones en la vida real, particularmente en ambientes con condiciones ambientales severas que favorecen el deterioro de las estructuras. Las probetas fueron sometidas a condiciones controladas en diferentes escenarios climáticos y ambientales para evaluar su comportamiento en términos de resistencia a la humedad, temperatura y otros factores ambientales que podrían acelerar o retardar el proceso de degradación. Estas pruebas permitieron observar cómo el mucílago de nopal actúa como un agente protector en el concreto, contribuyendo a mejorar su resistencia a la corrosión y otros factores de deterioro.

Las pruebas electroquímicas esenciales para analizar la velocidad de corrosión en las varillas de acero incrustadas en el concreto se realizaron en los laboratorios de Electrónica y Síntesis II del Tecnológico Nacional de México – Tecnológico de Ciudad Madero, Campus I y II, respectivamente. En estos laboratorios, se utilizaron equipos avanzados para realizar mediciones precisas de las reacciones electroquímicas que ocurren en las varillas de refuerzo bajo diferentes condiciones de exposición. Este análisis electroquímico proporcionó datos cruciales sobre el impacto del mucílago de nopal en la protección de las varillas de acero, así como sobre su capacidad para inhibir la corrosión, prolongando así la vida útil de las estructuras de concreto.

Las condiciones de trabajo en los laboratorios del Tecnológico Nacional de México fueron óptimas para realizar las pruebas electroquímicas debido a la disponibilidad de equipos de última generación, lo que permitió llevar a cabo los análisis de manera precisa y eficiente, obteniendo datos relevantes para la interpretación de los resultados. De esta manera, las dos partes de la investigación se complementaron mutuamente, brindando un enfoque integral sobre la evaluación de los efectos del mucílago de nopal en la mejora de las propiedades del concreto armado y la protección del acero de refuerzo contra la corrosión.

1.5. Organización de la tesis.

La tesis se encuentra organizada en un total de seis capítulos, cada uno de los cuales aborda aspectos fundamentales relacionados con la investigación y el análisis de la corrosión de las

varillas de refuerzo en las construcciones de concreto. A continuación, se describe detalladamente el contenido de cada capítulo, que proporciona una estructura clara y comprensible para el desarrollo y los resultados obtenidos a lo largo de la investigación.

Capítulo 1. Introducción. En este capítulo se presenta el tema general de la tesis, que aborda uno de los problemas más relevantes en la construcción moderna: la corrosión de las varillas de refuerzo en las estructuras de concreto armado. A lo largo de este capítulo se explora cómo una mala planeación en el proceso de construcción, la elección incorrecta de los materiales, las condiciones atmosféricas adversas, la falta de un uso adecuado de aditivos para la construcción, y la carencia de una correcta implementación de materiales naturales durante la fabricación del hormigón, pueden contribuir significativamente a la degradación de las estructuras. Además, se describe el planteamiento del problema, señalando que el factor principal que acelera la degradación de las construcciones es la introducción de cloruros a través de los poros del concreto, lo que genera un ambiente propicio para la corrosión del acero. En este contexto, se menciona que el uso de materiales endémicos provenientes de la zona de construcción, como el mucílago de nopal puede mejorar la calidad del concreto, ayudando a retardar o disminuir la corrosión de las varillas de acero empleadas en la construcción. De esta forma, se plantea que la incorporación de estos materiales naturales es una solución para mitigar los efectos negativos de la corrosión en las construcciones.

Capítulo 2. Marco teórico. Este capítulo tiene como objetivo presentar los elementos fundamentales sobre los cuales se desarrolla la investigación. Se abordan los conceptos teóricos básicos relacionados con los materiales involucrados en el proceso de experimentación, tales como el concreto, las varillas de refuerzo, los procesos de corrosión y los aditivos utilizados. Asimismo, se definen los parámetros de referencia que se utilizaron para las pruebas experimentales realizadas durante la investigación. A través de una revisión detallada de los principios científicos que sustentan los estudios de corrosión en estructuras de concreto, se establece el marco teórico que sirve de base para comprender las dinámicas de interacción entre los materiales y los factores ambientales que afectan la durabilidad del concreto armado.

Capítulo 3. Estado del arte. En este capítulo se presenta una exhaustiva revisión bibliográfica que fundamenta la investigación. Se analizan los estudios realizados por otros investigadores sobre la corrosión del acero en estructuras de concreto, el uso de materiales y técnicas especializadas, y las pruebas experimentales realizadas en condiciones controladas. Algunos estudios sugieren el uso de materiales y equipos altamente especializados, pero estos son poco accesibles en zonas rurales, lo que representa una limitación para su implementación en proyectos de construcción a gran escala. Por otro lado, otros autores realizaron sus investigaciones bajo condiciones controladas de laboratorio, lo que les permitió obtener resultados precisos y reproducibles. Estos estudios fueron considerados y adaptados en el desarrollo de la investigación actual. Finalmente, se concluye que la mejor opción para resolver el problema de la corrosión en las estructuras de concreto debe ser una decisión tomada de manera conjunta por los involucrados en cada proyecto de construcción, tomando en cuenta las condiciones locales y las posibilidades económicas de las zonas en intervención.

Capítulo 4. Metodología experimental. Este capítulo describe de manera detallada la metodología utilizada en la investigación. Se presenta un diagrama de flujo que ilustra las actividades realizadas para llevar a cabo el estudio y se detalla la matriz experimental utilizada para la fabricación de las probetas de concreto. Además, se describen los reactivos, materiales y equipos utilizados en los ensayos experimentales. Se incluyen las condiciones específicas de análisis necesarias para obtener los resultados esperados, así como los criterios que se emplearon para evaluar el comportamiento del concreto modificado con mucílago de nopal. La metodología experimental se centra en reproducir las condiciones reales de construcción y exposición para simular el impacto de factores ambientales como la humedad, la salinidad y la temperatura en la corrosión de las varillas de refuerzo.

Capítulo 5. Resultados y discusiones. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas organizados en tablas, gráficas e imágenes que muestran la evolución de los ensayos experimentales. Se lleva a cabo un análisis detallado de los datos arrojados por los diferentes ensayos, discutiendo cómo el mucílago de nopal impactó la resistencia del concreto y la protección de las varillas de refuerzo frente a la corrosión. Además, se evalúan los aportes de cada uno de los experimentos en relación con el objetivo

general de la investigación. Al final de este capítulo, se describe el comportamiento observado en la matriz del concreto durante la etapa de experimentación, detallando los procesos físicos y químicos que ocurrieron dentro de las probetas durante la exposición a las condiciones de prueba.

Capítulo 6. Conclusiones. Este capítulo ofrece una reflexión integral sobre los resultados obtenidos a lo largo de la investigación. Se determinan los beneficios y las limitaciones de la adición de mucílago de nopal en el diseño de mezclas de concreto, con énfasis en las posibles aplicaciones en la construcción de casas-habitación en zonas rurales, donde la disponibilidad de materiales es limitada y las condiciones ambientales son desafiantes. También se detallan algunas recomendaciones para continuar con investigaciones en la misma línea, con el objetivo de seguir evaluando la eficacia de los materiales naturales en la mejora de la durabilidad y resistencia de las estructuras de concreto. Las conclusiones resaltan la viabilidad del uso de mucílago de nopal como una alternativa económica y ecológica para combatir la corrosión en las construcciones.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas que sirvieron como base para la realización de este trabajo de investigación, proporcionando un listado de las fuentes consultadas que respaldaron los datos y enfoques utilizados a lo largo del estudio.

2. Marco teórico.

Existen diversos métodos desarrollados para proteger al acero de refuerzo de los efectos de la corrosión, un fenómeno que compromete seriamente la durabilidad y seguridad de las estructuras de concreto armado. La mayoría de estos métodos tradicionales requieren mano de obra altamente especializada, el uso de materiales industriales de alto costo y, en muchos casos, una supervisión constante para garantizar su correcta aplicación y funcionamiento a lo largo del tiempo [32]. Estas soluciones, aunque efectivas, no siempre resultan viables para proyectos de construcción en zonas rurales o de bajos recursos, debido a los altos costos y a la falta de acceso a la tecnología adecuada.

Dentro de las alternativas disponibles para enfrentar este problema se encuentra el uso de materiales naturales y endémicos, como el mucílago de nopal. Este tipo de adición orgánica se ha estudiado por sus propiedades para mejorar la calidad de concreto, otorgándole características adicionales de protección, principalmente al retardar el proceso de degradación que sufre el concreto ante condiciones ambientales agresivas [21]. El mucílago actúa como un agente modificador de la matriz del concreto, reduciendo su permeabilidad y limitando el acceso de agentes corrosivos como los cloruros hacia las varillas de refuerzo.

Para implementar eficazmente este método de protección alternativo, es necesario llevar a cabo un estudio detallado de los componentes involucrados en la mezcla de concreto, asegurándose de seleccionar adecuadamente tanto el tipo de nopal como las condiciones de extracción del mucílago. Posteriormente, es indispensable diseñar las mezclas de concreto que serán sometidas a ensayo, variando las proporciones de aditivo para evaluar su influencia en las propiedades mecánicas y químicas del material. Finalmente, se deben realizar pruebas específicas para analizar los resultados obtenidos, considerando factores como la resistencia mecánica, la permeabilidad, la velocidad de corrosión de las varillas, y otros parámetros

relevantes para determinar la eficacia del mucílago como inhibidor natural de la corrosión en estructuras de concreto armado.

2.1. Nopal.

El nopal es una planta perteneciente a la familia de las cactáceas que posee una enorme importancia agronómica, económica y cultural a nivel nacional [33]. Debido a su extraordinaria capacidad de adaptación, sus características permiten su desarrollo en una amplia variedad de ecosistemas, incluyendo zonas áridas, semiáridas y también en regiones templadas [34]. Esta planta arbustiva presenta un tronco leñoso a partir del cual se generan los cladodios o pendas, que constituyen sus ramas principales y cumplen funciones vitales como la fotosíntesis, almacenamiento de agua y reproducción. La epidermis del nopal está conformada por dos capas principales: la clorénquima, encargado de la fotosíntesis, y el parénquima, donde se encuentra almacenado el mucílago, sustancia de gran interés por sus múltiples aplicaciones [35]. La composición química del nopal es variable, pero generalmente contiene un 60 % y un 90 % de agua, además de componentes sólidos como 11.5 % de azúcares, 3.12 % de pectinas, 1.55 % de proteínas y 0.16 % de lípidos [36]. Esta composición lo convierte en un recurso muy versátil, utilizado en la alimentación, la medicina tradicional y más recientemente en la industria de la construcción.

2.1.1. Mucílago.

El mucílago es una sustancia viscosa que se encuentra en grandes cantidades en los cladodios del nopal. Químicamente, está compuesto principalmente de carbohidratos como L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y ácido galacturónico [37]. Sin embargo, la proporción de estos elementos puede variar ampliamente entre diferentes especies, e incluso dentro de una misma especie dependiendo de las condiciones ambientales, lo que impide establecer un orden sistemático en su composición. Además de polisacáridos, el mucílago contiene diversas proteínas formando un gel natural con un notable carácter de retención de agua [35]. Esta propiedad le confiere potencial para ser usado como agente modificador de propiedades en diversas aplicaciones, como la mejora de la calidad del concreto, donde puede actuar como retardante de la permeabilidad y como inhibidor natural de corrosión.

2.1.2. pH.

Las características fisicoquímicas del mucílago, entre ellas su viscosidad, retención de humedad y pH, están sujetas a factores como el tipo de suelo en el que crece la planta, la edad de los cladodios cosechados y las condiciones climáticas del entorno [37]. Debido a esta variabilidad, cada investigación debe determinar las propiedades específicas del mucílago utilizado para asegurar la consistencia y reproducibilidad de los resultados obtenidos [38]. En cuanto al pH, se ha reportado que el mucílago tiene una naturaleza ácida, presentando valores que se ubican dentro de un intervalo que va de 3.32 hasta 5.81 [39], lo que puede influir en las reacciones químicas dentro del concreto cuando se incorpora como aditivo.

2.2. Concreto armado.

El concreto armado es el resultado de la combinación de varios elementos: cemento, agua, arena, grava y acero de refuerzo. Esta mezcla genera un material compuesto que ofrece excelentes propiedades mecánicas, alta resistencia a esfuerzos de compresión y una notable durabilidad frente a factores ambientales agresivos [40]. El proceso fundamental que otorga solidez al concreto es la reacción química de hidratación del cemento con el agua, la cual produce la formación de compuestos que permiten el fraguado y el endurecimiento progresivo del material [41].

Para asegurar que el concreto cumpla con las propiedades deseadas, se deben seleccionar cuidadosamente las proporciones de sus componentes, basándose principalmente en la resistencia a la compresión, requerida para la obra. Según el Manual del Constructor de la empresa CEMEX para obtener un concreto con una resistencia aproximada de 200 kgf/cm^2 utilizando grava de tamaño $1\frac{1}{2}$ ", se deben mezclar y saco de cemento, 1.5 botes de agua, 4 botes de arena y 6.5 botes de grava, considerando que un bote equivale a 18 litros [42]. Esta metodología práctica es especialmente útil en contextos donde no es posible realizar un diseño detallado de mezclas, como ocurre en comunidades rurales o en proyectos de construcción autogestionada. Para los fines de esta investigación, sin embargo, se tomó como referencia el documento técnico NMX-C-155-ONNCCE-2014, que establece los lineamientos oficiales para el diseño de mezclas de concreto en México [43].

2.2.1. Cemento.

El cemento es uno de los componentes fundamentales en la fabricación del concreto y su producción implica una serie de procesos químicos y físicos complejos. Se elabora a partir de la combinación de varios materiales, principalmente sulfato de calcio dihidratado (yeso), óxido de calcio (conocido como cal libre), magnesia (periclasa), álcalis y Clinker. El Clinker es un material que se obtiene al someter una mezcla de carbonato de calcio (caliza) y arcilla a temperaturas elevadas cercanas a los 1,500 °C en hornos rotatorios especiales [40]. Posteriormente, el Clinker se muele finamente junto con una pequeña cantidad de yeso para obtener el cemento en polvo que conocemos y utilizamos en construcción. La clasificación de los diferentes tipos de cemento, basada en sus características y aplicaciones específicas se presenta en la Tabla 2.1 [43].

Tabla 2.1. Clasificación por tipo de cemento.

Clasificación	Descripción
CPO	Cemento Portland ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de sílice
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno

Un factor crucial en la calidad y desempeño del concreto es la relación agua-cemento. Esta relación determina la porosidad del concreto una vez endurecido; cuando mayor es la proporción de agua en la mezcla, mayor es la cantidad de poros interconectados que se forman, facilitando el ingreso de agentes externos como los cloruros. Estos, en presencia de humedad pueden alcanzar la armadura de acero de refuerzo y dar inicio al proceso de corrosión [32]. Es por esto por lo que controlar adecuadamente esta relación es esencial para garantizar la durabilidad de la estructura. Las relaciones agua cemento más comunes suelen encontrarse en dentro del intervalo de 0.4 a 0.6. Para concretos de alta resistencia, se prefieren las relaciones bajas de hasta 0.3. Entre los diferentes tipos de cemento, el cemento Portland ordinario se destaca por ofrecer una protección superior contra la corrosión metálica, debió a su alta alcalinidad y propiedades de sellado [41].

2.2.2. Agregados.

Dentro de la composición del concreto armado, además del cemento y el acero de refuerzo, los agregados desempeñan un papel esencial. Se clasifican en dos tipos principales: agregado grueso (grava) y agregado fino (arena). Los agregados no solo proporcionan volumen al concreto, sino que también contribuyen significativamente a su estabilidad dimensional, resistencia mecánica y durabilidad en el tiempo [42]. Un concreto bien diseñado con agregados de buena calidad permite reducir la cantidad de agua necesaria, mejorar la trabajabilidad de la mezcla fresca y aumentar su resistencia a largo plazo. Además, los agregados actúan como barrera física que ayuda a limitar la propagación de fisuras en la matriz del concreto endurecido, prolongando así la vida útil de las estructuras.

2.2.3. Varilla de refuerzo.

Las varillas de refuerzo son elementos de acero que se incorporan al concreto armado para mejorar su comportamiento estructural. Debido a que el concreto es excelente en resistir esfuerzos de compresión pero débil frente a esfuerzos de tracción, las varillas compensan esta deficiencia al resistir fuerzas de tracción y flexión [41]. El acero de refuerzo utilizado se presenta generalmente en forma de varillas corrugadas, las cuales poseen nervaduras que mejoran la adherencia con el concreto circundante. Estas varillas están compuestas principalmente por una aleación de hierro y carbono [32], y su resistencia mecánica, ductilidad y durabilidad son factores clave en el diseño de elementos estructurales seguros y eficientes.

2.2.4. Degradación de las construcciones.

La degradación de las construcciones de concreto armado es un fenómeno complejo, ya que generalmente no se debe a una única causa, sino a la combinación de varios factores físicos, químicos y ambientales [44]. Entre ellos destacan la acción del agua, sales, cambios de temperatura, ciclos de congelación y deshielo, cargas dinámicas y la presencia de agentes químicos agresivos. Un aspecto crucial es la resistencia eléctrica del concreto, la cual está íntimamente relacionada con su capacidad para resistir la corrosión. Asimismo, el alto pH

natural del concreto, alcalino debido a los productos de hidratación del cemento, proporciona inicialmente un ambiente protector para el acero de refuerzo [45].

No obstante, la corrosión del acero es uno de los mayores desafíos en la ingeniería civil, ya que puede conducir a la falla prematura de estructuras [44]. El inicio de este proceso se da cuando se forman microceldas electroquímicas con zonas anódicas y catódicas en la superficie del acero, usando al concreto como electrolito conductor [32]. A medida que la corrosión progresa, se generan productos de corrosión que ocupan más volumen que el acero original, generando tensiones internas que provocan fisuramientos, desprendimientos del recubrimiento de concreto y, finalmente, pérdida de la capacidad estructural [32]. En ambientes costeros, la alta concentración de sales, especialmente cloruros, acelera de manera significativa estos mecanismos de deterioro [44]. La difusión de cloruros en el concreto reduce su pH interno, disminuyendo la capacidad protectora de la capa pasivadora sobre el acero y facilitando el inicio de la corrosión.

2.2.5. Agua de mezclado.

El agua utilizada en la mezcla de concreto para esta investigación cumple con las especificaciones establecidas para el agua potable en México, conforme a lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Esta norma establece los límites permisibles de calidad para parámetros físicos, químicos y biológicos, garantizando que el agua sea segura para el consumo humano y, por extensión, adecuada para su uso en construcción. La Tabla 2.2 presenta un resumen de los principales parámetros fisicoquímicos considerados, tales como pH, contenido de sólidos disueltos, alcalinidad, entre otros [46].

Cumplir con estos requisitos es esencial ya que el agua juega un papel fundamental en la hidratación del cemento y, por lo tanto, en el desarrollo de las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. Además, para asegurar la compatibilidad en aplicaciones constructivas, se verificó también el cumplimiento de la norma NMX-C-122- ONNCCE-2019, que establece los criterios específicos que debe cumplir el agua de mezclado empleada en la producción de concreto [47]. Utilizar agua no apta podría alterar el fraguado, reducir la resistencia final, o incluso favorecer la corrosión temprana del acero de refuerzo.

Tabla 2.2. Parámetros fisicoquímicos del agua potable.

Parámetro	Valores	Parámetro	Valores
pH	6.5 – 8.5	Arsénico	< 0.025 mg/L
Sólidos disueltos totales	< 1,000 mg/L	Mercurio	< 0.001 mg/L
Turbidez	< 5 UNT	Cadmio	< 0.003 mg/L
Cloruros	< 250 mg/L	Cromo total	< 0.05 mg/L
Sulfatos	< 400 mg/L	Plomo	< 0.01 mg/L
Fluoruros	< 1.5 mg/L	Cianuros	< 0.07 mg/L
Dureza total	< 500 mg/L	Hierro	< 0.3 mg/L
Aluminio	< 0.2 mg/L	Manganeso	< 0.15 mg/L
Nitratos	< 10 mg/L	Cloro residual libre	0.2 – 1.5 mg/L
Nitritos	< 1 mg/L	Conductividad eléctrica	1,000 μ S/cm
Amonio	< 0.5 mg/L	Carbono orgánico total	< 3 mg/L

2.3. Técnicas de análisis.

La evaluación o determinación precisa de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los elementos utilizados en la construcción es fundamental para garantizar la calidad, durabilidad y seguridad de las estructuras. Realizar análisis detallados permite identificar debilidades potenciales, ajustar diseños estructurales, optimizar mezclas y seleccionar materiales adecuados para cada condición de servicio. A través de diversas técnicas de caracterización, se obtienen datos que sirven de base para implementar acciones correctivas o de mejora en el proceso constructivo, incrementando así la vida útil de las edificaciones.

2.3.1. Espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR).

La técnica FTIR permite analizar la composición química de materiales a partir de la obtención de un espectro de reflexión o absorción de los grupos funcionales presentes en una muestra determinada. En el caso específico del mucílago de nopal, esta técnica facilita la identificación de las bandas características de los azúcares que lo constituyen, lo cual es relevante para comprender su comportamiento dentro del concreto.

El análisis se realiza en un intervalo de número de onda de 4,000 – 450 cm^{-1} , donde se ubican las bandas de absorción más representativas de los componentes orgánicos [48].

Durante el análisis, se registran los valores de transmitancias o absorbancia, los cuales son interpretados para identificar los grupos funcionales como hidroxilos, carbonilos y carboxilos. La presencia de estos grupos influye en las propiedades fisicoquímicas del mucílago, como

su capacidad de retención de agua, viscosidad y comportamiento frente a agentes externos. Este conocimiento permite evaluar la potencialidad del mucílago como aditivo natural en mezclas de concreto, especialmente en zonas donde los materiales convencionales son escasos o costosos.

2.3.2. Porosidad.

La porosidad es un parámetro de vital importancia en el estudio de materiales de construcción, ya que determina el volumen de espacios vacíos presentes dentro de una probeta o estructura sólida. Este volumen de poros tiene una influencia directa sobre la durabilidad, resistencia mecánica y comportamiento frente a agentes agresivos del concreto [49].

La porosidad está estrechamente relacionada con la capacidad de absorción de líquidos o gases [50]. Un exceso de agua de mezclado o una mala compactación durante el proceso de fabricación conduce a un aumento de la porosidad, generando una estructura con menos resistencia, mayor permeabilidad y vulnerabilidad a procesos de deterioro [51].

Una alta proporción de poros interconectados en la matriz de concreto facilita el ingreso de sustancias agresivas, como los cloruros, que promueven la corrosión del acero de refuerzo [52]. La presencia de poros también disminuye la capacidad de protección del concreto, reduciendo su efectividad como barrera física y química [53]. Por tanto, el control de la porosidad es esencial para prolongar la vida útil de las estructuras, especialmente en ambientes marinos o altamente agresivos.

2.3.3. Micrografía.

La micrografía óptica constituye una técnica básica pero fundamental para la caracterización superficial de materiales. Mediante el uso de un microscopio óptico, se obtienen imágenes ampliadas de la superficie del material de estudio, permitiendo analizar características como la rugosidad, textura, coloración y distribución de los poros [54].

La técnica consiste en tomar fotografías a diferentes niveles de aumento, facilitando la evaluación visual de defectos superficiales, fisuras incipientes o zonas de segregación de materiales. Estas imágenes permiten establecer correlaciones entre la estructura micrográfica

y las propiedades mecánicas del material, además de ser una herramienta esencial en estudios de deterioro superficial o de control de calidad de materiales de construcción.

2.3.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM).

La microscopía electrónica de barrido es una herramienta avanzada que permite el estudio detallado de la morfología superficial de los materiales a nivel micrométrico y nanométrico. Esta técnica se basa en el bombardeo de la muestra con un haz concentrado de electrones, generando una imagen tridimensional de alta resolución como resultado de las interacciones electrónicas entre el haz incidente y la superficie del material [55].

El SEM es particularmente útil en la investigación de materiales como el concreto y el acero al carbón, ya que permite visualizar la microestructura interna, identificar zonas afectadas por corrosión, estudiar la distribución de los productos de hidratación en el concreto, analizar microfisuras y evaluar la adhesión entre el concreto y el acero de refuerzo [56].

Además, con la ayuda de detectores de energía dispersiva de rayos X (EDS), se puede realizar un análisis elemental puntual de las áreas de interés, proporcionando información sobre la composición química de las fases presentes en la muestra [57]. Esta combinación de información morfológica y química resulta esencial para entender los mecanismos de deterioro, validar tratamientos de protección y optimizar formulaciones de mezclas de concreto más resistentes.

