



**Evaluación del desempeño anticorrosivo de recubrimientos en
acero de refuerzo expuesto a ambientes marinos, bajo un enfoque
de durabilidad y sustentabilidad**

T E S I S

Para obtener el título de

Licenciada en Ingeniería Civil

Presenta

Karla Janeth Leyva Hernández

Director de tesis:

Dr. Iván Erick Castañeda Robles

Co-Directora:

M. C. Valeria Volpi León

Mineral de la Reforma, Hidalgo.

Febrero 2026





Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 10 de marzo de 2026

Número de control: ICBI-D/371/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Karla Janeth Leyva Hernández**, quien presenta el trabajo de titulación **"Evaluación del desempeño anticorrosivo de recubrimientos en acero de refuerzo expuesto a ambientes marinos, bajo un enfoque de durabilidad y sustentabilidad"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Luis Daimir López León

Secretario: Mtra. Valeria Volpi León

Vocal: Dr. Iván Erick Castañeda Robles

Suplente: Dr. Francisco Javier Olguín Coca

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, Javier, por ser el pilar fundamental en mi vida y el principal impulsor de este logro. Su apoyo incondicional, su esfuerzo constante y su confianza en mí han sido la base que me permitió culminar esta etapa. A él le debo no solo la oportunidad de estudiar, sino también la fortaleza para no rendirme.

A mi madre, Minerva, quien, a pesar de la distancia, nunca dejó de estar presente. Su amor, sus palabras de aliento y su compañía, siempre oportuna, fueron un refugio en los momentos más desafiantes. Gracias por enseñarme que la cercanía no siempre se mide en kilómetros, sino en el cariño y el apoyo constante.

A mis perritas, Sam y Negra, por ser mi compañía más fiel durante este camino. En cada día de esfuerzo, desvelo y dedicación, su presencia llenó de calma y alegría los momentos más difíciles.

A mis hermanos y amigos, por su apoyo sincero, por su paciencia y por acompañarme a lo largo de esta etapa. Gracias por cada palabra de ánimo, por escucharme y por recordarme, incluso en los días complicados, que era capaz de lograrlo.

A mi profesor, Erick Castañeda, por su valiosa guía y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Su confianza en mis aptitudes y habilidades fue un impulso constante para superarme, y su apoyo académico fue clave para la culminación de este proyecto.

RESUMEN

La corrosión por cloruros es una de las principales causas de deterioro en estructuras de acero en la industria civil, en particular en ambientes marinos o con sales de deshielo. Los iones cloruro penetran el material o a través de poros en el concreto que embebe los aceros, destruyen la capa pasivadora del acero y causan corrosión localizada (picaduras), lo que genera expansión, grietas y desprendimiento del concreto, reduciendo severamente la vida útil, lo cual queda directamente relacionado con incrementos a los costos de mantenimiento y rehabilitación, y además genera impactos ambientales referente al consumo de materiales, energía y generación de residuos.

La investigación que se expone en este trabajo presenta la formulación y evaluación de recubrimientos anticorrosivos que representan alternativas de solución, actuando como barrera física y química que limitan el ingreso de agentes agresivos y contribuyen a prolongar la vida útil de los aceros expuestos a condiciones severas de exposición ambiental costera.

Se evaluaron de manera objetiva, cuantificable y reproducible el desempeño de sistemas de recubrimiento formulados REC1 y REC2 a base de residuos sólidos de silicona y solvente aplicados a acero al carbón (Grado 42) por inmersión en una solución de 3.5% p/p de NaCl, y evaluados por técnicas electroquímicas ampliamente reconocidas en el estudio de la corrosión, tales como la medición del potencial de corrosión, las curvas de polarización y la espectroscopía de impedancia electroquímica; todas las evaluaciones fueron comparadas con un acero sin recubrimiento, así como análisis químico y micrografías para evaluación superficial.

Los resultados de las exposiciones presentan una protección significativa para el recubrimiento REC1 propuesto, respaldado por la visualización de la superficie sin presentación de daños. En contraste, el recubrimiento REC2 el cual presentó menor desempeño, asociado a la presencia de defectos, porosidad y baja adherencia del recubrimiento. En este contexto, se propone el aprovechamiento

de la silicona (polímeros organosilícicos) como componente funcional dentro del sistema de recubrimiento en ambientes marinos.