2.3.5. Resistencia a la compresión.

La prueba de compresión es uno de los ensayos más importantes y representativos en el estudio de materiales de construcción, particularmente del concreto. Esta prueba permite conocer la fuerza de cohesión interna de la mezcla, siendo esta la propiedad principal del concreto: su resistencia mecánica. La resistencia a compresión es esencial para garantizar la estabilidad, durabilidad y funcionalidad de las estructuras civiles, ya que su función primaria es soportar cargas y transmitirlas adecuadamente hacia el suelo [58].

Mediante el ensayo de compresión se evalúa la capacidad del concreto para soportar fuerzas aplicadas que tienden a reducir su volumen, permitiendo establecer si cumple con las

especificaciones de diseño estructural [59]. La importancia de este parámetro radica en que, sin una adecuada resistencia a compresión, las estructuras serían incapaces de resistir esfuerzos de servicio, cargas accidentales o fenómenos naturales como sismos o huracanes.

La Tabla 2.3 presenta un criterio generalizado para determinar el nivel de resistencia de un concreto, clasificándolo en categorías que sirven como referencia para su uso en diferentes tipos de obra [60]. La resistencia a compresión también sirve como un indicador indirecto de otras propiedades del concreto, como su densidad, permeabilidad y durabilidad frente a ambientes agresivos.

Tabla 2.3. Criterios para determinar la resistencia de un concreto.

Resistencia	Criterio
> 45 MPa	Durable
< 20 MPa	Baja resistencia

2.3.6. Resistividad eléctrica.

Uno de los factores críticos que afectan la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en concreto es la resistividad eléctrica del material que lo rodea [61]. La resistividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para resistir el paso de una corriente eléctrica y se define como el recíproco de su conductividad. Esta propiedad depende de múltiples factores, tales como la porosidad, la saturación de humedad, la concentración de iones y la microestructura del concreto.

En general, valores altos de resistividad indican una estructura interna densa, con baja porosidad y, por lo tanto, menor permeabilidad al ingreso de agentes corrosivos como cloruros y dióxido de carbono [62].

A pesar de su importancia, actualmente no existe un criterio único o universalmente aceptado para determinar valores óptimos de resistividad en concreto [25]. Sin embargo, algunos autores proponen intervalos de referencia, como los establecidos en la Tabla 2.4, basados en la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019 [63]. Estos valores permiten estimar de manera preliminar la probabilidad de corrosión en estructuras de concreto armado expuestas a ambientes agresivos.

Tabla 2.4. Criterios de evaluación del riesgo de corrosión con base en la resistividad eléctrica.

Criterio.	Intervalo.
Muy bajo riesgo de corrosión	100 - 200 K Ω cm
Bajo riesgo de corrosión	50 - 100 K Ω cm
Alto a moderado riesgo de corrosión	10 - 50 K Ω cm
Muy alto riesgo de corrosión	< 10 K Ω cm

2.3.7. Potencial a circuito abierto.

El potencial a circuito abierto es una técnica electroquímica que mide el voltaje natural entre una barra de refuerzo embebida en concreto y un electrodo de referencia cuando no circula corriente externa. Esta medición proporciona información indirecta sobre el estado de corrosión del acero de refuerzo, ya que el potencial está fuertemente influenciado por la humedad, la porosidad y el grado de carbonatación del concreto que rodea la varilla [64].

La interpretación de los valores de potencial permite estimar la probabilidad de que el acero esté en proceso de corrosión activa. En general, valores de potencial más negativos están asociados a un mayor riesgo de corrosión, mientras que valores más positivos indican condiciones más pasivas. Esta técnica es sencilla, no destructiva y ampliamente utilizada en el monitoreo de estructuras en servicio para evaluar su integridad.

2.3.8. Velocidad de corrosión.

La velocidad de corrosión es un parámetro clave para estimar la vida útil de las estructuras de concreto armado. Para su determinación, una de las técnicas más empleadas es la prueba de resistencia a la polarización lineal, la cual actúa como indicador indirecto de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo [65].

El principio básico de esta técnica consiste en aplicar un pequeño sobrepotencial (± 20 mV respecto al potencial de corrosión) y medir la corriente resultante. Bajo estas condiciones, se establece una relación lineal entre el potencial aplicado y la densidad de corriente, cuya pendiente se denomina resistencia a la polarización [22].

Una alta resistencia a la polarización indica una baja velocidad de corrosión, mientras que una resistencia baja sugiere un proceso de corrosión activo y acelerado. La velocidad de corrosión se calcula mediante la ecuación de Stern-Geary, que relaciona la densidad de

corriente de corrosión con el coeficiente B, el cual depende de las pendientes anódicas y catódicas de las curvas de Tafel. Para metales activos se asume un valor B de 26 mV y para metales pasivos de 52 mV [67].

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2.1)$$

La Tabla 2.5 presenta la relación entre los valores de velocidad de corrosión obtenidos y la vida útil estimada del acero de refuerzo, proporcionando una herramienta práctica para la evaluación del estado de las estructuras [68].

Tabla 2.5. Vida útil del acero en función de la velocidad de corrosión.

Corriente de corrosión. I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Corrosión de la barra de refuerzo.
< 0.1	Despreciable
0.1 – 0.5	Baja a moderada
0.5 – 1.0	Moderada a elevada
> 1.0	Elevada

2.3.9. Eficiencia.

La eficiencia de inhibición de la corrosión es un parámetro fundamental cuando se evalúa el desempeño de aditivos o tratamientos protectores aplicados al concreto. En este contexto, la eficiencia permite relacionar cuantitativamente la reducción en la velocidad de corrosión obtenida gracias a la incorporación de aditivos, como el mucílago de nopal, en comparación con mezclas de referencia sin inhibidor [69].

Una eficiencia cercana al 100 % es considerada ideal, ya que implica una casi total inhibición del proceso corrosivo. No obstante, incluso eficiencias moderadamente altas pueden ser suficientes para extender significativamente la vida útil de las estructuras.

El cálculo de la eficiencia permite validar de manera cuantitativa los beneficios del uso de materiales endémicos en la construcción y ofrece una base sólida para su recomendación en proyectos que buscan combinar sustentabilidad, bajo costo y durabilidad estructural.

3. Estado del arte.

Dentro del campo de la modificación y mejoramiento de las propiedades del concreto armado con el objetivo de disminuir el proceso de corrosión que afecta a las varillas de refuerzo, se ha explorado la aplicación de diversos aditivos, entre ellos aquellos basados en extractos de cactus, particularmente de especies como el nopal. A través de la incorporación de estos materiales naturales, se busca ofrecer alternativas sostenibles, económicas y de bajo impacto ambiental en la construcción moderna.

En este contexto, se han desarrollado trabajos de investigación que servirán como referencia y punto de partida para el planteamiento y ejecución del presente proyecto de investigación. Dichos estudios previos permiten entender no solo la composición y propiedades del mucílago, sino también su interacción potencial con los componentes del concreto, así como su efectividad en la inhibición del proceso de corrosión en condiciones diversas.

Uno de los trabajos pioneros en este ámbito fue realizado en el año 2001 por Majdoub et al., quienes llevaron a cabo estudios detallados sobre la obtención de mucílago de cactus. En su investigación desarrollaron un método que consistía en la extracción del mucílago a temperatura ambiente y bajo el pH natural del cactus, evitando la aplicación de tratamientos térmicos o químicos agresivos que pudieran alterar las propiedades naturales del compuesto. El procedimiento empleado se basó en la disolución acuosa de la pulpa de nopal, seguida de un proceso de filtrado para separar las impurezas sólidas y concentrar los polisacáridos de interés. Los resultados observados en su estudio revelaron que los polisacáridos obtenidos representaban aproximadamente un 10 % en peso respecto a la pulpa inicial, un rendimiento considerado adecuado para aplicaciones prácticas. Además, se encontró que la composición química de estos polisacáridos era muy similar a la de la pectina, un polímero natural conocido por su capacidad de formar estructuras gelificadas y retener agua. El análisis del peso molecular mostró que los polisacáridos extraídos tenían un peso molecular promedio

del orden de $10 \times 10^{-6} \text{ g mol}^{-1}$, lo cual confirma su naturaleza de macromoléculas complejas. Esta característica resulta de gran interés para su aplicación en el concreto armado, ya que los polisacáridos de alto peso molecular pueden influir en la microestructura de la mezcla, mejorando su capacidad de retención de humedad, disminuyendo la porosidad y, en consecuencia, limitando el acceso de agentes agresivos como los cloruros hasta el acero de refuerzo.

Por otro lado, en el año 2001, Torres-Acosta et al., realizaron un importante estudio enfocado en el diseño de estructuras de concreto con base en criterios de durabilidad considerando de manera integral las acciones mecánicas y ambientales que afectan a las edificaciones a lo largo de su vida útil. En este trabajo, se determinó que la corrosión de las varillas de acero de refuerzo genera un aumento de volumen debido a la formación de productos de corrosión, fenómeno que a su vez provoca la aparición de grietas en el concreto circundante. Estas grietas comprometen seriamente la integridad estructural, ya que disminuyen la capacidad de carga de las estructuras y aceleran el proceso de degradación al facilitar el ingreso de agentes agresivos como el agua y los cloruros. El estudio destaca la necesidad de integrar consideraciones de durabilidad desde las primeras etapas de diseño estructural para extender la vida útil de las edificaciones, especialmente en ambientes agresivos.

En el año 2005, Miranda et al., llevaron a cabo un análisis detallado sobre dos métodos de rehabilitación de estructuras de concreto armado corroídas: la realcalinización electroquímica y la extracción electroquímica de cloruros. Estos métodos buscan revertir o mitigar los efectos de la corrosión inducida tanto por la carbonatación del concreto debido al CO_2 atmosférico como por la penetración de iones cloruro provenientes del medio ambiente. En su investigación, analizaron la respuesta electroquímica de electrodos tanto limpios como precorroídos, sumergidos en soluciones que simulan la fase acuosa de la red de poros del concreto, replicando condiciones reales de servicio. Los resultados obtenidos permitieron concluir que dichos métodos de rehabilitación son efectivos únicamente si se aplican en las etapas iniciales del daño, es decir, antes de que el frente de carbonatación o el perfil de concentración de cloruros alcance las armaduras. Una vez que la corrosión ha avanzado considerablemente, los beneficios de estos tratamientos se reducen de manera significativa.

En ese mismo año, en 2005, Solís-Carreño et al., llevar a cabo un estudio sobre la durabilidad de las estructuras de concreto utilizadas en viviendas de interés social ubicadas en zonas costeras, donde los factores ambientales representan un riesgo elevado para la integridad de los materiales. Analizaron tanto los aspectos ambientales, como la salinidad y la humedad relativa, así como los factores económicos y de prácticas de construcción locales. Concluyeron que en las zonas costeras se presentan las condiciones más agresivas para el acero de refuerzo, debido a la alta concentración de cloruros en el ambiente. Además, señalaron que deficiencias en el diseño de la mezcla, la baja calidad de los materiales y las prácticas de construcción inadecuadas incrementan la vulnerabilidad de las estructuras. Propusieron mejorar los procesos constructivos mediante el uso de materiales con características especiales de durabilidad y un diseño más adecuado de mezclas de concreto, así como reforzar la supervisión de la calidad de la construcción, para garantizar una vida útil prolongada de las viviendas.

Posteriormente, en el año 2009, Moreno et al., desarrollaron una investigación para evaluar los efectos del ambiente urbano sobre el concreto reforzado después de cuatro años de exposición en diferentes entornos. El estudio se enfocó en analizar la concentración de cloruros en especímenes de concretos fabricados con dos relaciones diferentes de agua-cemento (0.65 y 0.45), expuestos tanto a ambientes marinos como no marinos. Los resultados mostraron que las concentraciones de cloruros en las probetas con relación agua-cemento de 0.65 fueron superiores a los valores permitidos por las normas para concretos nuevos sometidos a exposición a ambientes con cloruros, ya fuera en condiciones de humedad constante o en ciclos húmedo-seco. En cambio, las probetas con una relación agua-cemento de 0.45 mostraron concentraciones aceptables en ambientes secos, pero superaban los límites normativos en ambientes húmedos cargados de sales. Estos resultados enfatizan la importancia de controlar estrictamente la relación agua-cemento durante el diseño de la mezcla para minimizar la porosidad y la permeabilidad del concreto, factores determinantes en la resistencia a la penetración de cloruros y en la prevención de la corrosión de las armaduras.

Por su parte, en el año 2013, González et al., llevaron a cabo una investigación centrada en el análisis de los ensayos de ruido electroquímico y resistencia a la polarización lineal, empleando un monitor electroquímico de corrosión atmosférica tipo peineta, equipado con electrodos iguales. Este estudio buscó establecer relaciones cuantitativas entre los datos de corrosión obtenidos y las condiciones atmosféricas predominantes durante los ensayos. Durante las pruebas experimentales, se aplicaron condiciones de temperatura controlada, en un intervalo de 85 a 90 °C, junto con agitación continua del electrolito para simular un entorno dinámico y homogéneo. Los resultados indicaron que un aumento en la humedad relativa del medio ambiente tiene un impacto directo en la disminución de la resistencia a la polarización lineal del material, lo que a su vez incrementa significativamente la velocidad de corrosión. Además, observaron que bajo condiciones de alta humedad, se aceleran los procesos de despasivación del acero, aumentando el riesgo de daño estructural en ambientes agresivos.

En el estudio realizado en 2013 por Vera et al., se analizaron especímenes de concretos fabricados con dos tipos distintos de cemento: Portland puro y Portland puzolánico, ambos reforzados con acero de refuerzo convencional y galvanizado. Los especímenes fueron sometidos a rigurosos ciclos de inmersión y secado en una solución de NaCl 2.56 M, diseñada para simular ambientes con alta concentración de cloruros. Para evaluar el comportamiento del material, se realizaron pruebas de absorción de agua, determinación de porosidad, medición de la resistencia a la polarización lineal y análisis cuantitativo de cloruros presentes en las probetas. A partir de sus observaciones, concluyeron que el tipo de cemento utilizado no influye significativamente en el proceso de inicio de la corrosión del acero. En cuanto a la protección proporcionada por el recubrimiento galvanizado, se determinó que este tipo de acero presentó el inicio de corrosión hasta tres ciclos después en comparación con el acero corriente, lo que sugiere una mayor resistencia inicial. También establecieron que el acero corriente sufre un proceso de activación cuando la concentración de cloruros supera el umbral necesario para romper la capa pasiva de óxido natural, exponiéndolo así a procesos de corrosión acelerada.

Adicionalmente, en el año 2014, Martínez-Molina et al., realizaron un estudio innovador sobre las propiedades físicas del cemento modificado con adición de cactus deshidratado, específicamente nopal. Para su investigación, mezclaron nopal deshidratado en proporciones de 1 %, 2 % y 4 % en peso de cemento Portland convencional. A través de pruebas estandarizadas, determinaron que, a medida que aumentaba la proporción de cactus en la mezcla, se observaba una disminución en el tiempo de fraguado, es decir, el concreto comenzaba a endurecerse más rápidamente. Asimismo, se constató un aumento en el requerimiento de agua de las mezclas para alcanzar una trabajabilidad adecuada, lo cual puede atribuirse a la naturaleza higroscópica de los componentes del nopal. Otro efecto importante detectado fue la disminución en la fluidez del mortero, lo que sugiere la necesidad de ajustar las técnicas de mezclado y colocación cuando se incorpora este tipo de aditivo natural en las mezclas de cemento.

En el año 2015, Maki-Díaz et al., realizaron un estudio experimental para cuantificar la cantidad de mucílago presente en el nopal. Su procedimiento consistió en hidratar nopal previamente liofilizado, seguido de un proceso de precipitación con alcohol etílico para recuperar el mucílago, que posteriormente fue sometido nuevamente a liofilización. A partir de este método de extracción, encontraron que el contenido de mucílago en el nopal varía entre un 3.8 % y un 8.5 % en peso, dependiendo de factores como el estado de madurez de la planta y las condiciones ambientales de cultivo. Estos resultados son de gran relevancia para la investigación de aditivos naturales en la industria del concreto, pues el mucílago podría conferir propiedades específicas de retención de humedad y modificación de la microestructura del material cementante.

Adicionalmente, en el año 2016, Vargas-Rodríguez et al., llevaron a cabo un estudio enfocado en la caracterización de las propiedades físicas del mucílago extraído del nopal fresco. Para ello, trituraron hojas frescas de nopal y las maceraron en agua durante un período de 12 horas, realizando posteriormente una serie de filtraciones para purificar el extracto, repitiendo este proceso tres veces más para maximizar la extracción. Mediante este método, determinaron que se podía obtener un rendimiento de 2.56 % de mucílago respecto al peso de la hoja fresca. Además, realizaron la medición de pH, encontrando un valor de 6.6 y

evaluaron la viscosidad cinemática del mucílago, al cual resultó ser de 1091.5 cSt. Este análisis permitió concluir que el mucílago presenta un comportamiento de fluido no newtoniano, es decir, su viscosidad varía en función de la tasa de deformación aplicada. Este comportamiento reológico es particularmente importante para su potencial aplicación como modificador de propiedades en mezclas de concreto, ya que podría influir positivamente en aspectos como la trabajabilidad, la retención de agua y la durabilidad de las estructuras.

Por otro lado, Campos-Silva et al., llevaron a cabo un detallado estudio sobre el comportamiento del avance del perfil de carbonatación en el concreto reforzado, evaluando este fenómeno tanto en ambientes naturales como en ambientes acelerados. Para ello, realizaron una serie de pruebas de carbonatación en especímenes de concreto expuestos a condiciones controladas y a condiciones ambientales reales, comparando los resultados obtenidos en ambos escenarios. Encontraron que, cuando se utilizan especímenes fabricados con un tipo y contenido similar de cemento, es posible establecer relaciones cuantitativas aceptables entre el proceso de carbonatación natural y el proceso de carbonatación acelerado. Esta correlación resulta de gran utilidad para extrapolar resultado de laboratorio a condiciones reales de exposición, facilitando así la predicción del desempeño a largo plazo de las estructuras de concreto reforzado frente al fenómeno de carbonatación, que es uno de los principales mecanismos que inducen la corrosión del acero de refuerzo.

En el año 2017, Genescá et al., describieron de manera sistemática diversos procedimientos de protección para las varillas de refuerzo contra la corrosión en estructuras de concreto armado. Entre las estrategias evaluadas, destacaron el aislamiento eléctrico mediante el uso de pinturas epóxicas o resinas protectoras, que actúan como barreras físicas para impedir el contacto del acero con agentes agresivos. También se mencionó el uso de ánodos de sacrificio, técnica mediante la cual un material más fácilmente corroíble protege al acero principal. Otra estrategia propuesta fue la utilización de materiales de alta resistencia a la corrosión, tales como varillas de acero galvanizado o recubierto con materiales especiales. Finalmente, abordaron el método de protección catódica, que consiste en invertir el sentido de la corriente en la celda de corrosión, logrando así la preservación del acero embebido. Estas estrategias

son fundamentales en el diseño y mantenimiento de infraestructuras duraderas, especialmente en ambientes agresivo como zonas costeras o industriales.

Adicionalmente, en ese mismo año, Hernández et al., investigaron el efecto de la adición de mucílago de nopal y extracto de algas café sobre el grado de hidratación de las pastas de cemento. Para ello, elaboraron pastas de cemento con dos relaciones diferentes de agua-cemento: 0.3 y 0.6 con y sin la adición de los aditivos naturales mencionados. A partir de sus análisis, determinaron que las pastas con relación agua-cemento de 0.6 y que contenían los aditivos naturales presentaban un mayor grado de hidratación en comparación con las pastas de referencia. Este comportamiento fue atribuido a una mejor dispersión de las partículas de cemento promovida por la presencia de los aditivos, así como a la capacidad de esos compuestos naturales para retener agua, favoreciendo de esta manera un fenómeno de curado interno. Esta mejora en el grado de hidratación puede traducirse en un mejor desarrollo de las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, ofreciendo una alternativa sostenible y eficaz para mejorar su desempeño.

Por otro lado, Hazarika et al., llevaron a cabo una investigación enfocada en el uso de extractos de plantas para la modificación de las propiedades del concreto. En este estudio se prepararon aditivos naturales a partir de diversas plantas y se incorporaron a mezclas de concreto para evaluar los efectos resultantes. A través de un conjunto de ensayos, se encontró que la pectina presente en los extractos vegetales interactuaba con los cationes del cemento durante el proceso de hidratación provocando modificaciones significativas en el material. Entre los resultados más destacados se observaron una disminución en el tiempo de fraguado, una mejora en la resistencia a la compresión, así como una reducción de la porosidad y de la absorción de agua en las mezclas modificadas.

En el año 2019, Royani et al., realizaron un estudio sobre el comportamiento de corrosión del acero al carbón expuesto a las condiciones del río en la región de Sujabumi. Para ello, evaluaron las tasas de corrosión del acero después de diferentes períodos de exposición a profundidades de 0 metros (zona de contacto aire-agua) y 1 metro (inmersión total). Posterior a los períodos de exposición, observaron que toda la superficie del acero expuesta al agua estaba cubierta por productos de corrosión, indicando una agresiva interacción con el

ambiente acuoso. Se midieron tasas de corrosión de 0.5 mm/año en la superficie expuesta a 0 m de profundidad y de 0.17 mm/año a 1 m de profundidad. Estos resultados permitieron concluir que la zona de mojado-secado presenta una tasa de corrosión considerablemente mayor que la zona de inmersión total, debido al incremento en el suministro de oxígeno en la interfaz aire-agua, factor que acelera los procesos de corrosión electroquímica. Dichos hallazgos son fundamentales para la correcta evaluación de la durabilidad de infraestructuras hidráulicas y marinas, donde el acero al carbón sigue siendo uno de los materiales más utilizados.

En el estudio realizado por Suárez-Domínguez et al., en el año 2020, se evaluaron tres tipos de medios gelatinosos formulados a partir de mucílago de tuna, agar-agar y gelatina, los cuales fueron dosificados junto con mezclas de agua y cemento para analizar su influencia en las propiedades del concreto. Los resultados experimentales indicaron que las superficies de las combinaciones que contenían medios gelatinosos presentaban una notable disminución en la porosidad superficial en comparación con las mezclas de control. Asimismo, se observó que la resistencia a la compresión de las mezclas mejoraba de manera significativa, superando incluso la resistencia originalmente diseñada para las mismas. Este comportamiento sugiere que la incorporación de medio gelatinosos, independientemente de su naturaleza química específica, induce modificaciones importantes en el proceso de cristalización del cemento, promoviendo un ambiente más controlado para el fraguado. Dichos medios actúan modificando las condiciones físicas del sistema, favoreciendo una formación de estructura más densa y homogénea, lo cual se traduce en un hormigón más resistente y duradero.

Adicionalmente, en el mismo año 2020, Je-Kyoung et al., llevaron a cabo un estudio sobre el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en concreto, sometido a ciclos alternados de humedad y secado, consistentes en 8 horas de humidificación seguidas de 16 horas de secado. El ambiente experimental fue un entorno marino simulado, utilizando una solución con una alta concentración de cloruros del 3 % en peso de NaCl. Durante los ensayos, se observó un notable incremento en la tasa de corrosión del acero de refuerzo durante las fases de secado. A partir del análisis electroquímico, determinaron que la

concentración de oxígeno disuelto en la interfase concreto-acero aumentaba significativamente durante el secado, favoreciendo las reacciones catódicas y, en consecuencia, incrementando la velocidad de corrosión. Estos resultados subrayan la importancia de controlar las condiciones de humedad en ambientes marinos para prolongar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado.

De manera complementaria, Gallegos-Villela et al., en su estudio realizado en 2021, analizaron el efecto del mucílago de nopal combinado con la fibra de ixtle como aditivos para mejorar las propiedades mecánicas de ambos materiales naturales y llevaron a cabo ensayos de resistencia, durabilidad y transferencia de calor. Concluyeron que la incorporación de la fibra de ixtle potencia el efecto positivo del mucílago de nopal, otorgando a las mezclas una notable capacidad de retrasar la transferencia de calor, lo cual podría ser muy beneficioso en aplicaciones donde se requiera un aislamiento térmico adicional. Además, destacaron que la inclusión de estos aditivos no compromete las propiedades mecánicas del concreto, manteniendo niveles adecuados de resistencia a compresión y a flexión, por lo que su uso representa una alternativa ecológica viable para mejorar el desempeño de materiales de construcción.

En el año 2022, Bachtiar et al., realizaron una investigación orientada a evaluar el efecto del uso de agua de mar frente a agua dulce en la preparación de mezclas de concreto de alto rendimiento. Para este propósito, se elaboraron mezclas cementantes con base en concreto de alto desempeño, que posteriormente fueron sometidas a curado en tres diferentes medios: agua de mar, agua dulce y exposición al aire. El período de curado se extendió durante 90 días, permitiendo evaluar la evolución de las propiedades del concreto en el tiempo. A partir de sus análisis encontraron que la porosidad de las mezclas disminuyó significativamente cuando se utilizó agua de mar tanto para la mezcla como para el curado. Además, en los estudios de componentes de hidratación, mediciones de porosidad y análisis petrográfico, se observó que las mezclas preparadas y curadas en agua de mar mostraron el mejor desempeño general, evidenciando una estructura interna más densa y homogénea. Estos resultados sugieren que el uso de agua de mar en determinadas condiciones controladas podría no ser

tan perjudicial como tradicionalmente se ha considerado, especialmente en concretos de alta calidad.

En el año 2022, Yong et al., llevaron a cabo un estudio experimental sobre la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto, analizando su comportamiento bajo distintas condiciones de exposición al ambiente marino. Durante un período de tres meses, expusieron las muestras a cuatro entornos diferentes: atmósfera marina, zona de salpicadura, oleaje e inmersión total. Los resultados obtenidos mostraron que las muestras expuestas a ciclos de hidratación y secado, como ocurre en las zonas de salpicadura y oleaje presentaron una difusión de agentes corrosivos aproximadamente dos veces mayor que las muestras ubicadas en la atmósfera marina o sometidas a inmersión continua. Este incremento en la penetración de cloruros y otros agentes agresivos es atribuible al constante cambio entre condiciones húmedas y secas, que favorece el transporte de sales y la aceleración de los procesos de corrosión. Los hallazgos destacan la importancia de considerar la severidad de las condiciones de exposición en el diseño de estructuras de concreto reforzado ubicadas en entornos marinos.

Por otra parte, en el año 2023, Lorika et al., llevaron a cabo un estudio sobre la interacción del concreto con el mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) cuando este se añade a la mezcla de concreto como sustituto parcial del agua de mezclado. Este tipo de investigación se centró en explorar cómo el mucílago de nopal, un biopolímero natural, afecta las propiedades del concreto en términos de resistencia y durabilidad. Los resultados obtenidos indicaron que el uso de mucílago en la mezcla de concreto produce un notable aumento en la resistencia a la compresión, lo que sugiere una mejora en la formación y estructura interna del concreto. Además, se observó una reducción significativa en la absorción de agua, con valores entre un 14 % y un 39 % en comparación con el concreto de control, lo que implica que el mucílago contribuye a una menor permeabilidad y, por ende, mayor durabilidad del material. En cuanto a los impactos ambientales, las adiciones de mucílago en proporciones de 15 % demostraron una reducción de aproximadamente 9.6 % en la producción de gases de efecto invernadero, lo cual resalta el potencial ecológico de esta práctica. Por último, se observó una mejora en la resistencia del concreto a los ciclos de congelación y descongelación, donde

las muestras con mucílago mantuvieron un 83 % del módulo de elasticidad dinámica, lo que sugiere que este aditivo no solo mejora las propiedades mecánicas, sino que también contribuye a la longevidad del concreto en condiciones climáticas extremas.

Por su parte, en el mismo año 2023, Pattusamy et al., realizaron un estudio en el cual investigaron el desempeño del concreto adicionado con extracto de cactus (*Euphorbia tortilis*) en diferentes proporciones de 1 %, 3 %, 5 %, 7 % y 9 % como sustituto parcial del agua de mezclado. Los investigadores llevaron a cabo una serie de pruebas de resistencia mecánica y electroquímica para evaluar cómo el extracto de cactus afectaba el comportamiento del concreto. Los resultados obtenidos revelaron una mejora significativa del 29 % en las pruebas mecánicas de resistencia, atribuida principalmente a los polisacáridos presentes en el mucílago del cactus, que contribuyen a una mayor cohesión en la mezcla. Sin embargo, la mejora en la durabilidad se alcanzó cuando los vacíos del concreto fueron completamente llenados con mucílago en una proporción del 9 %, lo que permitió una reducción notable en la permeabilidad y una mayor protección del acero de refuerzo. Este hallazgo demuestra que el extracto de cactus, cuando se emplea en proporciones adecuadas, puede jugar un papel crucial en la mejora de las propiedades mecánicas y la longevidad del concreto armado.

Adicionalmente, en el año 2024, Valenzuela-Zapata et al., estudiaron las propiedades antioxidantes de cuatro variedades diferentes de *Opuntia ficus-indica*, con el objetivo de evaluar su potencial aplicación en el tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas. En su investigación, los autores encontraron que todas las variedades de *Opuntia ficus-indica* estudiadas exhibieron capacidades antioxidantes, con la variedad Jalapa destacándose como la más eficaz, mostrando un valor de $5.18 \pm 0.616 \mu\text{mol ET/g}$ en peso seco. Este resultado es particularmente relevante para la investigación de aplicaciones en la protección contra la corrosión, ya que el mucílago de nopal podría ser utilizado como un potente antioxidante natural, capaz de atrapar los radicales libres que favorecen la corrosión en el acero de refuerzo dentro del concreto armado. Esto abre la posibilidad que el mucílago puede contribuir a mitigar los efectos del deterioro del acero en estructuras expuestas a ambientes agresivos.

En el mismo año, Zhang et al., realizaron un estudio detallado sobre la corrosión del acero utilizando técnicas avanzadas de microscopía. En su investigación, emplearon la microscopía electrónica de barrido (SEM) para caracterizar la morfología superficial y la composición elemental de los especímenes de acero sometidos a corrosión. Los resultados obtenidos durante la etapa inicial de corrosión indicaron que la tensión generada entre los productos de corrosión y el sustrato metálico da lugar a la formación de grietas en la superficie del acero. Este fenómeno aumenta el área de contacto entre el metal y el electrolito, acelerando de manera significativa el proceso de corrosión. En etapas posteriores de la corrosión, la formación continua de productos de corrosión en la superficie del acero genera una especie de barrera pasiva que reduce la velocidad de corrosión. Estos hallazgos ofrecen una mejor comprensión del proceso de corrosión en el acero de refuerzo, lo cual es crucial para el desarrollo de métodos más efectivos de protección y tratamiento del concreto armado.

Existen diversas alternativas para prevenir la degradación del concreto armado, y la elección de la mejor estrategia depende de factores como la sostenibilidad, el costo y la accesibilidad de los materiales en la zona de construcción. Sin embargo, la opción más adecuada siempre será aquella que sea respetuosa con el medio ambiente, que no requiera de mano de obra altamente especializada, que sea de bajo costo y que esté disponible localmente. En este sentido, el uso de aditivos naturales como el mucílago de nopal y extractos de cactus presenta una alternativa prometedora para mejorar la durabilidad del concreto, al tiempo que contribuye a la reducción del impacto ambiental de la construcción. Estas alternativas no solo ofrecen beneficios mecánicos, sino también ecológicos, lo que las convierte en opciones viables para la industria de la construcción sostenible.

4. Metodología experimental.

La metodología empleada para el desarrollo de este proyecto se presenta de manera detallada en la Figura 4.1, que abarca todos los pasos del proceso experimental, desde la selección de los cladodios hasta la realización de las pruebas electroquímicas que marcan el cierre de la experimentación. En cada etapa, se procura obtener resultados precisos que permitan evaluar el comportamiento del mucílago de nopal en la mejora de las propiedades del concreto y su resistencia a la corrosión. A continuación, se detallan las fases más importantes de la metodología.

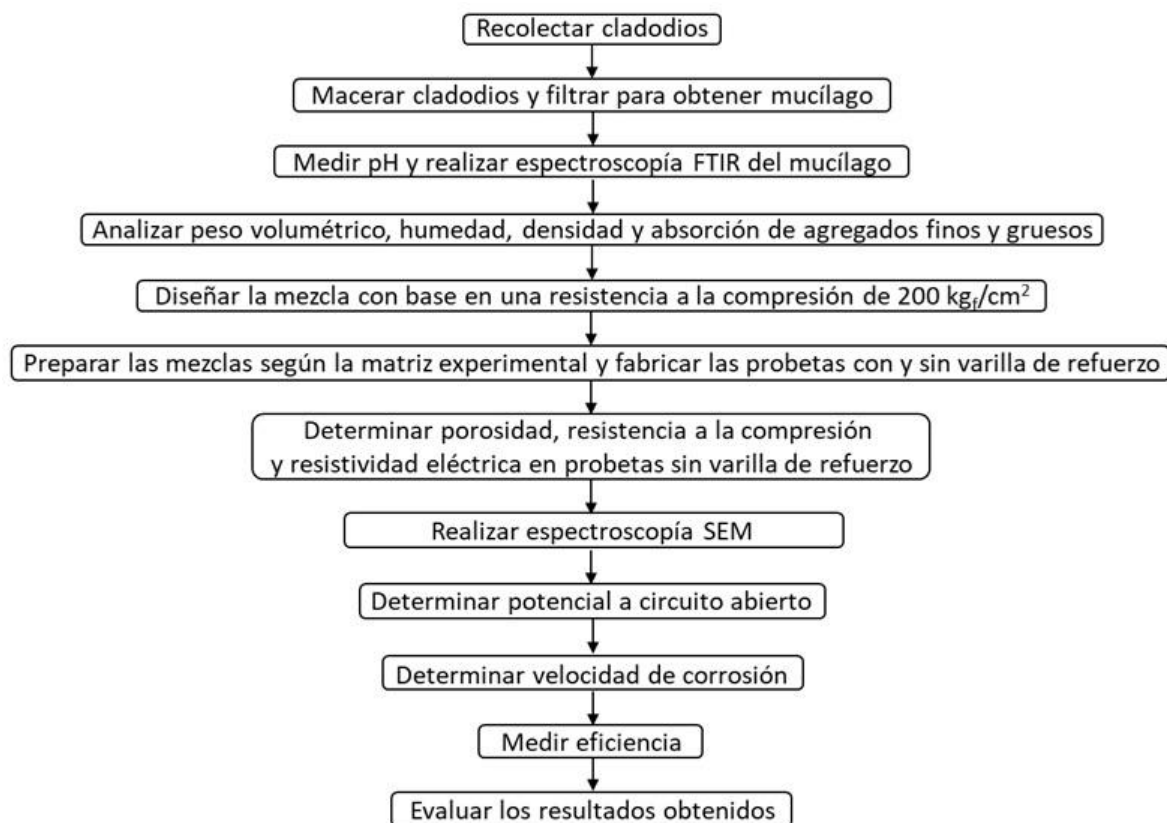


Figura 4.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental.

4.1. Nopales.

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron cladodios de nopal provenientes de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, campus Tampico. Los cladodios seleccionados fueron recolectados en su estado fresco, asegurándose de que estuvieran libres de daños visibles y fueran apropiados para el proceso de extracción del mucílago. Este nopal fue elegido debido a su amplia disponibilidad y a las propiedades biológicas que lo hacen adecuado para los estudios experimentales relacionados con la mejora de la durabilidad del concreto.

4.1.1. Mucílago.

Para la obtención del mucílago, se utilizó una variante del procedimiento propuesto por Vargas-Rodríguez et al., [39], adaptado para simplificar el proceso y evitar el uso de equipos y materiales especializados. En lugar del uso de alcohol como en el método tradicional, se optó por un enfoque más accesible que no requiere el empleo de sustancias químicas adicionales. El proceso comenzó con la recolección de los cladodios, los cuales fueron cuidadosamente cortados en cuadros de aproximadamente 2 cm, hasta obtener un total de 1 kg de material. Los cladodios fueron luego sometidos a un proceso de maceración en agua potable, con una proporción de 1:9 durante un período de 24 horas a temperatura ambiente. Este proceso permite la extracción eficiente del mucílago sin alterar sus propiedades estructurales. Una vez completada la maceración, la mezcla fue licuada para obtener una solución homogénea, la cual se dejó reposar durante otras 24 horas para permitir que las partículas más grandes se sedimentaran. Finalmente, se filtró la mezcla utilizando un tamiz doméstico para obtener el mucílago de nopal de forma pura y lista para su caracterización. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de pH y se realizó una espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier (FTIR) [94] para estudiar la estructura molecular del mucílago y verificar su composición química.

4.1.2. pH.

Para medir el pH del mucílago, se disolvieron 2 g de la sustancia en 20 mL de agua destilada, y la mezcla resultante fue filtrada cuidadosamente. El pH del líquido filtrado se midió utilizando un medidor de pH de alta precisión para asegurar la exactitud de los resultados.

Esta medición es esencial para entender cómo el mucílago interactúa con otros componentes del concreto, ya que el pH puede influir en la reactividad del cemento y en las propiedades del material final [39].

4.2. Concreto.

El diseño de las probetas de trabajo abarca varias etapas importantes, desde la caracterización de los agregados gruesos y finos hasta el diseño preciso de la geometría de las probetas de concreto. Cada uno de estos pasos es crucial para garantizar que las muestras de concreto obtenidas sean representativas de las condiciones reales de aplicación. En el siguiente apartado, se describen de manera detallada los procedimientos realizados en cada etapa de la caracterización de los materiales y el diseño de las mezclas de concreto.

4.2.1. Agregados finos y gruesos.

Para la caracterización de los agregados, se utilizó un cilindro de capacidad de 9.69 L para determinar los pesos volumétricos. El procedimiento consistió en llenar el cilindro sin compactar el material, rasar la superficie y pesar la muestra para obtener el valor exacto de su densidad aparente [96]. Para determinar la humedad de los agregados, se empleó el método gravimétrico, en el cual los agregados se sometieron a una temperatura constante de 110 °C durante 24 horas. Tras este período de secado, se permitió que los agregados llegaran a temperatura ambiente antes de realizar la medición final de su contenido de humedad [97]. Además, los agregados fueron pasados por un tren de tamices para clasificar el material según su tamaño. Los tamices utilizados fueron no. 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200 para el agregado fino, y ½", 3/8", no. 4, 8 y 16 para el agregado grueso. A partir de los porcentajes acumulados de los materiales retenidos entre los tamices no. 8 a 100, se calculó el módulo de finura para el agregado fino [98], lo que permite asegurar un concreto uniforme y de alta calidad.

Densidad y absorción del agregado fino. Para determinar la densidad y absorción del agregado fino, se tamizó 1 kg de arena utilizando el tamiz no. 4. Posteriormente, se permitió que la arena se saturara en agua durante un período de 24 horas. Tras este proceso, la muestra fue esparcida sobre una charola y secada con una pistola de aire caliente para asegurar su estado saturado superficialmente seco. Luego, se tomó una muestra de 500 g y se colocó en

una probeta de 1 L que contenía 500 mL de agua. El volumen desplazado por la muestra se midió con precisión. Después de homogenizar el contenido de la probeta, se dejó reposar durante 20 minutos para permitir la decantación del líquido sobrenadante. Posteriormente, se llevó a cabo el secado de la muestra a una temperatura de 110 °C durante 24 horas, lo que permitió obtener los valores necesarios para determinar la densidad y absorción del agregado [99].

Densidad y absorción del agregado grueso. De manera similar, se realizaron pruebas para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. Para ello, se tomó el material retenido en la malla $\frac{3}{4}$ " durante la prueba de granulometría. Este material fue sumergido en agua durante 20 minutos para eliminar cualquier traza de arcilla, y luego se dejó en saturación por 24 horas. Después de esta saturación, las piedras se retiraron y se secaron superficialmente con un trapo antes de ser pesadas. Luego, se colocaron en un picnómetro, donde se recogió el agua desplazada en una probeta. Finalmente, las piedras fueron secadas a 110 °C durante 24 horas, enfriadas y pesadas nuevamente para determinar su densidad y absorción con precisión [100].

4.2.2. Diseño de mezcla.

El diseño de la mezcla de concreto se llevó a cabo tomando en cuenta todos los datos obtenidos durante la caracterización de los agregados finos y gruesos, los cuales son fundamentales para asegurar la calidad y las propiedades del concreto producido.

Para determinar la cantidad exacta de cemento, agua, agregado grueso y fino, se siguió la metodología especificada en la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014, que es ampliamente utilizada en la industria de la construcción en México. De acuerdo con esta norma, el objetivo era obtener un concreto con una resistencia a la compresión de 200 kgf/cm² [95], lo cual es adecuado para las aplicaciones típicas de concreto en proyectos estructurales comunes. A través de este diseño, se buscó garantizar que la mezcla tuviera las características necesarias para desempeñarse bien bajo condiciones estándar de carga y desgaste.

Para la fabricación de las probetas de prueba, se realizó una cuidadosa dosificación de los materiales. Primero, se pesaron y mezclaron los materiales en el siguiente orden: arena,

cemento, agua y grava. Esta secuencia es importante para asegurar que los componentes se mezclen de manera uniforme, lo que facilita la homogenización de la mezcla. Durante el proceso de mezcla, se tomaron todas las precauciones necesarias para que los ingredientes se distribuyeran correctamente. Para comprobar que la mezcla alcanzaba el estado adecuado de trabajabilidad, se llevó a cabo la prueba de revenimiento, que es esencial para garantizar que el concreto pueda ser vertido y moldeado adecuadamente sin problemas de fluidez [10].

Los moldes metálicos de acero fueron armados con dimensiones precisas de 15 cm de diámetro en la base y una altura de 30 cm. Estos moldes fueron cuidadosamente aceitados en su parte interna para facilitar el proceso de desmoldeo, asegurando que las probetas no se rompieran o deformaran al ser retiradas de los moldes. Después de llenar los moldes con la mezcla de concreto, se nivelaron y rasaron para asegurar que la superficie quedara uniforme. Para evitar la pérdida de agua durante el proceso de fragua, los moldes fueron cubiertos con una película plástica que retuvo la humedad necesaria. Se permitió que el concreto fragüe durante 24 horas en un ambiente controlado [95]. Tras este período inicial de fraguado, las probetas fueron desmoldadas con cuidado y luego sumergidas completamente en agua para su curado. Este proceso de curado es fundamental para el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto.

Las probetas fueron retiradas del agua en diferentes intervalos de tiempo para evaluar su evolución en cuanto a resistencia. Los tiempos de curado seleccionados fueron de 7, 14 y 28 días, los cuales son comúnmente utilizados en estudio de resistencia a la compresión [102]. Posteriormente, las probetas fueron cabeceadas con azufre para obtener una superficie de apoyo lisa y plana, lo cual es necesario para garantizar que las pruebas de resistencia se realicen de manera uniforme y precisa [103]. Una vez alcanzada la resistencia de 200 kgf/cm^2 , este diseño de mezcla se utilizó para fabricar todas las probetas que se emplearon en las pruebas experimentales posteriores.

4.2.3. Matriz experimental.

A continuación, se preparó una mezcla estándar de cemento, agua, arena y grava, siguiendo la relación proporcionada por el diseño de mezcla previamente descrito. A esta mezcla básica

se le agregó mucílago en diferentes proporciones, de acuerdo con los valores establecidos en la Tabla 4.1. Estos porcentajes de mucílago fueron seleccionados con el objetivo de observar el impacto que este material natural tiene sobre las propiedades del concreto. Las probetas fabricadas con estas mezclas fueron sometidas a diversas pruebas experimentales para evaluar su rendimiento bajo condiciones de exposición específicas.

Tabla 4.1. Matriz experimental.

Cemento	Mezcla	Ambiente	Geometría	Identificación
C	0	A	C	0AC
			L	0AL
		B	C	0BC
			L	0BL
		C	C	0CC
			L	0CL
	1	A	C	1AC
			L	1AL
		B	C	1BC
			L	1BL
		C	C	1CC
			L	1CL
	2	A	C	2AC
			L	2AL
		B	C	2BC
			L	2BL
		C	C	2CC
			L	2CL
	3	A	C	3AC
			L	3AL
		B	C	3BC
			L	3BL
		C	C	3CC
			L	3CL

La columna Mezcla de la tabla muestra los porcentajes de mucílago en el agua de mezclado: 0 %, 5 %, 10 % y 15 %, que corresponden a las diferentes concentraciones que se probaron en los ensayos. La siguiente columna indica los diversos ambientes a los que se sometieron las probetas: A para condiciones a la intemperie, B para condiciones de alta humedad salina, y C para condiciones de alta humedad. Estos ambientes fueron seleccionados para evaluar cómo el concreto responde en situaciones extremas de exposición ambiental. En cuanto a la Geometría, la columna hace referencia al arreglo de las varillas de refuerzo en las probetas,

con C para un arreglo cuadrado y L para un arreglo lineal. Esta variabilidad en el refuerzo tiene como objetivo analizar cómo el patrón de distribución de las varillas afecta las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. Finalmente, la última columna de la tabla asigna una nomenclatura específica a cada probeta para su identificación durante las pruebas experimentales, lo que facilita el seguimiento de los diferentes grupos de mezcla y su desempeño en los ensayos.

4.2.4. Diseño de probetas.

Las probetas para las pruebas de resistencia a la compresión fueron fabricadas en forma cilíndrica, con un diámetro de 15 cm en la base y una altura de 30 cm, siguiendo las dimensiones estándar utilizadas para este tipo de pruebas. Además de estas probetas, se fabricaron otras con dimensiones de 7 cm de diámetro en la base y 10 cm de altura para medir la porosidad de las mezclas. La porosidad es un factor importante en la evaluación de la calidad del concreto, ya que puede influir directamente en su durabilidad y resistencia.

También se prepararon probetas de forma cúbica con una arista de 5 cm, específicamente diseñadas para realizar las pruebas de resistividad eléctrica, que son necesarias para evaluar la capacidad del concreto para resistir la penetración de agentes corrosivos, como los iones de cloro. Para las pruebas electroquímicas más complejas, como las de potencial a circuito abierto, resistencia a la polarización lineal, velocidad de corrosión y corrosión acelerada, se fabricaron probetas prismáticas con dimensiones de 9 x 12 cm de base y 12 cm de altura. Estas probetas contenían electrodos embebidos de acero inoxidable y acero al carbón, dispuestos en dos distribuciones diferentes, según las necesidades de cada tipo de prueba. En la Figura 4.2 se muestran los dos arreglos de electrodos empleados para realizar las pruebas electroquímicas, los cuales están claramente identificados con sus respectivas medidas en centímetros. Este diseño experimental permitió obtener datos detallados sobre la durabilidad del concreto y su resistencia a la corrosión bajo diversas condiciones ambientales.

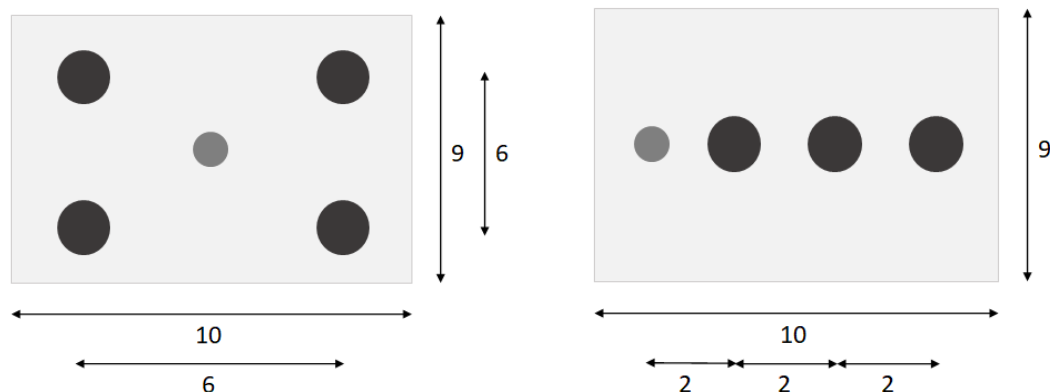


Figura 4.2. Arreglos cuadrado y lineal de los electrodos.

4.3. Pruebas de laboratorio.

En este apartado se describen detalladamente las diversas pruebas y técnicas de laboratorio que se realizaron sobre las probetas de concreto a fin de evaluar sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y microestructurales. Cada prueba fue cuidadosamente seleccionada y ejecutada conforme a estándares establecidos para garantizar la validez de los resultados obtenidos.

4.3.1. FTIR.

Para la determinación de los grupos funcionales presentes en el mucílago utilizado como aditivo en el concreto, se empleó un espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). Este análisis permite identificar las características químicas del mucílago mediante la detección de enlaces y estructuras moleculares específicas. El espectro se obtuvo analizando el intervalo de número de onda comprendido entre $4,000$ y 450 cm^{-1} , región donde aparecen las principales bandas de absorción correspondientes a vibraciones moleculares de interés. Durante la prueba se registraron los valores de transmitancia a lo largo del intervalo de medición, permitiendo así interpretar el espectro obtenido en términos de los grupos funcionales presentes en el material [104].

4.3.2. Porosidad.

La medición de la porosidad de las probetas de concreto es esencial para evaluar su durabilidad y resistencia frente a agentes externos como el agua o los iones agresivos. Para

realizar esta prueba, las probetas se sometieron inicialmente a un proceso de secado en un horno a 110 °C durante un período de 24 horas, asegurando la completa eliminación de humedad interna y obteniendo el peso seco de la muestra. Posteriormente las probetas secas fueron completamente sumergidas en agua durante otras 24 horas para permitir la saturación total de los poros presentes en el material. Una vez transcurrido este tiempo, se retiraron las probetas del agua, se secaron superficialmente con un paño para eliminar el exceso de agua externa y se pesaron nuevamente para obtener el peso húmedo. Con base en los pesos secos y húmedos se calculó el porcentaje de agua absorbida por el material. Asimismo, se determinaron los volúmenes de la probeta en estado seco y el volumen de agua absorbida, y con estos datos se calculó el porcentaje de porosidad utilizando la siguiente ecuación [52]. Este análisis proporciona información crítica sobre la conectividad de los poros y su impacto en las propiedades de la durabilidad del concreto:

$$\% \text{ porosidad} = \frac{V_{\text{probeta}}}{V_{\text{agua absorbida}}} * 100 \quad (4.1)$$

4.3.3. Micrografía.

Para examinar las características topográficas superficiales de las probetas de concreto se utilizó un microscopio óptico digital de la marca GMLQ, modelo HTS-5-1144. Esta herramienta permite la observación a distintos niveles de aumento, revelando detalles como la distribución de poros, microgrietas y la textura de la superficie de la matriz cementante. Las micrografías obtenidas fueron utilizadas para complementar los resultados de las pruebas de porosidad y resistencia, ya que una mayor rugosidad superficial y la presencia de defectos visibles pueden ser indicativos de una menor durabilidad o calidad del concreto [54]. Las imágenes fueron capturadas bajo condiciones controladas de iluminación y enfoque, asegurando su nitidez y fiabilidad para su posterior análisis cualitativo y comparativo entre las distintas mezclas.

4.3.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Par aun análisis más detallado de la microestructura de las probetas, se realizó un estudio mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), por sus siglas en inglés). En esta técnica,

la muestra fue expuesta a un haz de electrones enfocados, permitiendo obtener imágenes de alta resolución de la superficie del concreto. Para evitar interferencias causadas por las moléculas de aire, las muestras se colocaron dentro de la cámara del microscopio en condiciones de vacío. Esto asegura que el haz de electrones no sea desviado ni atenuado, garantizando una mayor precisión en las imágenes obtenidas [54]. El análisis SEM proporciona información relevante acerca de la morfología de la pasta cementante, la distribución de los poros, la calidad de la interfaz pasta-agregado y la presencia de productos de reacción como los geles de sílice o hidróxidos. Estos datos son esenciales para interpretar los efectos del mucílago en la estructura interna del concreto y su influencia en la resistencia a la compresión, la permeabilidad y la durabilidad frente a la corrosión.

4.3.5. Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión de las probetas de concreto se determinó utilizando un equipo de prueba Controls Automax, especializado para ensayos de materiales de construcción. Este equipo aplica una carga creciente sobre la probeta hasta el momento de su falla, registrando la carga máxima soportada. A partir de este valor, se calculó la resistencia a la compresión mediante la siguiente ecuación estándar [103]:

$$R = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

Donde R es la resistencia a la compresión, P es la carga máxima soportada por la probeta y A el área de la sección transversal de la probeta.

Cada muestra fue evaluada a diferentes edades de curado (7, 14 y 28 días) para observar el desarrollo de la resistencia mecánica en el tiempo. Los resultados fueron comparados con el concreto de referencia sin adición de mucílago para evaluar el impacto del aditivo en el desempeño mecánico del material.

4.3.6. Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica del concreto es un parámetro crítico para evaluar su capacidad para resistir la penetración de agentes agresivos que provocan corrosión en el refuerzo. Para llevar a cabo esta prueba, las probetas se mantuvieron en un ambiente de alta humedad controlada,

a fin de minimizar las fluctuaciones en la medición causadas por variaciones de humedad ambiental. Se colocaron esponjas húmedas y dos placas de acero inoxidable en los extremos de cada probeta para asegurar un buen contacto eléctrico.

Posteriormente, se utilizó un medidor de resistividad eléctrica de la marca Yoyogawa para realizar las mediciones. Durante el procedimiento se imprimió una corriente eléctrica conocida (I) a través de la probeta, mientras que el equipo midió el voltaje resultante (E). La resistencia eléctrica de la muestra se obtuvo mediante el cociente E/I, y posteriormente, se calculó la resistividad eléctrica considerando la geometría de la probeta utilizando la siguiente ecuación [61]:

$$\rho = Re \frac{A}{L} \quad (4.3)$$

Donde ρ es la resistividad, Re la resistencia medida, A el área de la sección transversal de la probeta y L su longitud.

Este análisis permitió evaluar la influencia del mucílago en la densificación de la microestructura del concreto.

4.3.7. Potencial a circuito abierto.

Para medir el potencial de corrosión de las varillas de acero embebidas en el concreto, se utilizó un potencióstato/galvanostato marca AUTOLAB PGSTAT 302N, el cual cuenta con métodos precargados específicos para este tipo de ensayos. El procedimiento consistió en conectar la probeta, utilizando como electrodo de trabajo la varilla de acero al carbón embebida en la mezcla, mientras que el contraelectrodo correspondió a la varilla de acero inoxidable también embebida. Se cargó en el equipo el método OCP (Open Circuit Potential), mediante el cual el equipo midió de forma automática el valor de potencial a circuito abierto de la celda [64]. Esta medición permite determinar la tendencia de corrosión activa. Se realizaron varias mediciones para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

4.3.8. Velocidad de corrosión.

La velocidad de corrosión del acero de refuerzo fue determinada mediante la técnica de polarización lineal, conectando nuevamente la celda de trabajo al potencióstato/galvanostato

AUTOLAB PGSTAT 302N. En esta configuración, el electrodo de trabajo fue la varilla de acero al carbón, el contraelectrodo fue la varilla de acero inoxidable y el electrodo de referencia empleado fue de Ag/AgCl, asegurando un sistema de medición estable y reproducible. Para realizar el ensayo, se aplicó un barrido de potencial de ± 20 mV respecto al potencial de circuito abierto, en sentido catódico, utilizando una velocidad de escaneo baja de 0.05 mV/min, para garantizar un régimen de polarización lineal. El equipo calculó automáticamente el valor de la velocidad de corrosión expresado en unidades $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, utilizando la pendiente de la curva de polarización obtenida [65]. Este valor es fundamental para estimar la vida útil del concreto armado expuesto a ambientes agresivos.

4.3.9. Eficiencia.

Para evaluar la eficiencia del mucílago como aditivo inhibidor de la corrosión en concreto armado, se utilizó una ecuación específica basada en la comparación de la velocidad de corrosión de las probetas con y sin aditivo. La eficiencia (η) se calculó mediante la siguiente ecuación [69]:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{(I_{\text{corr}} - I'_{\text{corr}})}{I_{\text{corr}}} * 100 \quad (4.4)$$

Donde I_{corr} es la densidad de corriente de corrosión sin inhibidor, I'_{corr} es la densidad de corriente de corrosión con inhibidor.

Un mayor porcentaje de eficiencia indica un mejor desempeño del aditivo en la inhibición de la corrosión, validando su uso como una alternativa sostenible y efectiva en aplicaciones de concreto armado expuesto a ambientes agresivos.

5. Resultados y discusiones.

En este capítulo se presentan y analizan detalladamente los resultados obtenidos en el estudio experimental acerca del efecto del mucílago de nopal sobre la cinética de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto. Se abordan diferentes etapas del estudio, comenzando con la obtención y caracterización del mucílago, el diseño y fabricación de las mezclas de concreto, así como la interpretación de los datos obtenidos a través de diversos ensayos en laboratorio.

5.1. Mucílago.

Siguiendo con la metodología previamente descrita para su extracción, se obtuvieron 8.5 litros de mucílago disuelto en solución acuosa a partir de cladodios de nopal. Este volumen fue suficiente para preparar todas las mezclas de prueba requeridas.

El análisis inicial de esta solución reveló un pH de 6, lo cual indica una ligera acidez. Este valor depende de múltiples factores intrínsecos y ambientales como el tipo de suelo donde se cultivó el nopal, las condiciones climáticas del entorno, la edad fisiológica de los cladodios en el momento de la cosecha, la especie específica utilizada (*Opuntia ficus-indica*) e incluso la hora del día en que fueron recolectados. Todos estos elementos influyen significativamente en la composición química final del mucílago, afectando tanto su reactividad como su interacción con los componentes del concreto [12][52].

5.2. Concreto.

Los resultados de la caracterización granulométrica, física y química de los agregados empleados se presentan en la Tabla 5.1. Con base en estos datos, y siguiendo la normativa NMX-C-155-ONNCCE-2015 [43], se llevó a cabo el diseño de una mezcla de concreto adecuada para su aplicación estructural, con una resistencia especificada a compresión de

200 kg/cm². La Tabla 5.2 muestra las cantidades de cemento, agua, arena y grava requeridas para preparar un metro cúbico de concreto. Esta mezcla sirvió como base para las formulaciones modificadas con diferentes porcentajes de mucílago de nopal.

Tabla 5.1. Caracterización de los agregados.

Parámetro	Agregado fino	Agregado grueso
Peso volumétrico [kg/L]	1.38	1.64
Humedad [%]	5.80	0.10
Densidad [g/mL]	1.58	2.76
Absorción [%]	58.23	3.82

Tabla 5.2. Diseño de la mezcla de concreto.

Componente	Cantidad [kg]
Cemento	248
Grava	526
Arena	278
Agua	134

5.3. Pruebas de laboratorio.

En esta sección se detallan los resultados de las primeras pruebas de laboratorio efectuadas a las mezclas de concreto, con y sin adición de mucílago. Se examinan parámetros fundamentales como la presencia de grupos funcionales mediante espectroscopía, así como características estructurales como la porosidad, las cuales impactan directamente en la durabilidad del concreto.

5.3.1. Espectroscopía por transformadas de Fourier (FTIR).

El análisis por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) permitió identificar los principales grupos funcionales presentes en el mucílago. En la Figura 5.1 se observa una banda ancha centrada en 3,362 cm⁻¹, correspondiente a las vibraciones de estiramiento de los enlaces O-H, lo que confirma la abundante presencia de grupos hidroxilos asociados al agua. Esta observación se complementa con otra banda en 1,649 cm⁻¹, también atribuible a la presencia de agua. Además, la banda en 2,972 cm⁻¹ indica la existencia de enlaces C-H, típico de grupos alquilo, reforzada por la banda secundaria en 1,392 cm⁻¹. También se detectan bandas en 1,640 y 654 cm⁻¹, atribuibles a enlaces C=C de alquenos. Por

otra parte, las bandas en 1,264 y 1,074 cm^{-1} corresponden a enlaces C-O y C-O-H, respectivamente, lo que indica la presencia de compuestos orgánicos como azúcares y pectinas. Estas observaciones se corroboran con las bandas ubicadas en 800 cm^{-1} y otras regiones que sugieren estructuras aromáticas, típicas de los polisacáridos del mucílago [105][106][107].

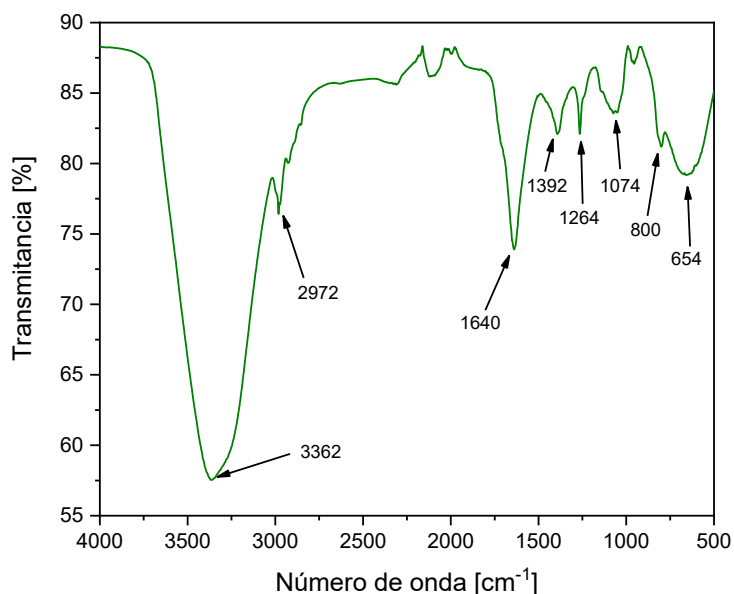


Figura 5.1. Espectro FTIR del mucílago de nopal.

5.3.2. Porosidad.

La Figura 5.2 presenta los resultados de la evaluación de porosidad en las diferentes mezclas. Se observó que la incorporación de mucílago de nopal afecta de manera significativa la porosidad del concreto. En coincidencia con lo reportado por Chinchillas et al. [67], se identificó que los huecos de gel formados por la adición del mucílago constituyen los principales responsables del incremento en la porosidad inicial. Estos huecos están constituidos por espacios que no fueron ocupados por partículas sólidas durante la hidratación del cemento.

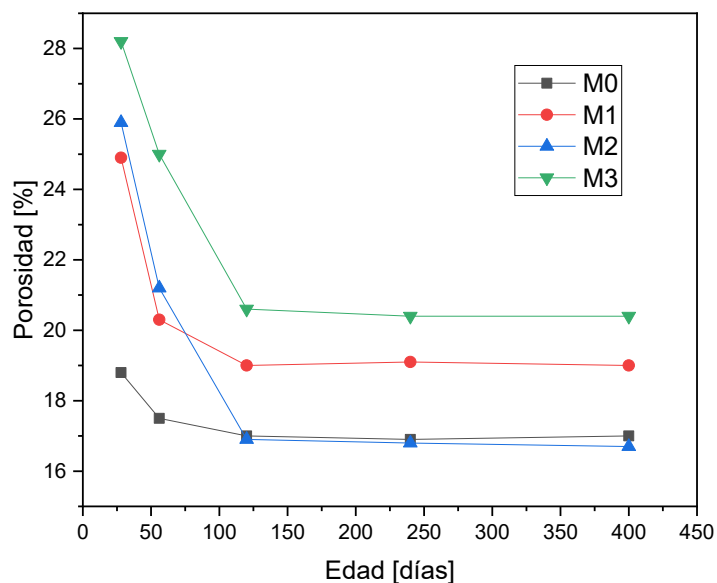


Figura 5.2. Porosidad de las mezclas a diferentes edades.

Se encontró que la porosidad disminuye con el incremento en la edad de curado, debido a una progresiva hidratación del cemento y al sellado parcial de micro vacíos. Particularmente, la mezcla M2 mostró un desempeño sobresaliente, con una reducción de porosidad del 34.7 % entre los días 28 y 120. Al finalizar este período, la mezcla M2 presentó un valor de porosidad de 16.9 %, valor similar al alcanzado por la mezcla control M0. En cambio, la mezcla M3, con una mayor proporción de mucílago, mantuvo un valor de 20.6 % evidenciando una mayor cantidad de vacíos persistentes.

La desviación estándar registrada para esta prueba osciló entre 9 % y 12 %, lo cual indica una variabilidad moderada aceptable en los resultados. Para la mezcla control M0, la disminución en porosidad fue de aproximadamente 9 %, mientras que, en las mezclas modificadas con mucílago, especialmente en la M2, se observó una reducción de 8.5 % respecto al volumen de la probeta. Esto sugiere que el mucílago tiene un efecto retardante en la formación de poros o bien, contribuye al cierre progresivo de los mismos con el tiempo.

En las mezclas sin mucílago, la porosidad está principalmente determinada por la relación agua-cemento y el grado de hidratación del cemento [15]. Sin embargo, en las formulaciones

que incorporan mucílago de nopal, la porosidad se ve influenciada por la formación de huecos de gel que no sólo afectan la estructura interna del concreto, sino también su comportamiento frente a agentes agresivos del medio ambiente. Estos huecos, si bien presentes en edades tempranas, tienen a cerrarse en etapas posteriores debido a reacciones secundarias de hidratación y a la reorganización progresiva de la matriz cementante [67].

5.3.3. Micrografía.

El análisis micrográfico realizado mediante microscopía óptica se presenta en la Figura 5.3, donde se evidencia la textura y características superficiales de las probetas de concreto fabricadas con y sin la adición de mucílago de nopal. En la imagen correspondiente a la mezcla de control (M0), se aprecian poros distribuidos de forma irregular, con bordes rugosos y de geometría no definida.

Esta irregularidad en los bordes facilita la interconexión entre poros vecinos, promoviendo la formación de una red capilar continua que pueda actuar como vía de transporte preferencial para agentes externos agresivos, tales como humedad, dióxido de carbono y cloruros. Esta conectividad entre poros representa un riesgo considerable para la durabilidad del concreto, ya que favorece la penetración de dichos elementos contaminantes, los cuales, al alcanzar la armadura metálica, pueden iniciar o acelerar procesos de corrosión en el acero de refuerzo.

En contraste, las mezclas que incorporan mucílago de nopal (M1, M2 y M3) presentan una morfología de poros diferente. Se observaron poros de mayor tamaño en comparación con la mezcla de control, sin embargo, estos poros muestran bordes más regulares y definidos, lo que sugiere que se originaron por la inclusión de gotas de mucílago en estado líquido dentro de la masa fresca de concreto. Estas gotas, atrapadas en la mezcla durante el proceso de fraguado y curado, generaron cavidades internas al evaporarse o transferir su contenido de agua hacia la matriz cementante.

A los 120 días de edad, los poros en las mezclas M1, M2 y M3 evidencian una reducción en su tamaño promedio, así como un cambio en la forma de sus bordes, los cuales pasan a ser más irregulares. Este cambio sugiere que, con el transcurso del tiempo, el agua contenida

originalmente en las gotas de mucílago fue liberada progresivamente, permitiendo que continuaran las reacciones de hidratación del cemento.

Como resultado, se produjo una transformación microestructural, que contribuyó a sellar parcialmente los poros, disminuyendo su conectividad y su tamaño efectivo. Esta evolución es particularmente notoria entre los días 28 y 120, pero a partir de este punto los cambios observados son mínimos, lo cual indica que la transferencia de agua y la reconfiguración de la microestructura inducida por el mucílago se estabilizan alrededor de los 120 días.

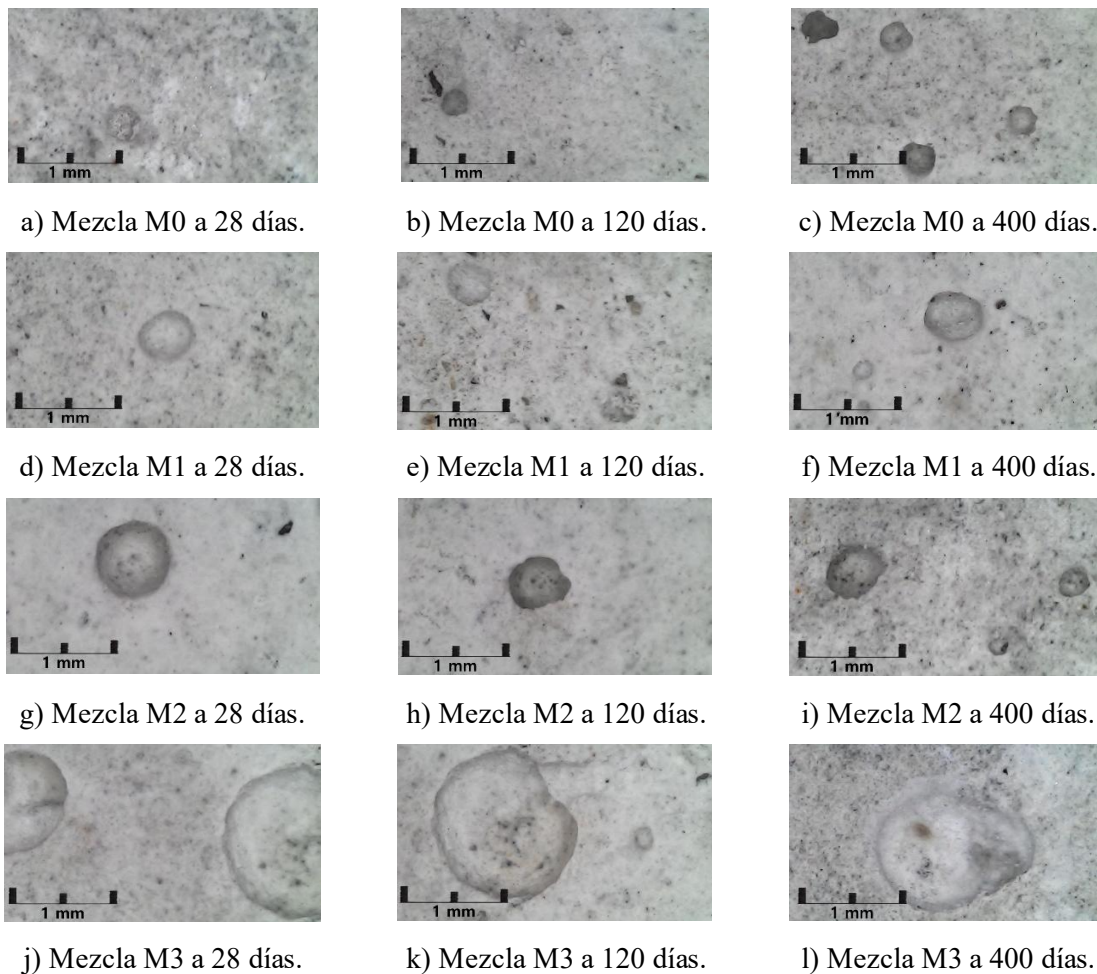


Figura 5.3. Micrografías de las probetas a diferentes edades.

Además, los poros originados por el mucílago parecen tener un efecto beneficioso adicional: actúan como zonas amortiguadoras frente a los cambios volumétricos que experimenta el

concreto debido a las fluctuaciones de temperatura ambiental. Esta capacidad de amortiguamiento térmico puede ayudar a reducir las microfisuras internas inducidas por la expansión o contracción del material, contribuyendo así a una mayor durabilidad a largo plazo.

5.3.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM).

El análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) realizado al finalizar el período de exposición proporciona información detallada sobre la morfología superficial del acero de refuerzo y la microestructura del concreto en las diferentes mezclas. En la Figura 5.4 se muestran las imágenes obtenidas del acero embebido en las mezclas M0 y M2 expuestas durante el mismo periodo a condiciones ambientales exteriores.

En la imagen correspondiente a la mezcla de control (M0), se observa una capa continua de productos de corrosión que cubre completamente la superficie del acero. Esta capa, de apariencia opaca y rugosa, tiene un grosor aproximado de 40 μm y evidencia un deterioro avanzado del acero debido a la penetración de agentes agresivos a través del concreto poroso.

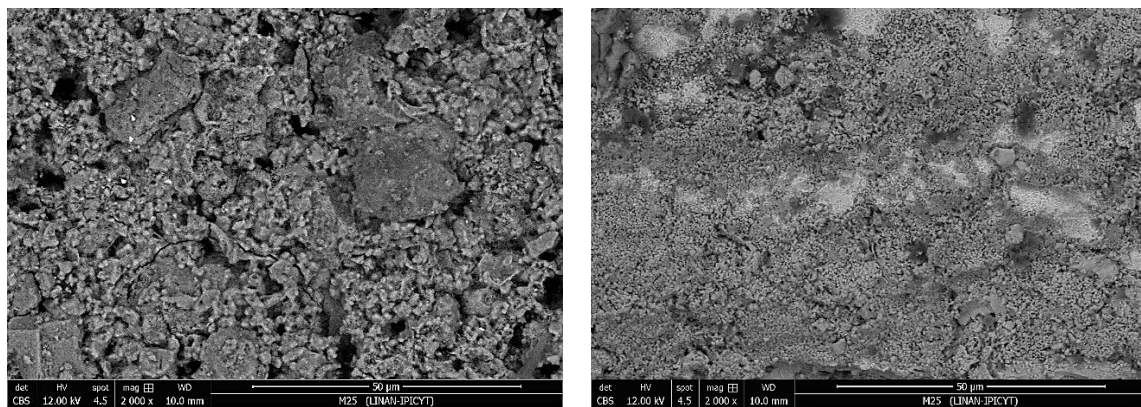


Figura 5.4. Imagen SEM del acero al carbón en especímenes expuestos a condiciones ambientales elaborados con: a) mezcla M0 y b) mezcla M2.

En contraste, la imagen correspondiente a la mezcla M2 muestra una superficie metálica con regiones brillantes y áreas parcialmente cubiertas por productos de corrosión, indicando una protección más efectiva. La película formada presenta un grosor promedio de aproximadamente 15 μm , lo cual representa una reducción significativa en comparación con la muestra M0. Esta diferencia sugiere que la mezcla modificada con mucílago ofrece una

mayor resistencia al ingreso de contaminantes y, por lo tanto, una menor velocidad de corrosión del acero embebido [108].

La Figura 5.5 presenta imágenes de la microestructura interna del concreto, específicamente en la zona donde se encuentra el acero de refuerzo, para las mezclas M0 y M2. En la muestra sin aditivos (M0), se observan poros grandes y distribuidos de manera aleatoria, lo cual es característico de una matriz cementante menos densa.

Por otro lado, la micrografía de la mezcla M2 revela una estructura más uniforme, con poros más pequeños y mejor distribuidos, evidencia de que el mucílago contribuye a una compactación más eficiente del concreto. También se observan diferencias en los tonos de gris: el gris claro corresponde a cristales de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), el gris oscuro a geles de silicato de calcio hidratado (S-C-H), y las regiones negras a vacíos o poros dentro del material [90].

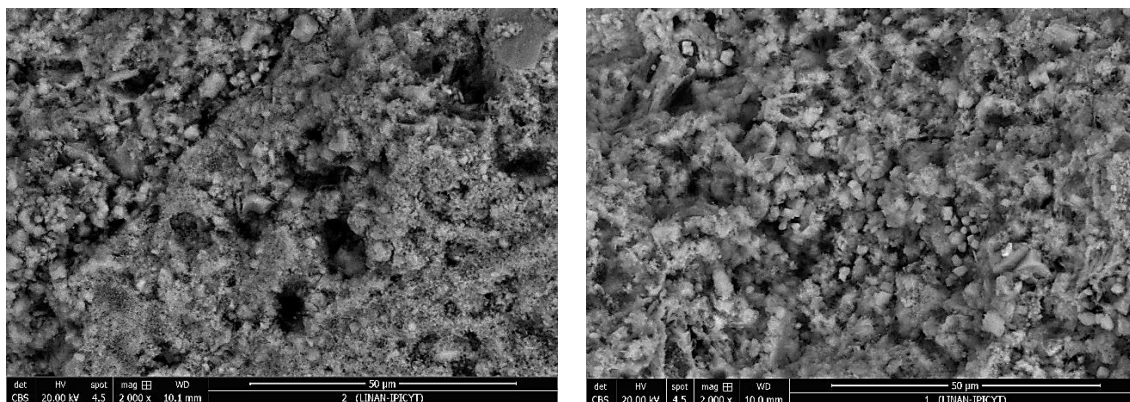


Figura 5.5. Imagen SEM del acero concreto en especímenes expuestos a condiciones ambientales elaborados con: a) mezcla M0 y b) mezcla M2.

En particular, la imagen correspondiente a la mezcla M2 muestra una disposición más densa de cristales entrelazados de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y C-S-H, lo cual indica un grado de hidratación más avanzado y una microestructura más consolidada. Asimismo, se observan vacíos de menor tamaño, lo cual está relacionado con una reducción en la permeabilidad del material [91].

El mucílago de nopal, actuando como un biopolímero natural, modifica sustancialmente la microestructura del concreto. Su presencia influye en la distribución de los poros, disminuyendo su tamaño promedio y promoviendo una matriz más densa y menos permeable.

Esta menor permeabilidad limita la migración de fluidos y gases a través del concreto, lo que dificulta la llegada de agentes agresivos como oxígeno, dióxido de carbono o iones cloruro al acero de refuerzo [109]. Como resultado, se retrasa la aparición del potencial de corrosión, y en caso de iniciarse el proceso corrosivo, se reduce su velocidad al limitarse la disponibilidad de reactivos esenciales. Este comportamiento convierte al mucílago en un aditivo prometedor para mejorar la durabilidad de estructuras de concreto expuesta a ambiente agresivos [91].

5.3.5. Resistencia a la compresión.

En la Figura 5.6 se presentan los resultados obtenidos del análisis de resistencia a la compresión realizado a las mezclas de concreto con y sin adición de mucílago de nopal, evaluadas a diferentes edades: 10, 14, 28, 56 y 120 días. Estos valores se compararon con el parámetro de referencia de 200 kgf/cm², correspondiente al valor teórico establecido en el diseño de mezcla según la normativa vigente [103]. La desviación estándar de los resultados fue del orden del 9 %, indicando un comportamiento relativamente homogéneo entre las probetas evaluadas en cada grupo.

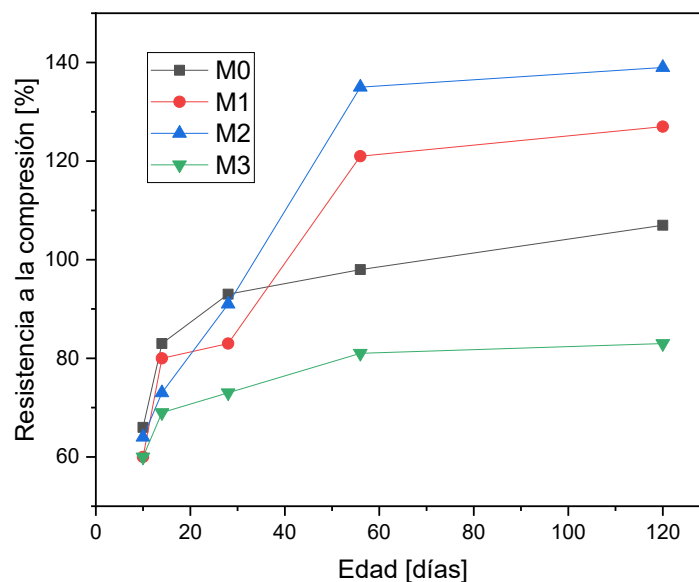


Figura 5.6. Resistencia a la compresión a diferentes edades de curado.

En cuanto al comportamiento a edades tempranas, específicamente a los 10 y 14 días, se observó que las mezclas modificadas con mucílago (M1, M2 y M3) presentaron resistencias a la compresión inferiores en comparación con la mezcla de control M0. Esta reducción puede explicarse por el hecho de que parte del agua contenida en el mucílago aún no había sido liberada en su totalidad hacia la matriz del concreto, limitando temporalmente la progresión de las reacciones de hidratación del cemento. Esta observación es consistente con lo reportado por diversos autores, quienes indican que los aditivos naturales pueden retardar levemente el desarrollo inicial de resistencia [13].

Sin embargo, a partir del día 28 en adelante, las mezclas con mucílago mostraron un comportamiento superior en cuanto al desarrollo de resistencia mecánica. Este incremento sugiere que, a medida que el agua contenida en las gotas de mucílago se transfiere gradualmente a la mezcla, se reactivan las reacciones de hidratación del cemento, promoviendo la formación de productos como el C-S-H (silicato de calcio hidratado), que es el principal responsable de la resistencia en el concreto. La mezcla M2 fue la que presentó el mejor desempeño general, alcanzando una resistencia equivalente al 139 % respecto al valor de diseño a los 120 días de edad. Este resultado concuerda con lo documentado por Torres-Acosta (2020), quien identificó un comportamiento similar en mezclas con mucílago cocido [14].

Cabe mencionar que los valores de resistencia superiores al 100 % respecto al diseño no representan un problema, sino que son un fenómeno común en mezclas de concreto bien diseñadas. El valor de 200 kgf/cm^2 corresponde a una resistencia mínima esperada según especificaciones teóricas, pero en condiciones prácticas, con un buen control de materiales y curado adecuado, es habitual obtener resistencias superiores [15]. La mejora en el desempeño de la mezcla M2 sugiere que existe una dosificación óptima del mucílago que contribuye favorablemente tanto al desarrollo mecánico como a la microestructura del material.

5.3.6. Resistividad eléctrica.

La Figura 5.7 presenta los resultados experimentales de resistividad eléctrica medidos en las cuatro mezclas a diferentes edades de curado. En términos generales, se observa que la

resistividad aumenta progresivamente con el tiempo en todas las mezclas, lo cual es esperable debido a la evolución de la hidratación del cemento y la reducción paulatina de la porosidad conectada. Este aumento es aún más notorio en las mezclas con adición de mucílago, las cuales muestran valores de resistividad ligeramente superiores a los de la mezcla de control M0 en todas las edades analizadas.

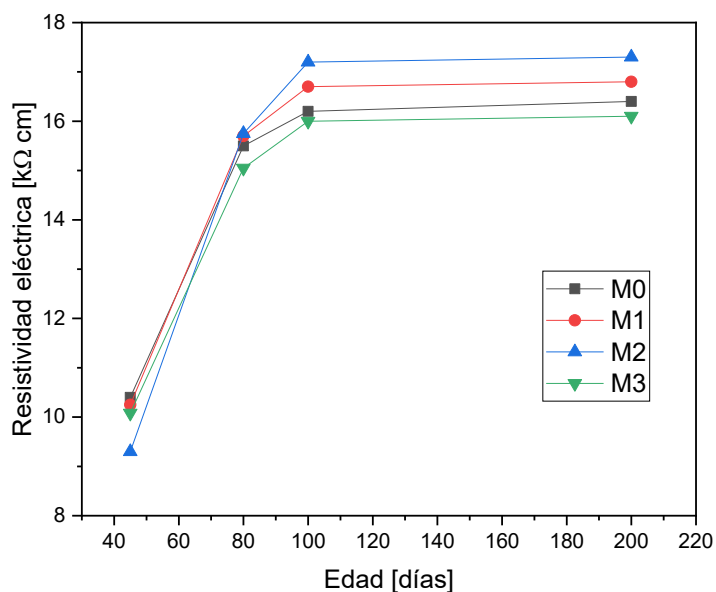


Figura 5.7. Resistividad eléctrica de las mezclas a diferentes edades.

Este comportamiento puede atribuirse a dos factores principales: por un lado, la reducción en el volumen de poros conectados, y por otro, la menor conductividad iónica asociada con una estructura de poros más densa y menos interconectada. En efecto, la incorporación de mucílago favorece una distribución más uniforme del agua en la mezcla, lo que permite una hidratación más eficiente y sostenida en el tiempo. Como resultado, se reduce la conductividad eléctrica de la matriz cementante, incrementando así el valor de resistividad eléctrica.

Se observó, además, que los valores tienden a estabilizarse a partir de los 56 días, lo cual indica que las principales reacciones químicas del cemento han alcanzado una etapa avanzada y que la microestructura del concreto ha madurado. Esta estabilización fue más evidente en

las mezclas modificadas con mucílago, lo cual sugiere que este aditivo contribuye no solo a una hidratación más prolongada, sino también a una estructura interna más consolidada y menos permeable. Los resultados coinciden con los reportados por Torres-Acosta et al., [110], quienes también observaron un incremento sostenido en la resistividad eléctrica al incorporar aditivos orgánicos al concreto.

Desde el punto de vista físico, estos datos también evidencian que el mucílago actúa como un reservorio de agua dentro de la mezcla. El agua contenida en su estructura coloidal es liberada gradualmente, permitiendo una hidratación interna prolongada sin generar un exceso de humedad superficial. Asimismo, los poros generados por las gotas de mucílago no están conectados entre sí, lo que impide la formación de una red capilar continua dentro del concreto. Esta discontinuidad en la red porosa limita la migración de agentes agresivos y, por tanto, mejora la durabilidad del material frente a procesos de corrosión y deterioro por penetración de cloruros o sulfatos.

5.3.7. Potencial a circuito abierto.

En la Figura 5.8 se presentan los resultados experimentales de potencial a circuito abierto obtenidos para las muestras de concreto evaluadas a distintas edades bajo el denominado ambiente A, el cual corresponde a condiciones ambientales naturales, es decir, exposición al aire libre sin intervención adicional de agentes agresivos específicos. Este parámetro electroquímico es la clave para la evaluación del estado de corrosión del acero de refuerzo embebido en la matriz del concreto. Se puede observar que, durante la fase inicial de exposición, es decir, en los primeros días de prueba, las mezclas que contienen mucílago de nopal en su formulación (M1, M2 y M3) presentan valores más negativos en comparación con la mezcla de referencia M0. A mayor concentración de mucílago incorporado en la mezcla, menor es el valor de potencial a circuito abierto registrado.

Este comportamiento inicial sugiere un mayor riesgo de potencial de corrosión del acero de refuerzo embebido en las muestras con mucílago, lo cual puede explicarse por la presencia de agua retenida en la estructura coloidal del mucílago que aún no ha sido completamente transferida a la matriz del concreto para participar en las reacciones de hidratación del

cemento. Dicha agua retenida podría generar condiciones de mayor humedad local en el entorno inmediato del acero, lo que favorece temporalmente una condición electroquímica más activa.

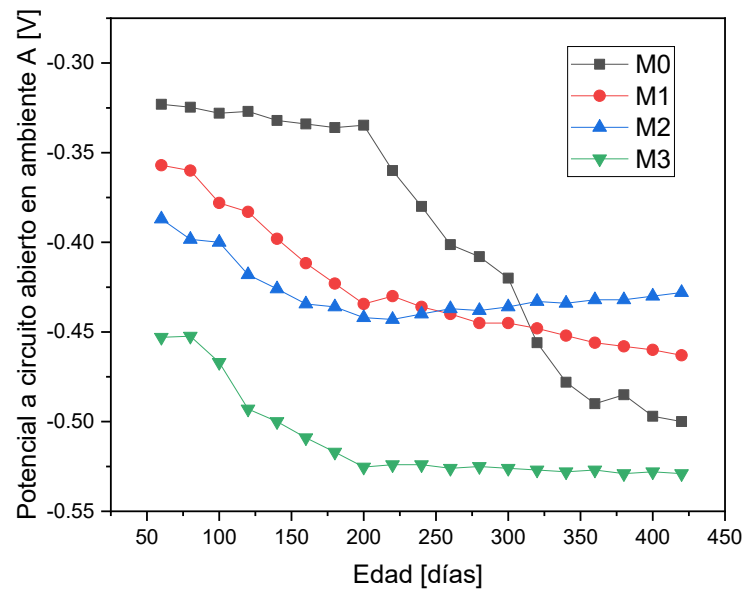


Figura 5.8. Potencial a circuito abierto en ambiente A, a diferentes edades.

Sin embargo, conforme avanza el tiempo de exposición, se produce una evolución positiva en los valores de potencial para las mezclas M1 y M2, cuyos contenidos de mucílago son moderados. A partir de los 150 días, estas mezclas comienzan a reportar valores menos negativos que la mezcla de control M0, indicando una mejora en la protección del acero de refuerzo. Por el contrario, la mezcla M3 con un contenido elevado de mucílago, continúa mostrando valores más negativos a lo largo del tiempo, reflejando un comportamiento menos favorable en términos de mitigación de la corrosión [111].

Este patrón observado puede explicarse por la microestructura generada durante la etapa de consolidación del concreto. En la mezcla M0, la ausencia de mucílago permite la formación de capilares interconectados que actúan como canales para el transporte de agua y agentes agresivos desde la superficie hacia el acero, facilitando así los procesos de corrosión. En el caso de la mezcla M3, el exceso de mucílago introduce una cantidad mayor de agua adicional,

lo que genera poros de gran tamaño y, en consecuencia, favorece la formación de capilares más amplios y conectados, replicando un comportamiento similar al observado en la mezcla de control. Por otro lado, en las mezclas M1 y M2, el contenido controlado de mucílago permite un efecto positivo en la formación de la microestructura interna de los poros generados por las gotas de mucílago, al no estar interconectados, no permiten la formación de una red capilar continua, disminuyendo así la movilidad de contaminantes hacia el acero.

Los valores elevados de potencial a circuito abierto registrados al final del período de prueba para las mezclas M1 y M2 confirman esta mejora. Estos resultados indican que el agua contenida en el mucílago se transfiere progresivamente hacia la matriz cementante, facilitando las reacciones de hidratación sin generar condiciones que favorezcan la interconexión de poros. Esto produce un concreto de mejor calidad desde el punto de vista electroquímico. Las gotas de mucílago dejan poros distribuidos aleatoriamente pero sin conectividad, lo que contribuye a una mayor resistencia frente a la corrosión del acero de refuerzo, como también se ha confirmado en los resultados de análisis de porosidad.

Por lo tanto, los valores más positivos de potencial en estas mezclas pueden ser interpretados como una mejora efectiva en la protección pasiva del acero embebido.

En la Figura 5.9 se muestran los valores de potencial a circuito abierto obtenidos para las probetas expuestas al ambiente B, que representa una condición más severa, caracterizada por una alta salinidad (30,000 ppm de NaCl) y elevada humedad relativa, simulando condiciones similares a las encontradas en zonas costeras donde predomina la acción del ambiente marino. Al inicio del período de exposición se registran valores significativamente negativos en todas las mezclas, lo cual es coherente con un entorno altamente corrosivo. La mezcla M0, al carecer de aditivos protectores, presenta los valores más negativos, indicando el mayor riesgo de corrosión activa.

Conforme transcurre el tiempo, se observa una tendencia general al aumento de los valores de potencial a circuito abierto en todas las mezclas, alcanzando un pico alrededor del día 330, lo cual refleja la formación de una capa pasiva de óxido sobre el acero de refuerzo, la cual actúa como barrera protectora. Este fenómeno es más acentuado en las mezclas con mucílago,

lo cual sugiere que dicho aditivo contribuye a la creación de un entorno interno más favorable para la pasivación del acero. No obstante, pasado este punto, los valores de potencial tienden a descender nuevamente, llegando incluso a niveles cercanos a -0.5 V para las mezclas M1 y M2, lo que podría estar indicando la ruptura de la capa pasiva por acumulación de cloruros en la interfase acero-concreto [112].

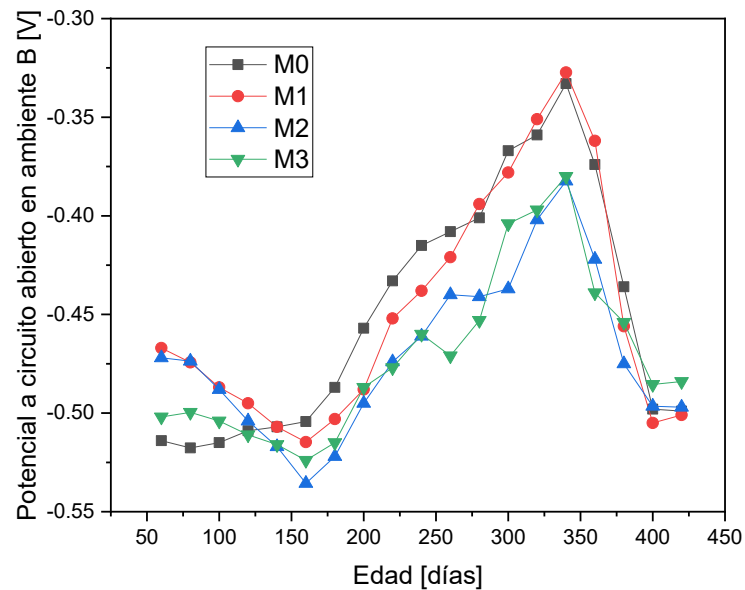


Figura 5.9. Potencial a circuito abierto en ambiente B, a diferentes edades.

Esta dinámica es coherente con lo observado en ambientes altamente agresivos, donde incluso los sistemas pasivos eventualmente fallan si la penetración de agentes agresivos no es controlada. Aun así, la mezcla M2 continúa mostrando una respuesta más favorable que las demás, demostrando que existe una dosificación óptima de mucílago que permite mitigar, aunque no eliminar por completo, los efectos de la corrosión en ambientes extremo. Es importante destacar que el nivel de salinidad utilizado (30,000 ppm) es representativo de condiciones reales cercanas a las aguas de mar, con 35,000 ppm de sales totales, lo que confirma la validez de esta simulación.

La Figura 5.10 presenta los valores de potencial a circuito abierto medidos en las probetas expuestas al ambiente C, caracterizado por una humedad elevada, pero sin contenido salino

significativo. En esta condición, los valores iniciales de potencial son más positivos que los registrados en el ambiente A, lo cual sugiere una mejor condición inicial de protección del acero de refuerzo. Este efecto se puede atribuir a que la humedad relativa elevada favorece el proceso de hidratación del cemento sin introducir agentes agresivos, permitiendo que el mucílago actúe positivamente desde las primeras etapas del curado.

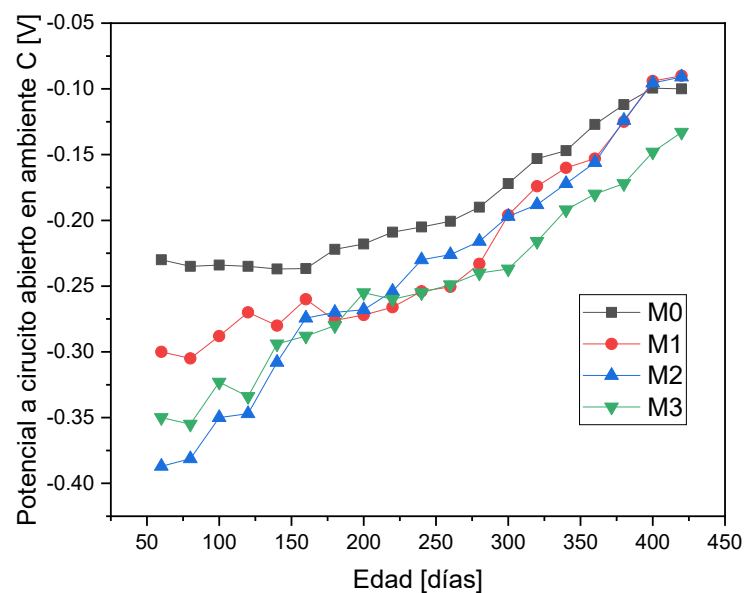
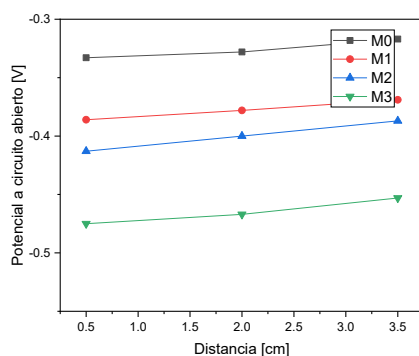


Figura 5.10. Potencial a circuito abierto en ambiente C, a diferentes edades.

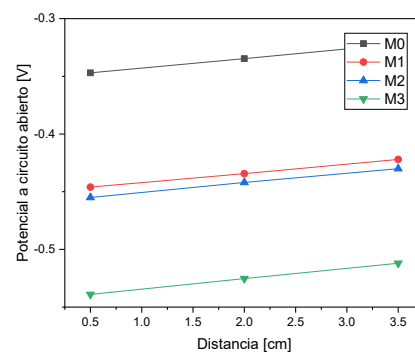
Conforme avanza el tiempo de exposición, los valores de potencial continúan aumentando, llegando a registrar niveles cercanos a -0.1 V, lo que indica un ambiente pasivo muy favorable para el acero de refuerzo. Al finalizar el período de prueba, las mezclas M1 y M2 destacan nuevamente por presentar valores menos negativos, cercanos a -0.08 V, reflejando un excelente desempeño en términos de inhibición de la corrosión.

Este comportamiento refuerza la idea de que una dosificación moderada de mucílago contribuye a una mejora significativa en las propiedades protectoras del concreto frente a la corrosión del acero.

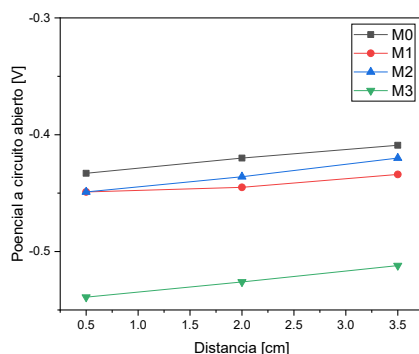
En un análisis más detallado, se realizaron mediciones adicionales de potencial a circuito abierto utilizando un arreglo lineal de electrodos, con el fin de evaluar cómo varía este parámetro en función de la distancia respecto al electrodo de referencia. En la Figura 5.11 se muestran los resultados obtenidos para las probetas bajo el ambiente A, en tiempos de 100, 200, 300 y 400 días, con distancias entre los electrodos de 0.5, 2.0 y 3.5 cm. Se observa que la variación de potencial entre dos puntos consecutivos se encuentra en un intervalo de 0.001 a 0.006 V, lo cual se traduce en un gradiente máximo de hasta 0.04 V por cada 10 cm de distancia. Esta información resulta de gran relevancia para los diseñadores estructurales, ya que permite inferir el comportamiento electroquímico a lo largo de secciones más amplias del refuerzo en estructuras reales.



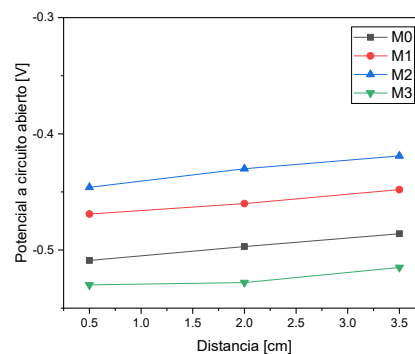
a) 100 días de edad.



b) 200 días de edad.



c) 300 días de edad.



d) 400 días de edad.

Figura 5.11. Potencial a circuito abierto en ambiente A, a diferentes distancias y edades.

Finalmente se destaca que los valores y patrones obtenidos deben considerarse en el contexto particular de cada proyecto constructivo donde se contemple el uso de mucílago de nopal como aditivo en mezclas de concreto. Es fundamental adaptar estos resultados a las características específicas de exposición ambiental, tipo de estructura, y requerimientos de durabilidad, a fin de aprovechar de manera óptima las ventajas que ofrece este aditivo natural en la protección del acero de refuerzo.

5.3.8. Velocidad de corrosión.

La Figura 5.12 presenta los resultados correspondientes a la velocidad de corrosión de las probetas de concreto reforzado, comparando las cuatro mezclas analizadas (M0, M1, M2 y M3) bajo el ambiente A, es decir, en condiciones ambientales sin presencia de agentes corrosivos adicionales. Se puede observar que, durante la primera mitad del período experimental, es decir, aproximadamente hasta los 130 días, la mezcla de referencia M0 presenta los valores más bajos de velocidad de corrosión, con una tasa inferior a 0.032 mm/año. En contraste, las mezclas modificadas con mucílago (M1, M2 y M3) exhiben tasas de corrosión ligeramente superiores, siendo más notable en la mezcla M3, la cual contiene la mayor proporción de mucílago y, por ende, mayor contenido de agua en su formulación inicial.

Este comportamiento sugiere que, en la etapa inicial del proceso, la presencia de mucílago influye directamente en la humedad interna del concreto, retardando parcialmente las reacciones de hidratación del cemento y creando un entorno más favorable para el inicio de la corrosión del acero de refuerzo, especialmente en las mezclas con mayor contenido de agua. La incorporación de mucílago actúa como un agente dosificador de agua, modulando el ritmo de hidratación y alterando la microestructura capilar del concreto en sus fases tempranas. Este fenómeno se refleja en los valores más altos de velocidad de corrosión observados para M3, ya que la humedad adicional no completamente incorporada actúa como medio para la migración de oxígeno y contaminantes hacia el acero.

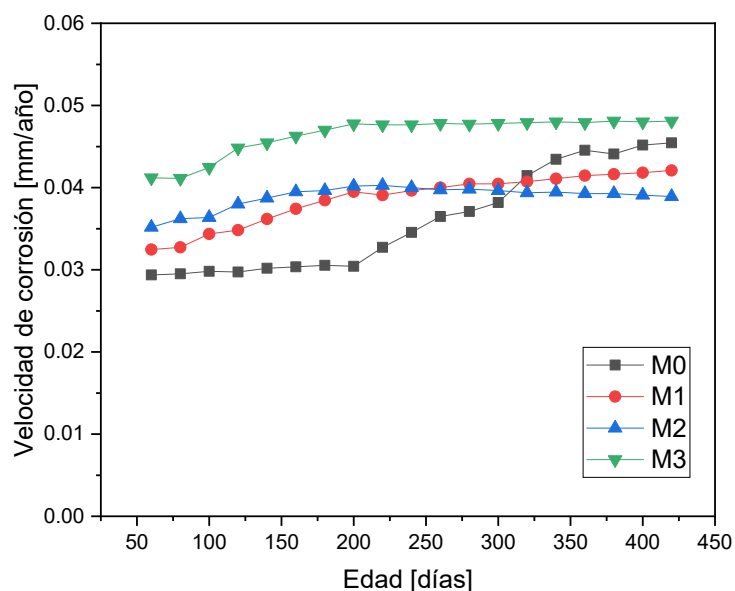


Figura 5.12. Velocidad de corrosión en probetas expuestas al ambiente A, condiciones ambientales.

En la segunda mitad del experimento, es decir, a partir de los 130 días, se evidencia una inversión en el comportamiento de las mezclas. Las formulaciones que incluyen mucílago (M1 y M2 principalmente) presentan una notable estabilidad en sus valores de velocidad de corrosión, mostrando poca variabilidad y una tendencia a mantenerse dentro de un intervalo moderado. En cambio, la mezcla M0 comienza a experimentar un incremento progresivo en la velocidad de corrosión, alcanzando un valor máximo de 0.44 mm/año al finalizar el período de estudio. Este aumento indica que, con el paso del tiempo, la mezcla de referencia agota su reserva interna de agua, lo cual da lugar a un incremento en la concentración de oxígeno en los poros de concreto. Dicha condición favorece notablemente el proceso de corrosión del acero de refuerzo, ya que el oxígeno actúa como agente oxidante clave en las reacciones electroquímicas asociadas a este fenómeno.

Estos resultados permiten concluir que, aunque las mezclas con mucílago pueden presentar una reactividad inicial más alta debido a la humedad contenida, a largo plazo ofrecen un mejor desempeño al alcanzar un equilibrio interno más favorable y una microestructura más densa y protectora frente a la corrosión. El comportamiento de la mezcla M0, en cambio,

refleja una pérdida progresiva de su capacidad protectora, producto de su mayor porosidad capilar interconectada y de su incapacidad para mantener condiciones desfavorables a la corrosión durante todo el ciclo de exposición.

La Figura 5.13 muestra la evolución de la velocidad de corrosión para las mismas cuatro mezclas, esta vez sometidas a un ambiente altamente agresivo caracterizado por elevada salinidad y humedad, simulando de forma controlada un entorno marino. En este escenario, durante los primeros 300 días del experimento se observa una tendencia decreciente en los valores de velocidad de corrosión para todas las mezclas, lo cual puede atribuirse a la presencia constante de agua, que actúa como barrera física para la entrada de oxígeno atmosférico hacia el interior del concreto. Dado que el oxígeno tiene baja solubilidad en el agua, su difusión hacia el acero se ve limitada, reduciendo así la disponibilidad del agente oxidante requerido para el desarrollo de las reacciones corrosivas.

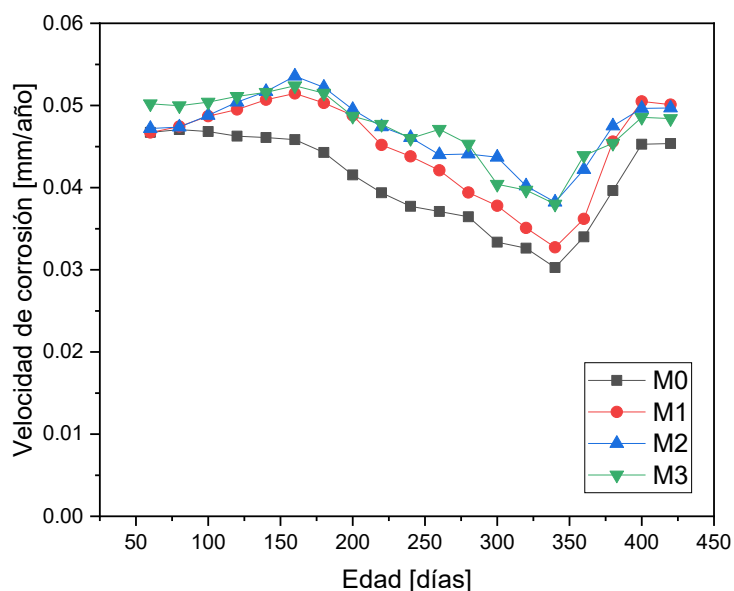


Figura 5.13. Velocidad de corrosión en probetas expuestas al ambiente B, alta salinidad y humedad.

Entre los días 330 y 350 del experimento, se identifica un punto mínimo en la velocidad de corrosión para todas las mezclas, lo cual sugiere que se ha alcanzado un equilibrio transitorio

en el sistema, en el cual la presencia de una capa de óxido estable sobre la superficie del acero impide temporalmente la continuación del proceso corrosivo. No obstante, posterior a este período, se observa un incremento en la velocidad de corrosión, alcanzando nuevamente los valores registrados al inicio del experimento. Esta variación indica que la capa pasiva formada sobre el acero ha comenzado a deteriorarse o romperse, permitiendo que los agentes agresivos, como los iones cloruro presentes en el medio, alcancen nuevamente la superficie metálica e inicien la reactivación del proceso de corrosión.

Este comportamiento pone de manifiesto una importante limitación en la protección ofrecida por las mezclas estudiadas bajo condiciones marinas extremas. La presencia constante de sales, en una proporción equivalente al 3.5 % en peso (similar a la del agua de mar), acelera la ruptura de la capa protectora y favorece la penetración de cloruros.

Estos hallazgos sugieren que las formulaciones evaluadas, si bien ofrecen un rendimiento aceptable en condiciones menos agresivas, no resultan completamente eficaces para su aplicación en estructuras sumergidas o expuestas de manera continua a entornos de alta salinidad. La mezcla M3, en particular, presenta el desempeño menos favorable en esta condición, debido a la mayor facilidad para el transporte de humedad y contaminantes a través de su matriz porosa.

La Figura 5.14 muestra los resultados de velocidad de corrosión obtenidos para las probetas expuestas al ambiente C, el cual se caracteriza por su elevada humedad ambiental sin la presencia significativa de cloruros u otros agentes corrosivos adicionales.

En esta condición, se observa un comportamiento distinto al de los ambientes anteriores: para todas las mezclas, la velocidad de corrosión se mantiene en niveles bajos durante la totalidad del período de prueba. Este resultado es coherente con la hipótesis de que la constante humedad superficial actúa como un sello natural que impide la entrada directa de contaminantes y limita la difusión de oxígeno a través de la matriz del concreto. La baja solubilidad del oxígeno en agua contribuye a esta barrera natural, dificultando su acceso hasta la superficie del acero de refuerzo.

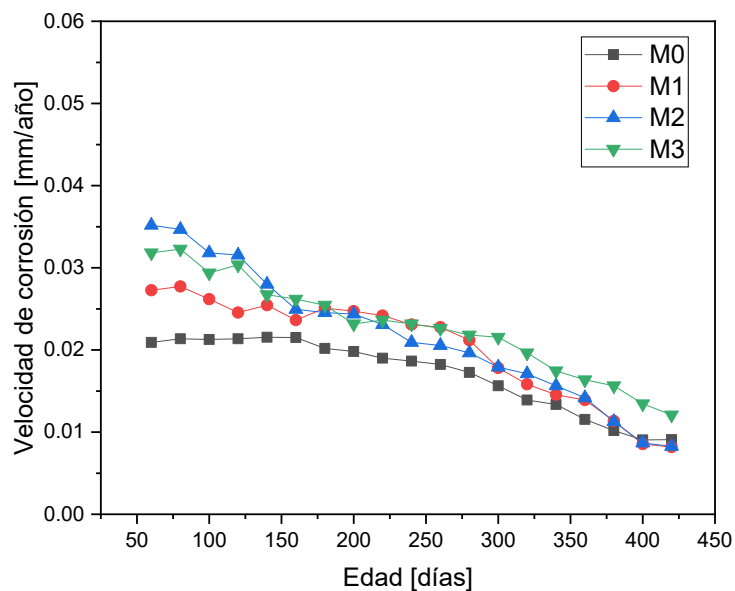


Figura 5.14. Velocidad de corrosión en probetas expuestas al ambiente C, alta humedad.

Además, la presencia constante de agua facilita un adecuado desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento, lo que conduce a una microestructura más compacta y menos susceptible a la formación de poros interconectados. Esta condición favorece especialmente a las mezclas con mucílago, las cuales, como ya se mencionó, actúan como agentes dosificadores de agua en la mezcla. Hacia el final del período de prueba, se observa que las mezclas M1 y M2, que contienen cantidades moderadas de mucílago, presentan velocidades de corrosión inferiores a las de la mezcla de referencia M0, lo cual reafirma su potencial como aditivos beneficiosos para mejorar la durabilidad del concreto bajo condiciones de alta humedad.

Este desempeño sugiere que, en ambientes húmedos sin agresores químicos adicionales, el mucílago de nopal puede ser considerado un aditivo funcional que no solo mejora la hidratación del sistema cementante, sino que también contribuye a la estabilidad de largo plazo de las propiedades protectoras del concreto frente a la corrosión del acero de refuerzo. La mezcla M3, aunque no alcanza los mejores resultados, mantiene un desempeño aceptable,

lo que también pone de manifiesto que, aún en dosis elevadas, el mucílago no resulta perjudicar en ambientes de alta humedad sin salinidad.

5.3.9. Eficiencia.

De acuerdo con los datos obtenidos para las probetas expuestas al ambiente A, el cual corresponde a condiciones ambientales naturales sin la presencia adicional de agentes agresivos, se observó que las mezclas que presentaron el mejor desempeño en términos de eficiencia fueron aquellas identificadas como M1 y M2, que contienen 5 % y 10 % de mucílago de nopal, respectivamente, en sustitución parcial del agua de mezclado. Estas dos formulaciones superaron significativamente a la mezcla de referencia (M0), mostrando valores de eficiencia del 11 % para M1 y del 17 % para M2, lo cual representa una mejora sustancial en las propiedades de durabilidad del concreto frente al fenómeno de corrosión del acero de refuerzo en un entorno atmosférico. Esta mejora puede atribuirse a la capacidad del mucílago para regular la hidratación del cemento, reducir la formación de capilares interconectados y genera una matriz más compacta, lo cual restringe la difusión de oxígeno y otros agentes agresivos hacia las barras de refuerzo.

Además, el comportamiento electroquímico observado sugiere que el mucílago contribuye a la formación de una microestructura más estable, con menos permeabilidad y mayor resistencia al ingreso de humedad y contaminantes del ambiente.

En lo que respecta al ambiente B, caracterizado por condiciones de alta salinidad y elevada humedad relativa, que simulan un entorno marino, las muestras ensayadas no presentaron valores significativos de eficiencia en términos de protección contra la corrosión. En este caso, la exposición prolongada a un medio altamente agresivo, con una concentración salina del orden de 30,000 ppm, cercana a la del agua de mar, generó un efecto degradante tanto en las mezclas convencionales como en las modificadas con mucílago.

Los resultados obtenidos indican que, bajo estas condiciones extremas, las formulaciones propuestas no logran mantener su desempeño protector, posiblemente debido a la disolución y migración acelerada de iones cloruro a través de la matriz del concreto, los cuales atacan directamente la superficie del acero de refuerzo. La falta de eficiencia significativa sugiere

que la tecnología basada en mucílago de nopal no es adecuada para ambientes con presencia constante de agua salina, dado que los mecanismos de protección ofrecidos por el mucílago son superados por la agresividad del medio.

Esto pone en evidencia la necesidad de desarrollar alternativas adicionales o combinar el uso de mucílago con otros aditivos específicos para ambientes marinos si se desea garantizar la durabilidad del concreto armado en dichas condiciones.

En el caso del ambiente C, correspondiente a un entorno de alta humedad, pero sin salinidad significativa, los resultados obtenidos fueron más alentadores. Las mezclas M1 y M2 mostraron nuevamente un mejor desempeño con respecto a la mezcla de referencia M0, aunque con valores de eficiencia más moderados, del orden del 5 % para ambas formulaciones. Este comportamiento indica que, si bien el efecto protector del mucílago es menos marcado que en el ambiente A, sigue siendo favorable en condiciones de humedad constante.

La presencia continua de agua contribuye a mantener hidratada la matriz del concreto, lo que facilita el desarrollo de una estructura interna más estable. En este contexto, el mucílago actúa como un regulador de humedad que mejora las condiciones de hidratación del cemento, generando beneficios en la durabilidad sin afectar negativamente las propiedades estructurales del material. No obstante, es importante destacar que los beneficios son más notorios en ambientes donde la humedad está presente de forma intermitente o moderada, como el ambiente A, que en situaciones de saturación constante como en el ambiente C.

En función de los resultados experimentales obtenidos a lo largo del estudio, se puede concluir que el proceso propuesto, consistente en la incorporación de mucílago de nopal como sustituto parcial del agua de mezclado en proporciones del 5 % al 10 %, resulta efectivo en mejorar la eficiencia del concreto armado en entornos con presencia de humedad, especialmente en condiciones ambientales típicas no agresivas.

Estas proporciones han demostrado ofrecer un equilibrio adecuado entre trabajabilidad, hidratación y comportamiento frente a la corrosión, sin comprometer la integridad estructural del concreto ni sus propiedades mecánicas. Por el contrario, en condiciones de exposición

extrema como en ambientes marinos, el sistema evaluado presenta limitaciones importantes que deben ser consideradas si se pretende aplicar esta tecnología en infraestructuras ubicadas en zonas costeras o expuestas directamente al agua de mar.

A futuro, se recomienda evaluar la compatibilidad del mucílago con inhibidores de corrosión tradicionales o su combinación con aditivos impermeabilizantes que permitan ampliar el intervalo de aplicación de este aditivo natural en condiciones más severas.

6. Conclusiones.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian el potencial del mucílago de nopal como aditivo funcional en mezclas de concreto armado, particularmente en contextos rurales o de recursos limitados. A lo largo del trabajo se comprobó que su incorporación, en proporciones controladas, no solo aporta beneficios en términos de sostenibilidad y economía, sino que también modifica las propiedades físicas, químicas y mecánicas del concreto. Se identificaron efectos importantes en la trabajabilidad, porosidad, resistencia y comportamiento frente a ambientes agresivos. Asimismo, se destacó la necesidad de un adecuado diseño de mezcla para optimizar el desempeño del concreto y proteger el acero de refuerzo, especialmente en zonas expuestas a alta humedad y salinidad. Este enfoque integral contribuye a la mejora de la durabilidad y vida útil de las estructuras. A continuación, se presentan las conclusiones específicas:

- Con la metodología propuesta se pueden obtener buenos rendimientos de mucílago, lo que hace la hace viable para ser aplicada en zonas rurales donde no se cuente con equipo de laboratorio especializado.
- El mucílago de nopal afecta las mezclas de concreto armado confiriéndole nuevas propiedades físicas y mecánicas relacionadas con la porosidad, adherencia y trabajabilidad.
- El mucílago debe emplearse en sustitución de una fracción del agua de mezclado, no como un componente adicional, ya que el exceso de agua puede afectar negativamente la calidad del concreto.
- El grado de hidratación y la porosidad están principalmente determinados por la relación agua-cemento de la mezcla, La porosidad influye en la resistencia, permeabilidad y durabilidad del concreto.

- En presencia de mucílago, el gel resultante se deposita en los huecos dejados por los agregados sólidos, generando poros no interconectados, lo cual no compromete la calidad estructural del concreto.
- La porosidad inducida por el mucílago confiere una rugosidad adicional a la superficie del concreto, lo que puede favorecer la adherencia entre elementos constructivos y de recubrimientos aplicados.
- La resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica aumentan con el tiempo de curado, alcanzando valores superiores a los de la mezcla de referencia.
- De las tres mezclas ensayadas, la mezcla M2 (con un 10 % de mucílago en el agua de mezclado) presentó el mejor desempeño. En cambio, proporciones superiores del 15 % disminuyen considerablemente la calidad del concreto.
- El agregado de mucílago modifica las propiedades del concreto. A bajas proporciones no hay mejoras significativas y a proporciones altas se compromete la integridad del material.
- Es imprescindible realizar un diseño de mezcla cuidadoso, ya que las propiedades de los agregados pueden variar según el proveedor o las condiciones ambientales.
- El mucílago aporta protección adicional frente a la corrosión del acero de refuerzo, especialmente en ambientes con alta humedad o exposición salina.
- La velocidad de corrosión del acero se incrementa al doble en ambiente de alta humedad y al triple en condiciones de alta humedad con salinidad.
- La proximidad entre varillas de refuerzo debe considerarse durante el diseño estructural para minimizar la corrosión ya alargar la vida útil de los elementos constructivos.
- Los resultados pueden mejorarse mediante la aplicación de recubrimientos adicionales que refuercen la protección del acero frente a agentes agresivos.
- El mucílago mejora la trabajabilidad y plasticidad del concreto gracias a sus cadenas de pectina, y reduce el desplome sin afectar el rendimiento estructural, debido a su capacidad de absorber agua durante el mezclado.
- La metodología propuesta es especialmente útil en entornos costeros con alta humedad y salinidad moderada, aunque no equivale al agua de mar.

En resumen, las reacciones de hidratación del concreto y los efectos inducidos por el mucílago son determinante para su desempeño. Comprender estos mecanismos permite diseñar concretos más durables y resistentes frente a agentes agresivos. Por lo tanto, el entendimiento profundo del comportamiento del concreto y del acero de refuerzo en ambientes agresivos es esencial para prevenir fallos estructurales y mejorar la durabilidad de las estructuras.

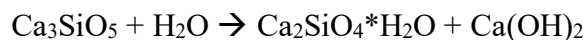
ANEXOS.

En esta sección se presentan con detalle las fases involucradas en cada una de las etapas del proceso general de formación y evolución del concreto, así como la interacción específica del mucílago de nopal dentro de dicho sistema. Se abordan los mecanismos fisicoquímicos fundamentales que rigen la hidratación del cemento, el desarrollo microestructural del concreto y la forma en que el mucílago modifica dichos procesos, tanto en la fase fresca como en estado endurecido. Asimismo, se hace énfasis en cómo la incorporación de este aditivo natural puede influir en la durabilidad del material frente a condiciones ambientales agresivas.

ANEXO A. Concreto.

El concreto es un material compuesto multifásico que, a pesar de su apariencia maciza y homogénea, presenta una microestructura sumamente compleja y dinámica. Su resistencia mecánica, durabilidad, porosidad y capacidad de protección frente a la corrosión del acero de refuerzo dependen de un conjunto de variables fisicoquímicas que interactúan desde el momento del mezclado hasta el estado de servicio del material endurecido. El cemento Portland, principal componente reactivo del concreto, está constituido por una mezcla de compuestos calco-silicatados y aluminatos, entre los que destacan el silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).

Durante la etapa de hidratación, estos compuestos reaccionan con el agua de mezclado para formar productos como el silicato de calcio hidratado (CSH), hidróxido de calcio (CH o portlandita), etringita (AFt), monosulfoaluminato (AFm) y otras fases hidratadas secundarias que consolidan la matriz del concreto [113].



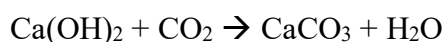
El proceso de fraguado y endurecimiento no se limita a una simple pérdida de agua por evaporación, involucra una serie de reacciones química exotérmicas controladas, que se desarrollan progresivamente y son altamente sensibles a las condiciones ambientales y de composición del sistema. La reacción inicial del C_3S con el agua produce un rápido aumento de la resistencia mecánica, mientras que la hidratación más lenta del C_2S aporta ganancias de resistencia a edades mayores. La velocidad y grado de hidratación de estas fases están determinadas por la relación agua-cemento (a/c), la temperatura del medio, el tipo de curado, y la disponibilidad de agua libre. La presencia de humedad adecuada durante el curado resulta fundamental para permitir el desarrollo óptimo del gel CSH, que actúa como el principal aglutinante estructural del concreto [80][87][110].

Durante el proceso de hidratación, se desarrolla una microestructura heterogénea caracterizada por la coexistencia de geles CSH de distintas densidades, poros capilares, partículas de cemento no hidratadas (UH), cristales de portlandita, etringita primaria y secundaria, así como una solución intersticial saturada de iones. Este sistema en equilibrio

dinámico es altamente susceptible a las condiciones del entorno, ya que los productos de hidratación pueden modificarse con el tiempo como resultado de reacciones secundarias o de procesos de degradación externa [114][115].

A medida que el concreto envejece, los productos hidratados evolucionan lentamente hacia estados de menor energía libre, lo que puede mejorar o disminuir la resistencia según el entorno de exposición. Se identifican fases críticas del proceso donde ocurren inflexiones en la velocidad de hidratación, las cuales están asociadas a fenómenos como la formación de capas de productos hidratados sobre granos de cemento o la reducción de la difusión de agua en la pasta.

Cabe señalar que el concreto no es un sistema cerrado ni impermeable. Su porosidad total y la conectividad de los poros juegan un papel determinante en su vulnerabilidad frente a agentes agresivos del entorno. La penetración de dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), cloruros o sulfatos a través de los poros capilares puede alterar la química interna del concreto. Uno de los procesos más estudiados es la carbonatación, en la que el CO_2 atmosférico reacciona con el hidróxido de calcio (portlandita) para formar carbonato de calcio (CaCO_3), reduciendo de forma progresiva el pH de la solución intersticial del concreto desde valores alcalinos típicos (12.5 – 13.9) hasta niveles cercanos o inferiores a 9. Este descenso en el pH compromete la capa pasiva de dióxido que protege al acero de refuerzo, promoviendo así su corrosión [113][117][80].



Por otra parte, la portlandita, a pesar de su importancia en el mantenimiento del pH alcalino, también representa un punto débil estructural debido a su elevada solubilidad. En ambientes con presencia de sulfatos, puede reaccionar formando etringita secundaria, una fase expansiva que al cristalizar dentro de fisuras y poros genera tensiones internas y microfisuración, lo cual debilita mecánicamente la matriz del concreto [118]. La formación de etringita expansiva es uno de los mecanismos principales en la patología de concretos expuestos a aguas agresivas o suelos sulfatados.

A nivel microscópico, las microfisuras pueden originarse en edades tempranas como resultado del calor de hidratación del agua de mezclado. Aunque estas microfisuras no siempre son estructuralmente críticas, sí incrementan la porosidad efectiva del sistema y permiten una mayor difusión de agentes agresivos. No obstante, el desarrollo posterior del gel CSH tiende a rellenar parcialmente estos espacios, mejorando la cohesión interna y reduciendo la permeabilidad del material. En este sentido, el balance entre las fases que reaccionan rápidamente (como la alita, C_3S) y aquellas que hidratan más lentamente (como la velita, C_2S), resulta clave para lograr un desempeño óptimo a largo plazo del concreto [90].

En este complejo sistema de reacciones y transformaciones, la incorporación del mucílago de nopal representa una modificación significativa del medio de hidratación. El mucílago no solo aporta agua al sistema, sino que lo hace de forma gradual, gracias a su estructura coloidal y su capacidad para retener agua en sus cadenas de polisacáridos. Este comportamiento actúa como un mecanismo de curado interno, reduciendo la evaporación prematura, controlando la formación de microfisuras por retracción plástica y favoreciendo una hidratación más completa del cemento. Especialmente en mezclas con relaciones a/c reducidas.

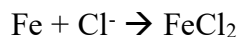
Además, la presencia del mucílago podría influir en la química de la solución intersticial y en la interacción iónica con las fases hidratadas, aspecto que se explora con mayor detalle en las siguientes secciones del estudio.

ANEXO B. Acero de refuerzo.

El acero al carbón, elemento fundamental en el refuerzo estructural de elementos de concreto armado, se utiliza ampliamente debido a su alta resistencia mecánica, ductilidad, facilidad de conformado y compatibilidad con el concreto, tanto en términos de adherencia mecánica como de coeficiente de dilatación térmica. En condiciones normales, este acero se encuentra mayoritariamente en su forma metálica, con número de oxidación 0. No obstante, al estar expuesto a ambientes específicos, dicho estado de equilibrio puede alterarse debido a reacciones electroquímicas, en las que el hierro metálico se transforma en iones ferrosos (Fe^{2+}) o férricos (Fe^{3+}), generando una variedad de productos de corrosión como el óxido férrico (Fe_2O_3) y sus formas hidratadas, comúnmente conocidas como herrumbre ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) [86].

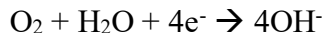
La corrosión del acero en el concreto es un proceso electroquímico complejo, que requiere de una serie de condiciones para su iniciación y propagación. Específicamente, este fenómeno es favorecido por la presencia simultánea de humedad, oxígeno disuelto y agentes agresivos como los iones cloruro (Cl^-), o el dióxido de carbono (CO_2).

La reacción anódica consiste en la oxidación del hierro metálico (Fe^0), que libera electrones y forma iones Fe^{2+} . En ambientes con alta concentración de cloruros, estos iones pueden combinarse con el hierro para formar sales solubles como el cloruro ferroso (FeCl_2), el cual es altamente inestable en medios alcalinos, impidiendo así la formación de capas protectoras pasivantes de óxidos sobre la superficie metálica y, por tanto, acelerando la progresión de la corrosión [89].



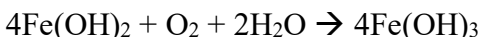
Paralelamente, en la reacción catódica se produce la reducción del oxígeno disuelto, lo cual depende del potencial redox del medio y del pH. En medios alcalinos o neutros típicos del concreto, el oxígeno actúa como despolarizado catódico, facilitando la eliminación de iones H^+ del cátodo y completando el circuito electroquímico.

El oxígeno participa activamente como agente oxidante, siendo su difusión a través de los poros del concreto uno de los factores determinantes en la velocidad global del proceso [119].



Los productos generados en estas reacciones incluyen diferentes óxidos y carbonatos de hierro, cuya naturaleza y morfología dependen del medio químico, la humedad relativa y la disponibilidad de oxígeno. Por ejemplo, en presencia de agua con carbonatos, pueden formarse compuestos como la siderita (FeCO_3). Entre los óxidos más comunes se encuentran el óxido ferroso (FeO), que es negro, inestable y se forma en condiciones de bajo potencial redox, y el óxido férrico (Fe_2O_3), de color rojo y más estable, el cual suele acumularse en capas porosas que no ofrecen una barrera protectora eficaz [81][84].

En condiciones de alta humedad, especialmente en ambientes marinos o industriales, la formación de estos productos puede distribuirse homogéneamente sobre la superficie del acero, lo que en un primer momento podría retardar las reacciones catódicas al actuar como barrera difusiva [76][120][121][122].



El fenómeno de despasivación del acero se presenta cuando la alcalinidad del concreto disminuye por debajo de un umbral crítico, o bien cuando agentes agresivos logran penetrar la matriz y alcanzar la superficie del refuerzo. Este umbral se supera, por ejemplo, cuando el contenido de cloruros supera el 0.4 % respecto al peso del cemento o cuando el pH desciende por debajo de 9, lo cual puede ser causado por procesos como la carbonatación.

Aunque el CO_2 no reacciona directamente con el hierro, sí reduce el pH al reaccionar con la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), lo que desestabiliza la capa pasiva protectora. Los productos de corrosión que se generan poseen un volumen entre 2 y 10 veces superior al del acero original, generando presiones expansivas que superan la resistencia a tracción del concreto y causan

agrietamiento, desprendimiento del recubrimiento y eventualmente, pérdida de capacidad estructural [76].

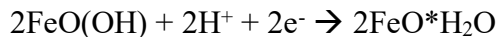
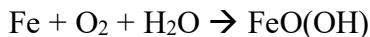


Un factor decisivo en la activación y sostenimiento del proceso corrosivo es la humedad atmosférica. La velocidad de corrosión es mínima cuando la humedad relativa está por debajo de un umbral conocido como humedad crítica, generalmente estimada en torno al 60 % para el acero al carbono [123].

Sin embargo, en ambientes donde existen ciclos alternos de humectación y secado, como ocurre en zonas costeras, estructuras marítimas o entornos industriales con alta humedad relativa y ventilación, se intensifica la corrosión. Esto se debe al establecimiento de un diferencial de aireación, en el que las zonas más expuestas al oxígeno se convierten en cátodos y las zonas protegidas actúan como ánodos, lo que acelera el flujo de electrones y, por ende, la tasa de corrosión [1][84].

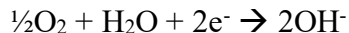
Este proceso se puede dividir en tres etapas principales [1] [121]:

Mojado de superficie seca. En esta etapa inicial, cuando la superficie del acero entra en contacto con agua líquida, se forma una celda electroquímica que permite la disolución anódica del hierro. El oxígeno disuelto actúa lentamente como catión, y la formación inicial de productos como $\text{FeO}(\text{OH})$ es limitada debido a la disponibilidad reducida del hierro libre. La capa de óxido generada es delgada, amorfa y poco protectora.

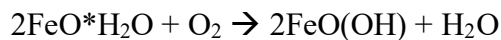


Superficie húmeda. A medida que se agota el $\text{Fe}(\text{OH})$ disponible, el oxígeno disuelto se convierte en el principal reactivo catódico. Sin embargo, la baja tasa de difusión del oxígeno a través de la película de agua limita la reacción, reduciendo momentáneamente la velocidad

de corrosión. Durante esta etapa, el proceso puede estabilizarse temporalmente, aunque continúa la acumulación progresiva de productos de corrosión.



Secado de la superficie. Conforme el agua superficial se evapora, el espesor de la película electrolítica disminuye, lo que facilita la entrada de oxígeno atmosférico. Esta reoxigenación del sistema reactiva la reacción catódica, reoxidando el Fe^{2+} acumulado previamente, lo que incrementa la producción de óxidos y acelera significativamente la corrosión. Este ciclo de oxidación-reoxidación, repetido con cada nuevo episodio de secado, resulta en un crecimiento acumulativo de los productos de corrosión, con la consecuente pérdida progresiva de masa metálica.



Este tipo de ambientes, los ciclos de humectación y secado no solo promueve la corrosión directa del acero, sino que también transforman estructuralmente la capa pasiva, que pasa de ser una berrera protectora a un medio poroso, débil y electroquímicamente activo. Este deterioro continuo puede generar fallas localizadas, como picaduras y fisuras internas, que comprometen seriamente la integridad del refuerzo a largo plazo [121].

ANEXO C. Mucílago.

El uso de mucílago como aditivo natural en la elaboración de concreto ha demostrado mejorar significativamente una amplia gama de propiedades mecánicas, fisicoquímicas y de durabilidad del material cementante. Este biopolímero, extraído de diversas fuentes vegetales como semillas o frutos mucilaginosos, actúa como agente multifuncional dentro de la matriz cementante.

Uno de los efectos más notables observados durante su incorporación es el retardo en el tiempo de curado del concreto, un fenómeno que se atribuye a la capacidad del mucílago para liberar agua de manera progresiva y controlada. Esta propiedad higroscópica, basada en la interacción de sus cadenas moleculares con moléculas de agua, permite mantener condiciones de humedad interna estables durante las etapas críticas de hidratación del cemento, lo que mitiga la aparición de tensiones internas relacionadas con la evaporación prematura y la contracción plástica [124][18].

La capacidad de retención hídrica del mucílago, atribuida principalmente a la presencia de polisacáridos complejos como la arabinosa, xilosa o galactosa, genera un microambiente favorable para la hidratación sostenida del cemento. Esta hidratación prolongada conduce a una mayor eficiencia en la formación de productos cementantes secundarios, como el gel C-S-H (silicato de calcio hidratado), lo que a su vez fortalece la matriz del concreto.

Además, esta liberación controlada del agua coadyuva en la mitigación del fenómeno de contracción por secado, gracias a la acción sinérgica de sus componentes hidrofílicos (polisacáridos, proteínas y ácidos orgánicos) que estabilizan la humedad mediante la formación de enlaces de hidrógeno con las moléculas del entorno cementante [125].

En cuanto al desempeño mecánico, diversos estudios han reportado incrementos de hasta un 40 % en la resistencia a la compresión y a la flexión en mezclas tratadas con mucílago en comparación con concretos de referencia sin aditivos [126]. Esta mejora se asocia directamente con una hidratación más completa del cemento y una mejor integración de sus productos de reacción en la microestructura del concreto. Asimismo, se ha documentado una

mayor densificación de la matriz y una menor presencia de poros interconectados lo que repercute favorablemente en la resistencia a cargas mecánicas cíclicas o dinámicas.

De igual forma, se ha evidenciado una disminución en la difusión de agentes agresivos, como los iones cloruro, de hasta un 20 % tras 120 días de curado, lo que extiende la vida útil del concreto en ambientes hostiles o marinos [21].

Desde el punto de vista reológico y microestructural, la adición de mucílago incrementa la viscosidad del sistema cementante entre 5 y 10 centipoises (cP), dependiendo de la concentración y el tipo de mucílago utilizado. Este incremento en la viscosidad modifica la movilidad de las partículas en suspensión y favorece una mayor cohesión interna, lo cual permite controlar y reducir la porosidad efectiva del concreto al inducir un bloqueo parcial de los poros capilares [109].

Este fenómeno se explica tanto por la capacidad del mucílago para rellenar huecos y microvacíos en el interior de la matriz, como por su tendencia a formar geles tridimensionales que reorganizan las fases hidratadas del cemento. Como resultado, se produce una disminución en la absorción capilar de agua y una menor penetración de agentes externos agresivos, tales como soluciones salinas, ácidos débiles y partículas disueltas [91][110].

Esta gelificación, característica del mucílago, no solo mejora la compactación interna, sino que también contribuye a una distribución más homogénea de las fases endurecidas, generando una microestructura más densa, continua y resistente a la fisuración [90][91].

Desde una perspectiva química, los grupos funcionales presentes en la estructura del mucílago, en particular los grupos ácidos carboxílicos derivados del ácido galacturónico, son capaces de formar enlaces iónicos con los iones calcio (Ca^{2+}) liberados durante la hidratación del cemento. Esta interacción resulta en la formación de puentes inter e intramoleculares entre cadenas de polisacáridos, lo que refuerza la cohesión de la matriz y fortalece las propiedades mecánicas del concreto.

Además, estos enlaces estabilizan el hidróxido de calcio (portlandita) y favorecen la distribución uniforme del gel C-S-H en todo el entramado mineral [125]. Paralelamente, algunos de los componentes del mucílago muestran un comportamiento de tipo puzolánico,

reaccionando con el Ca(OH)_2 para formar nuevos geles cementantes que rellenan poros capilares, lo que no solo incrementa la densidad de la mezcla sino también su resistencia progresiva a largo plazo [76][91].

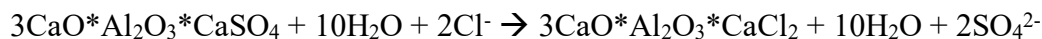
No obstante, se ha observado que en mezclas con concentraciones elevadas de mucílago (generalmente superiores al 15 % en peso del agua de mezclado) puede producirse una inhibición parcial del proceso de hidratación del cemento. Este efecto, aunque dependiente del tipo específico de mucílago y su grado de purificación, se atribuye a la adsorción superficial de los biopolímeros sobre los productos primarios de hidratación, como el C-S-H y la portlandita.

Esta adsorción genera una película superficial sobre las partículas de cemento que dificulta la penetración del agua y, por lo tanto, reduce la velocidad de reacción inicial [18][82]. Aunque este fenómeno no impide completamente el desarrollo de las fases hidratadas, sí puede retrasar su formación, afectando la resistencia temprana del concreto. Sin embargo, en el mediano y largo plazo, el concreto tratado con mucílago suele recuperar e incluso superar el desempeño de las mezclas convencionales, gracias a su evolución microestructural más controlada y a la mayor estabilidad frente a agresiones ambientales.

ANEXO D. Cloruros.

Los iones cloruro, presentes en ambientes marinos o en contacto con sales descongelantes, tienen la capacidad de penetrar la matriz porosa del concreto e inducir la corrosión del acero de refuerzo, comprometiendo gravemente la integridad estructural.

Para mitigar este fenómeno, resulta esencial implementar mecanismos que disminuyan la movilidad de los cloruros dentro de la estructura. En este sentido, el aluminato tricálcico (C_3A), presente en el cemento Portland ordinario, desempeña un rol decisivo. Este compuesto reacciona químicamente con los iones cloruro para formar productos insolubles como la sal de Friedel o cloroaluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), los cuales inmovilizan los cloruros, disminuyendo así la cantidad de cloruros libres disponibles para reaccionar con el acero [116][108].



La incorporación de mucílago como aditivo natural en mezclas de concreto representa una alternativa sostenible y funcional para mejorar esta capacidad de fijación de cloruros. Los grupos funcionales del mucílago pueden formar enlaces iónicos con cationes como el Ca^{2+} , creando una red que atrapa o retiene iones cloruro, reduciendo su movilidad y concentración en las proximidades del acero de refuerzo [129].

Esta acción química va acompañada de un efecto físico importante: las partículas de mucílago no reaccionadas tienen a ubicarse dentro de la red de poros capilares, obstruyendo los canales de transporte de humedad y especies iónicas, dificultando así la migración de cloruros hacia el acero [116][127].

Este comportamiento se complementa con la presencia de celita, un compuesto derivado del C_3A , que no solo densifica la microestructura del cemento, sino que también incrementa su resistencia a la penetración de iones cloruro. El cemento Portland ordinario contiene de 7 a 15 % de celita, lo cual favorece la formación de una matriz menos porosa y más impermeable a compuestos agresivos [108]. Esta disminución en la permeabilidad también tiene una implicación directa en el alargamiento de vida útil de estructuras expuestas a condiciones severas.

Por otro lado, los mecanismos de transporte de cloruros dentro del concreto se rigen principalmente por procesos de difusión, es decir, el movimiento espontáneo de iones desde regiones de alta concentración hacia otras de menor concentración, en respuesta a un gradiente químico [127]. Este fenómeno puede verse intensificado en presencia de ciclos de humectación y secado, especialmente en zonas costeras o sometidas a lluvia intermitente, donde el agua transporta cloruros en forma disuelta que penetran por capilaridad o difusión. Durante los ciclos de secado, la evaporación del agua aumenta la concentración de cloruros en la superficie, generando gradientes aún más marcados que favorecen su ingreso [116][128].

La capacidad de retención de cloruros se ve además favorecida por la alta alcalinidad del sistema cementante. La presencia de óxidos alcalinos como Na_2O y K_2O eleva el pH de los poros, manteniéndolo en un intervalo de 12.5 a 13.9, lo cual estabiliza los productos de corrosión y mantiene la pasividad del acero. Esta pasividad se ve comprometida cuando se supera un umbral crítico de concentración de cloruros. Según diversos estudios, cuando el contenido total de cloruros supera el 0.7 % de la masa de cemento, o bien cuando los cloruros libres superan el 0.4 %, se inicia la corrosión del acero al carbono, aunque otros factores como la humedad relativa y el tiempo de exposición también influyen en la activación del proceso [108].

El mecanismo de fijación de cloruros en cementos ricos en C_3A , también implica la sustitución de iones sulfato inicialmente adsorbidos en la matriz. Los iones cloruro desplazan a los sulfatos, formando compuestos como el cloroaluminato de calcio, cuya naturaleza química inmoviliza los cloruros, impidiendo que permanezcan en estado libre. Esta reacción de sustitución es clave para reducir la difusión de cloruros hacia el interior de concreto y constituye uno de los mecanismos más efectivos de control frente a la corrosión inducida por cloruros [108][127].

Un parámetro adicional de gran relevancia es la relación agua-cemento (a/c), la cual define en buena medida la porosidad capilar del concreto. Una relación baja (por ejemplo, ≤ 0.45) conlleva una microestructura más densa, con menos conectividad de poros, lo que limita la penetración de agentes agresivos por difusión o succión capilar. Por el contrario, una relación alta favorece la formación de una red porosa más abierta, lo que incrementa el coeficiente de

difusión de cloruros y acelera los procesos de deterioro [108]. En consecuencia, el diseño adecuado de la mezcla, junto con el uso de aditivos como el mucílago y cementos ricos en C_3A , conforma una estrategia sinérgica para mejorar la durabilidad del concreto frente a condiciones hostiles.

En resumen, la combinación de mecanismos fisicoquímicos (desde la formación de sal de Friedel, la obstrucción de poros por el mucílago, la alcalinización del sistema y la sustitución iónica de sulfatos) permite no solo reducir la concentración de cloruros libres en el concreto, sino también retrasar de forma significativa la iniciación y propagación de la corrosión en el acero de refuerzo.

REFERENCIAS.

- [1] S. Rivero, B. Chico, D. de la Fuente, M. Morcillo, "Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del régimen de vientos", Revista de metalurgia, vol. 43, no. 5, pp. 370-383. 2007.
- [2] E. Bolaños-Rodríguez, L. D. López-León, M. A. Veloz-Rodríguez, V. E. Reyes-Cruz, G. Y. Vega-Cano, "Evaluación del comportamiento de un acero al carbono utilizado en tuberías para agua potable mediante espectroscopía de impedancia electroquímica y microscopía electrónica de barrido", Revista iberoamericana de ciencia, tecnología y sociedad, no. 164; pp. 593-599, 2010.
- [3] A. Gómez-Estévez, "Aplicación de subproductos y derivados de la agroindustria azucarera en el mantenimiento de la propia industria", ICIDCA, vol. XL, no. 2, pp. 2-9, 2006.
- [4] M. A. Anaya-Pérez, "History of the use of opuntia as forage in Mexico", FAO, Plant production and protection, Paper, no. 169, pp. 5-12, 2001.
- [5] J. L. Vicat, "Practical and Scientific treatise of calcareous mortars and cements, artificial and natural", Ed. John Weale, p. 350, pp. 43-64, 1837.
- [6] G. P. Bankart, "The art of the plasterer. An account of the decorative development of the craft", Ed. Blastford, p. 378, pp. 6-7, 1908.
- [7] R. L. Torres-Ponce, D. Morales-Corral, M. L. Ballinas-Casarrubias, G. V. Nevárez-Moorillón, "El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal", Revista mexicana de ciencia agrícolas, vol. 6, no. 5, pp. 1129-1142, 2015.
- [8] C. N. Aguilar, "Fitoquímicos sobresalientes del semidesierto mexicano. De la planta a los químicos naturales y a la biotecnología", Ed. Path Design, 579 p., 2008.
- [9] G. Muthuraman, S. Sasikala, "Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants", Journal of industrial and engineering chemistry, vol. 20, no. 4, pp. 1727-1731, 2014.

- [10] A. S. Monroy-Galicia, J. D. Salgado-López, “Extracción de mucílago de *Opuntia ficus-indica*, nopal, como potencial purificador de agua en comunidades rurales de Ahuachapan”, *Bioma*, no. 52, año 5, 2019.
- [11] K. P. Contreras-Lozano, Y. J. Aguas-Mendoza, G. Salcedo-Mendoza, R. Olivero-Verbel, G. P. Mendoza-Ortega, “El nopal (*Opuntia ficus indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua”, *Producción + limpia*, vol. 10, no. 1, pp. 40-50, 2015.
- [12] S. Chandra, L. Eklund, R. R. Villarreal, “Use of cactus in mortars and concrete”, *Cement and concrete research*, vol. 28, no. 1, pp. 41-51, 1998.
- [13] A. Torres, M. Martínez, "Plan nacional de evaluación de puentes dañados por corrosión. Parte 1: Discriminación preliminar de los puentes que muestran daños por corrosión", Instituto Mexicano del Transporte, Reporte 026/2002, 2002.
- [14] B. Chico, E. Otero, L. Mariaca, M. Morcillo, “La corrosión en atmósferas marinas. Efecto de la distancia a la costa”, *Revista de metalurgia*, vol. 34, no. extra, pp. 71-74, 1998.
- [15] A. Torres-Acosta, A. del Valle-Moreno, M. Martínez-Madrid, J. T. Pérez-Quiroz, M. Backhoff-Pohls, “Plan nacional de evaluación de puentes federales, libres de peaje, dañados por corrosión”, Parte 1: Discriminación preliminar de los puentes que muestran daños por corrosión, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica 327, 2010.
- [16] J. Cahuich, H. G. Heredia-Lanz, M. R. Sosa-Baz, P. Bartolo-Pérez, R. Orozco-Cruz, J. Reyes, T. Pérez, "SEM/EDS analysis of corrosion proces of industrial alloys in marine environment", *Acta microscópica*, vol. 23, no. 1, pp. 44-55, 2014.
- [17] H. R. Ambler, A. A. J. Bain, "Corrosion of metals in the tropics", *Journal of applied chemistry*, vol. 5, no. 9, pp. 437-467, 1955.
- [18] E. F. Hernández, H. Pfeiffer-Perea, P. F. De J. Cano-Barrita, “Influencia del mucílago de nopal y extracto de algas cafés en el grado de hidratación de pastas de cemento Portland ordinario”, *Nexo*, vol. 30, no. 02, pp. 73-83, 2017.

- [19] N. A. Pérez, D. Charua, S. Fernández, "Extracción y purificación del mucílago y goma de nopal para su uso en conservación", Estudios sobre conservación, restauración y museología, vol.2, pp. 156-166, 2015.
- [20] J. A. Reyes-Argüello, C. López-Palacios, M. E. Romero-Hernandez, H. H. Ramírez-Tobías, C. Michel-Cuello, "Polisacáridos estructurales y fibra dietética en brotes florales (tunitas) de *Nopalea Cochenillifera* (L.) Salm-Dick de diferente estadio de desarrollo", Agrociencia, vol. 53, no. 4, pp. 605-616, 2019.
- [21] S. Ramírez-Arellanes, P. F. J. Cano-Barrita, F. Julián-Caballero, C. Gómez-Yáñez, "Propiedades de durabilidad en concreto y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural", Materiales de construcción, vol. 62, pp. 327-341, 2012.
- [22] A. A. Torres-Acosta, W. Martínez-Molina, M. G. Lomelí-González, A. Pérez-Gallardo, "Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Insittuto Mexicano del Transporte, Publicación técnica no. 328, 2017.
- [23] J. Genescá, "Mas allá de la herrumbre III. Corrosión y medio ambiente", Fondo de cultura económica, 1ª. edición, 1994.
- [24] Durar, "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", CYTED, Ed. Trocónis, 3a. edición, pp. 88-92, 112-117, 1998.
- [25] F. Belenguer-Mula, F. C. de Mazarredo-Pampló, A. Osorio-Arijón, J. J. Palencia-Guillén, B. Serrano-Lanzarote, S. García-Prieto, "Guía para la inspección y evaluación preliminar de estructuras de hormigón en edificios existentes", Instiuto Valenciano de la edificación, pp. 67-72, 2005.
- [26] M. G. Fontana, "Corrosion engineering", 3a edición, Ed. McGraw-Hill, pp. 304-315, 1987.

- [27] C. Andrade, M. C. Alonso, J. A. González, "An initial effort to use the corrosion rate measurements for estimating rebar durability", Corrosion rates of steel in concrete, ASTM STP 1065, Ed. N.S. Berke, V. Chaker, D. Whiting, pp. 29-37, 1990.
- [28] D. Callister-William, "Material Science and engineering. An introduction", Departament of metallurgical engineering university of Utah, 5ta. Edicion, 1999.
- [29] Diario El Tiempo, "Miami, el Space y trágicos derrumbes de edificios alrededor del mundo", recuperado de <https://www.eltiempo.com/mundo/mas-regiones/tragicos-derrumbes-de-edificios-alrededor-del-mundo-599248>, 2021.
- [30] E. E. Husain, T. N. Tarayanan, J. J. Taha-Tijerina, S. Vinod, R. Vajtai, P. M. Ajayan, "Marine corrosion protective coatinds of hexagonal boron nitride thin films on stainless steel", ACS applied materials & interfaces, vol. 5, no. 10, pp. 4129-4135, 2013.
- [31] D. E. Castillo-Gutiérrez, I. I. Angarita-Moncaleano, R. Rodríguez-Baracaldo, "Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos", Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 26, no. 3, pp. 430-439, 2018.
- [32] A. Del Valle-Moreno, T. Pérez-López, M. Martínez-Madrid, "El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto armado", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Insituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica no. 182, 2001.
- [33] M. Aguirre-Cárdenas, P. García-Delgado, R. González-González, A. L. Jofre-Garfias, A. V. Legorreta-Siañez, J. F. Buenrostro-Zagal, "Desarrollo y evaluación de una película comestible obtenida del mucílago del nopal (*Opuntia ficus indica*) utilizada para reducir la tasa de respiración del nopal verdura", Revista de investigación de la Universidad Simón Bolívar, no. 10, pp. 1-5, 2011.
- [34] F. Mendez-Llorente, R. G. Ramírez-Lozano, J. I. Aguilera-Soto, C. F. Arechiga-Flores, "Performance and nutrient digestion of lambs fed incremental levels of wild cactus (*Opuntia leucotrichia*)", Journal of applied animal research, vol. 39, no. 3, pp. 248-251, 2011.

- [35] D. Granados-Sánchez, A. D. Castañeda-Pérez, "El nopal. Historia, fisiología, genética e importancia frutícola" Ed. Trillas, México, D. F., pp. 227, 2003.
- [36] O. Vázquez-González, "Extracción de coagulantes naturales de nopal y aplicación en la clarificación de agua superficiales", UANL, pp. 3-12, 1994.
- [37] F. Goycoolea, A. Cárdenas, "Pectins from *Opuntia* spp: a short review", Journal of the Professional Association for Cactus Development, no. 5, pp. 17-29, 2003.
- [38] Y. C. Rodríguez-Henao, "Evaluación del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) como agente estabilizante en néctar de maracuyá (*Passiflora edulis*)", Ciencia Unisalle, 2017.
- [39] E. N. Aquino-Bolaños, Y. Chavarría-Moctezuma, J. L. Chávez-Servia, R. I. Guzmán-Gerónimo, E. R. Silva-Hernández, I. Verdalet-Guzmán, "Caracterización fisicoquímica de siete variedades de tuna (*Opuntia* spp.) color rojo-violeta y estabilidad del pigmento de las dos variedades con mayor concentración", Investigación y ciencia, no. 55, pp. 3-10, 2012.
- [40] V. O. Oyenuga, "Design and construction of foundations (A practical approach)", Ed. Asros Ltd., Nigeria, 2004.
- [41] A. O. Emmanuel, F. A. Oladipo, O. Olabode, "Investigation of salinity effect on compressive strength of reinforced concrete", Journal of Sustainable Development, vol. 5, no. 6, pp. 74-82, 2012.
- [42] CEMEX, "Manual del constructor", Recuperado de <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>, 2021.
- [43] NMX-C-155-ONNCCE-2014. Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Dosificado en masa - Especificaciones y métodos de ensayo.
- [44] G. Hernández-Duque, J. Carpio, L. Martínez, T. Pérez, "Severe corrosion of a Gulf of Mexico bridge", Materials Performance, vol. 32, no. 12, 1994.
- [45] R. H. Bogue, W. Lerch, "Hydration of Portland cement compounds", Industrial and engineering chemistry, vol. 26, no. 8, 1993.

- [46] NOM-127-SSA1-2021. "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua".
- [47] NMX-C-122-ONNCCE-2019. Industria de la construcción - Agua para concreto - Especificaciones.
- [48] J. M. Miranda-Vidales, L. Narváez-Hernández, J. Moreno-Fraga, "Valoración inicial de las propiedades de la goma de nopal como posible aditivo en la conservación de edificaciones de adobe", Interview, vol. 113, no. 25, 2023.
- [49] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, "Sustainable cement production present and future", Cement and concrete research, vol. 41, no. 7, pp. 642–50, 2011.
- [50] K. Metha, P. Monteiro, "Concreto", Instituto mexicano del cemento y del concreto, A. C., 1a. Edición, 1998.
- [51] A. A. Velasco-Aquino, "Compressed earth block reinforced with coconut fibers and stabilized with aloe vera and lime", Journal of Engineering, Design and Technology, vol. 19, no. 3, 2020.
- [52] C. M. Hansson, "Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete", Cement and concrete research, vol. 14, no. 4, pp. 574–584, 1984.
- [53] R. J. Kessler, R. G. Powers, I. R. Lasa, "Cathodic protection using zinc sheet anodes and an ion conductive gel adhesive", NACE Corrosion Congress, Paper no. 234, 1997.
- [54] M. J. Chinchillas-Chinchillas, R. Corral-Higuera, S. P. Arredondo-Rea, J. M. V. Gómez-Soberón, "Análisis de imágenes del concreto permeable con agregados reciclados y humo de sílice; estudio experimental de sus propiedades físicas-mecánicas", Congreso internacional de ciencia de la ingeniería. Ponencias del II congreso internacional de ciencias de la ingeniería 2015, pp. 1-6, noviembre, 2015.
- [55] J. Elsen, "Microscopy of historic mortars — a Review", Cement and Concrete Research, vol. 36, no. 8, pp. 1416–1424, 2006.

- [56] J. C. Melgarejo, J. A. Proenza, S. Galí, and X. Llovet, "Técnicas de Caracterización Mineral y su Aplicación en Exploración y Explotación Minera," pp. 1–23, 2010.
- [57] C. A. Bedoya-Henao, J. I. Tobón, J. J. Monsalve-Valencia, C. Vanegas-Palacio, M. Valencia-Betancur, "Evaluación de patologías en el concreto usando microscopía óptica", Informador técnico, vol. 80, no. 2, pp. 142-150, 2016.
- [58] NMX-C-404-ONNCCE-2005, "Industria de la construcción - mampostería - bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural - Especificaciones y Métodos de ensayo", 2012.
- [59] NTC-5324, "Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega", 2004.
- [60] NMX-C-083-ONNCCE-2014, "Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes. Método de ensayo", 2020.
- [61] C. Alonso, C. Andrade, J. A. González, "Aproximación al efecto de la resistividad del hormigón en la corrosión de armaduras embebidas en hormigón", Materiales de construcción, vol. 37, no. 207, 1987.
- [62] C. Andrade, R. D'Andrea, "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y su durabilidad", Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, vol. 1, no. 2, pp. 93-101, 2011.
- [63] NMX-C-514-ONNCCE-2016. Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Durabilidad - Determinación de la profundidad de carbonatación en concreto hidráulico - Especificaciones y método de ensayo.
- [64] W. Aperador, J. H. Bautista-Ruiz, A. E. Delgado, "Monitoreo de la corrosión de aceros embebidos en concretos obtenidos a partir de subproductos industriales", Información tecnológica, vol. 24, no. 4, pp. 55-66, 2013.

- [65] Y. Díaz-Blanco, C. Menchaca-Campos, C. I. Rocabrúno-Valdés, J. Uruchurtu-Chavarrín, "Influencia de un aditivo natural (mucílago de nopal) en las propiedades electroquímicas del acero de refuerzo del concreto", *ALCONPAT*, vol. 9, no. 3, pp. 260-276, 2019.
- [66] C. Andrade, M. Keddám, X. R. Nóvoa, M. C. Pérez, C. M. Rangel, H. Takenouti, "Electrochemical behaviour of steel rebars in concrete: influence of environmental factors and cement chemistry", *Electrochimica Acta*, vol. 46, no. 24-25, pp. 3905–3912, 2001.
- [67] C. Andrade, C. Alonso, J. Gulikers, R. Polder, R. Cigna, O. Vennesland, M. Salta, A. Raharirainivo, B. Elsener, "Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method", *Materials and structures/Materiaux et Constructions*, vol. 37, no. 273, pp. 623–643, 2004.
- [68] M. A. Pech-Canul, P. Castro, "Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere", *Cement and concrete research*, vol. 32, no. 3, pp. 491–498, 2002.
- [69] M. Y. Díaz-Cardenas, M. G. Valladares-Cisneros, S. Lagunas-Rivera, V. M. Salinas-Bravo, R. Lopez-Sesenes, J. G. Gonzalez-Rodríguez, "Peumus boldus extract as corrosion inhibitor for carbon steel in 0.5 M sulfuric acid", *Green chemistry letters and reviews*, vol. 10, no. 4, pp. 257–268, 2017.
- [70] H. Majdoub, S. Roudesli, A. Deratani, "Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Puntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behavior", *Polymer International*, vol. 50, no. 5, pp. 552-560, 2001.
- [71] A. A. Torres-Acosta, M. Martínez-Madrid, "Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica no. 181, 2001.
- [72] J. M. Miranda, E. Otero, J. A. González, "Reflexiones sobre los métodos electroquímicos de rehabilitación de las estructuras corroídas de hormigón armado", *Revista de metalurgia*, vol. ext., pp. 274-278, 2005.

- [73] R. G. Solís-Carcaño, E. I. Moreno, P. Castro-Borges, "Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera", *Ingeniería*, vol. 9, no. 1, pp. 13-18, 2005.
- [74] E. I. Moreno, F. Ayuso-Blanco, A. A. Torres-Acosta, O. Troconis-Rincón, "Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (proyecto DURACON)", *Ingeniería*, vol. 13, no. 3, pp. 53-60, 2009.
- [75] J. González-Masís, L. Garita-Arce, "Evaluación de la velocidad de corrosión del acero al carbón mediante técnicas electroquímicas", *Tecnología en marcha*, vol. 27, no. 1, pp. 13-22, 2013.
- [76] R. Vera, J. Román, M. Puentes, M. Bagnara, A. M. Carvajal, P. Rojas, "Efecto de la difusión del ion cloruro en el comportamiento de acero galvanizado en estructuras de hormigón armado. Resultados preliminares", *Revista de la construcción*, vol. 12, no. 1, pp. 30-40, 2013.
- [77] W. Martínez-Molina, E. M. Alonso-Guzmán, A. A. Torres-Acosta, "Physical properties of cement-based paste and mortar with dehydrated cacti additions", *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 9, no. 4, pp. 443-452, 2014.
- [78] G. Maki-Díaz, C. B. Peña-Valdivia, R. García-Nava, M. L. Arévalo-Galarza, G. Calderón-Zavala, S. Anaya-Rosales, "Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional", *Agrociencia*, vol. 49, no. 1, pp. 31-51, 2015.
- [79] L. Vargas-Rodríguez, C. Arroyo-Figueroa, C. H. Herrera-Méndez, A. Pérez-Nieto, M. I. García-Vieyra, J. R. Rodríguez-Núñez, "Propiedades físicas del mucílago de nopal", *Acta Universitaria, Fotónica y Óptica*, vol. 26, no. 1, pp. 8-11, 2016.
- [80] A. R. Campos-Silva, G. Fajardo, J. M. Mendoza-Rangel, "Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado", *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, vol. 8, no. 1, 2016.
- [81] J. Genescá, J. Mendoza, "Mas allá de la herrumbre. La lucha contra la corrosión", *Research Gate*, 3ª. Edición, 2017.

- [82] E. F. Hernández, H. Pfeiffer Perea, P. F. Cano Barrita, "Influencia del mucílago de nopal y extracto de algas café en el grado de hidratación de pastas de cemento Portland ordinario", *Nexo*, vol. 30, no. 02, pp. 73-83, 2017.
- [83] A. Hazarika, I. Mazarika, M. Gogoi, S. Shaya-Bora, R. Rekha-Borah, P. Jyoti-Soutam, N. Saikia, "Use of a plant based polymeric-material as a low cost chemical admixture to cement mortar and concrete preparations", *Journal of Buildings Engineering*, vol. 15, pp. 194-202, 2018.
- [84] A. Royani, S. Prifiarni, L. Nuraini, G. Ptriyyotomo, Sundjono, I. Purawiardi, H. Gunawan, "Corrosion of carbon steel after exposure in the river of Sukabumi, West Java", *Material Science and Engineering*, no. 541, 2019.
- [85] E. J. Suárez-Domínguez, E. Arvizu-Sánchez, J. F. Pérez-Sánchez, E. F. Izquierdo-Kulich, "Effect of a gelatinous media in concrete setting: I. Changes in surface morphology model", *International Journal of Mathematics Trends and Technology (IJMTT)*, vol. 66, no. 5, pp. 160-166, 2020.
- [86] K. Je-Kyoung, S. H. Kee, C. M. Futralan, J. J. Yee, "Corrosion monitoring of reinforced steel embedded in cement mortar under wet-and-dry cycles by electrochemical impedance spectroscopy", *Sensors*, vol. 20, 2020.
- [87] R. R. Gallegos-Villela, F. D. Larrea-Zambrano, C. E. Goyes-López, J. F. Perez-Sánchez, E. J. Suárez-Domínguez, A. Palacio-Pérez, "Effect of natural additives on concrete mechanical properties", *Cogent Engineering*, vol. 8, no. 1, 2021.
- [88] E. Bachtiar, F. Rachim, R. Makbul, A. Tata, M. Irfan-Ul-Hassan, M. Serkan-Kirgiz, M. Syarif, A. G. de Sousa-Galdino, A. Khitab, O. Benkeddou, K. G. Kolovos, E. Fernández-Ledesma, A. Yusri, S. Papatzani, "Monitoring of chloride and Friedel's salt, hydration components, and porosity in high-performance concrete", *Case studies in construction materials*, vol. 17, pp. 1-22, 2022.

- [89] X. Yong, Y. Huang, F. Cai, Z. Wang, D. Lu, X. Wang, L. Yang, "Evaluation of hydrogen permeation into high-strength steel during corrosion in different marine corrosion zones", *Applied Sciences*, no. 12, 2022.
- [90] D. A. Lorika, B. Hamad, A. Yehya, D. A. Salam, "Evaluating the use of mucilage from opuntia ficus-indica as a bio-additive in production of sustainable concrete", *Construction and building materials*, no. 396, 2023.
- [91] L. Pattusamy, M. Rajendran, S. Shanmugamoorthy, K. Ravikumar, "Confinement effectiveness of 2900 psi concrete using the extract of Euphorbia tortilis cactus as a natural additive", *Revista Materia*, vol. 28, no. 1, 2023.
- [92] F. A. Valenzuela-Zapata, L. F. Treviño-Martínez, R. E. Vázquez-Alvarado, D. Paniagua-Vega, A. J. Garza-Juárez, P. G. Silva-Flores, "Extracción de mucílago, evaluación de la actividad antioxidante y el contenido total de fenoles de cuatro variedades de Opuntia ficus-indica", *Tecnociencia Chihuahua*, vol. 18, no. 2, 2024.
- [93] H. Zhang, H. Liu, F. Chen, Y. Luo, X. Xiao, Y. Deng, N. Lu, Y. Liu, "Microscopic characteristics and corrosion rate modeling in galvanized high-strength steel wires", *Journal of materials research and technology*, vol. 33, no. 8, pp. 6234-6250, 2024.
- [94] V. J. Pérez-Benites, J. R. Minjares-Fuentes, J. J. Martínez-García, J. G. Baez-González, M. G. Candelas Cadillo, "Composición química, propiedades físicas y reológicas del mucílago de Aloe barbadensis Miller", *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, vol. 4, 2019
- [95] NMX-C-155-ONNCCE-2014. Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Dosificado en masa - Especificaciones y métodos de ensayo.
- [96] NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la construcción - Agregados - Masa volumétrica - Método de prueba.
- [97] NMX-C-166-ONNCCE-2006. Industria de la construcción - Agregados - Contenido de agua por secado - Método de prueba.

- [98] NMX-C-077-ONNCCE-2004. Industria de la construcción - Agregados - Análisis granulométrico - Método de ensayo.
- [99] NMX-C-165-ONNCCE-2014. Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - Método de ensayo.
- [100] NMX-C-164-ONNCCE-2014. Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso.
- [101] NMX-C-156-ONNCCE-2010. Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Determinación del revenimiento en el concreto fresco.
- [102] NMX-C-109-ONNCCE-2013. Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Cabeceo de especímenes.
- [103] NMX-C-036-ONNCCE-2013. Mampostería - Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines - Método de ensayo.
- [104] F. Delgado-Arroyo, U. León-Silva, R. Saldívar-Guerrero, J. M. Huacuz-Villamar, "Eliminación de humedad en aceites minerales aislantes mediante un residuo resinoso de *Opuntia ficus-indica*", Revista internacional de investigación e innovación tecnológica, vol. 6, no. 33, pp. 1-11, 2018.
- [105] D. A. Skoog, F. J. Holler, S. R. Crouch, "Principios de análisis instrumental", Ed. CENGAGE Learning, México, D. F., 6a. Edición, pp. 459-465, 2008.
- [106] F. Lopez-García, C. Jiménez-Martínez, D. Guzmán-Lucero, A. Maciel-Cerda, R. Delgado-Macuil, D. Cabrero-Palomino, E. Terres-Rojas, I. Arzate-Vazquez, "Physical and chemical characterization of a biopolymer film made with corn starch and nopal xocconostle (*Opuntia Joconsotle*) mucilage", Revista mexicana de ingeniería química, vol. 16, no. 1, pp. 147-158, 2017.
- [107] C. M. Pereira-Souza, F. Silva-Almeida, V. F. Veiga, B. P. Goulart de Lima Damasceno, A. C. Dantas-Medeiros, D. Pereira-Santana, J. A. Silva, "Characterization of atomized

extract of *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. and assessment of its pharmaceutical potential”, *Journal of basic and applied pharmaceutical sciences*, vol. 35, no. 2, pp. 195-203, 2014.

[108] R. Vera, J. Roma, M. Puenes, M. Bagnara, A. M. Carvajal, P. Rojas, “Effect of chloride ion diffusion in the behavior of reinforced concrete structures with galvanized steel. Preliminary results”. *Revista de la construcción*. 2013, vol. 12, no. 1, pp.30-40.

[109] A. A. Torres-Acosta, P. Y. González-Calderón, “*Opuntia ficus indica* (OFI) mucilage as corrosion inhibitor of steel in CO₂-contaminated mortar”. *Materials*. 2021, vol. 14.

[110] A. A. Torres-Acosta, L. A. Díaz-Cruz, “Concrete durability enhancement from nopal (*Opuntia ficus-indica*) additions”, *Construction and building materials*, vol. 243, 2020.

[111] A. Mandujano-Ruiz, J. Morales-Hernández, H. Herrera-Hernández, L. E. Corona-Almazán, J. M. Juárez-García, "Evaluación del comportamiento electroquímico del extracto de nopal (*Opuntia ficus-indica*) como posible inhibidor de corrosión", *Revista metalurgia*, vol. 52, no. 4, 2017.

[112] L. Cáceres, T. Vargas, L. Herrera, "Influence of pitting and iron oxide formation during corrosion of carbon steel in unbuffered NaCl solutions", *Corrosion science*, vol. 51, pp. 971-978, 2009.

[113] A. Cedeño, “Conducta del concreto reforzado bajo el efecto de diferentes microclimas”, *Revista de I + D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, 2021.

[114] O. Hernández, C. J. Mendoza, “Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico”, *Ingeniería y Tecnología*, vol. 17, no. 1, 2006.

[115] T. Moragues, “Proceso de hidratación del cemento Portland microestructura del hormigón, ataque de ácidos” ETSI, Caminos, canales y puertos, 2013.

[116] R. Corral, S. Arredondo, J. Almaral, J. Gómez, “Corrosión por cloruros del acero de refuerzo embebido en concreto con agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios”, *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 28, no. 1, 2013.

- [117] A. E. Landa-Gómez, G. Fajardo, D. Cruz-Moreno, R. Orozco-Cruz, R. Galván-Martínez, “Materiales cementantes suplementarios como alternativas para la disminución del fenómeno de corrosión en estructuras de concreto reforzado”, *Nova Scientia*, vol. 14, no. 29, pp. 1-15, 2022.
- [118] M. Giraldo, J. Tobón, “Evolución mineralógica del cemento Portland durante el proceso de hidratación”, *Dyna*, vol. 73, no. 148, pp. 69-81, 2006.
- [119] R. W. Revie, H. H. Uhlig, “Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering”, 4th edition, 2008.
- [120] M. Bethencourt, F. J. Botana, L. González, J. M. Sánchez, “Medida de ruido electroquímico para el estudio de procesos de corrosión de aleaciones metálicas”, *Revista de metalurgia*, vol. 42, no. 2, pp. 145-147, 2009.
- [121] V. Asadi, I. Danaee, H. Eskandari, S. Nikmanesh, “Electrochemical studies on corrosion resistance of phosphate chemical conversion coatings on low carbon Steel API 5L grade B”, *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 147-153, 2018.
- [122] W. B. Wan, F. Zulkifki, M. M. Rahman, R. Rosliza, “Corrosion behavior of mild steel in seawater from two different sites of Kuala Terengganu coastal area”, *International journal of basic & applied sciences*, vol. 11, no. 06, 2011.
- [123] R. Arriaga, J. Malo, G. Tres, J. Uruchurtu, “Monitoreo por ruido electroquímico de la corrosión del acero en una atmósfera contaminada”, *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 17, no. 4, pp. 172-173. 2001.
- [124] P. X. Rodríguez-Barbosa, V. Varela-Guerrero, M. F. Ballesteros-Rivas, G. Martínez-Barrera, “Mucílago de nopal y sus diversas aplicaciones”, *Revista académica de la facultad de ingeniería*, vol. 28, no. 3, 2024.
- [125] D. Shanmugave, T. Selvaraj, R. Ramadoss, S. Raneri, “Interaction of a viscous biopolymer from cactus extract with cement paste to produce sustainable concrete”, *Construction building materials*, vol. 257, 2020.

- [126] A. Aquilina, R. Borg, J. Buhagiar, “The application of natural organic additives in concrete: *Opuntia ficus indica*”, IOP conference series: materials science and engineering, vol. 442, pp. 1-9, 2018.
- [127] M. A. Climent, A. Tavares-Guimaraes, V. Millano, “Recomendaciones sobre difusión de cloruros”, ALCONPANT, no. 7, 2020.
- [128] C. Tejada-Tovar, A. Villabona-Ortiz, Y. P. Villabona-Durán, “Modelo de difusión de cloruros en probetas cilíndricas”, ION, vol. 26, no. 1, pp. 55-62, 2013.
- [129] E. Luna-Zapién, J. A. Zegbe, J. A. Meza-Velázquez, R. Minjares-Fuentes, “Mucílago de nopal (*Opuntia* spp.) y su aplicación como aditivo alimentario, una visión general”, Fitotecnica Mexicana, vol. 46, no. 1, pp. 51-61, 2023.