Palabras clave: Corrosión; concreto armado; ambiente marino; cloruros; recubrimiento.

ABSTRACT

Chloride-induced corrosion is one of the main causes of deterioration in steel structures in the civil engineering industry, particularly in marine environments or those exposed to deicing salts. Chloride ions penetrate the material or pass through pores in the concrete that encases the steel, breaking down the passive layer and causing localized corrosion (pitting). This leads to expansion, cracking, and spalling of concrete, severely reducing service life. This degradation is directly associated with increased maintenance and rehabilitation costs, as well as environmental impacts related to material consumption, energy use, and waste generation.

The research presented in this work focuses on the formulation and evaluation of anticorrosive coatings as alternative solutions, acting as both physical and chemical barriers that limit the ingress of aggressive agents and contribute to extending the service life of steel exposed to severe coastal environmental conditions.

The performance of coating systems REC1 and REC2, formulated using silicone solid waste and solvent, was evaluated in an objective, quantifiable, and reproducible manner. These coatings were applied to carbon steel (Grade 42) and tested by immersion in a 3.5% w/w NaCl solution. Their performance was assessed using widely recognized electrochemical techniques in corrosion studies, such as corrosion potential measurements, polarization curves, and electrochemical impedance spectroscopy. All evaluations were compared with uncoated steel, complemented by chemical analysis and surface micrography.

The exposure results show that the proposed REC1 coating provided significant protection, supported by the observation of surfaces without visible damage. In contrast, the REC2 coating exhibited the lowest performance, associated with the presence of defects, porosity, and poor

adhesion. In this context, the use of silicone (organosilicon polymers) is proposed as a functional component in coating systems for marine environments.

Keywords: Corrosion; reinforced concrete; marine environment; chlorides; coating.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Contexto de la corrosión en concretos: ambientes marinos	16
1.3 Importancia del control de la corrosión en la ingeniería civil	17
1.4 Justificación de la investigación.....	18
1.5 Objetivos de la investigación	21
1.5.1 Objetivo general	21
1.5.2 Objetivos específicos	21
1.6 Hipótesis de trabajo	22
1.7 Alcances de la investigación.....	22
1.8 Alcances y limitaciones ambientales.....	23
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	24
2.1 Concreto armado	24
2.2 Concreto armado en ambientes marinos.....	25
2.2.1 Zonas de Exposición	25
2.3 Fuentes y mecanismos de ingreso de cloruros	27
2.4 Corrosión del acero de refuerzo	29
2.4.1 Mecanismos electroquímicos.....	31
2.4.2 Corrosión por cloruros	32
2.5 Técnicas electroquímicas para evaluación de la corrosión	34
2.5.1 Potencial de Circuito Abierto	34
2.5.2 Resistencia a la Polarización Lineal	34
2.5.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	36
2.5.4 Polarización Potenciodinámica Cíclica	42
2.6 Métodos de protección contra la corrosión en concreto armado	45
2.6.1 Métodos constructivos y diseño.....	47
2.6.2 Recubrimientos anticorrosivos.....	48
2.7 Recubrimientos orgánicos e inorgánicos	50

2.7.1 Función técnica del silicón	53
2.7.2 Implicaciones ambientales del uso de polímeros inorgánicos	56
2.8 Uso de solventes en sistemas de recubrimiento.....	57
2.8.1 Función técnica del thinner	60
2.8.2 Implicaciones ambientales del uso de solventes	61
2.9 Sustentabilidad y durabilidad en infraestructura costera	64
2.10 Estado del arte y vacíos de conocimiento	66
CAPÍTULO 3. MARCO NORMATIVO Y AMBIENTAL	68
3.1 Normatividad para corrosión y recubrimiento	68
3.1.1 Normas ISO aplicables.....	69
3.1.2 Normas ASTM aplicables	70
3.2 Normatividad para concreto en ambientes marinos.....	72
3.3 Regulación ambiental relacionada con solventes	72
3.3.1 Gestión de residuos peligrosos	73
3.4 Revalorización de solventes y economía circular	74
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	75
4.1 Diseño de la investigación	75
4.2 Materiales empleados	78
4.2.1 Acero de refuerzo	78
4.2.2 Recubrimientos anticorrosivos.....	80
4.3 Equipo de medición	81
4.3.1 Potenciometro/Galvanostato	82
4.3.2 Software EC-Lab	83
4.3.3 Electrodo de referencia	84
4.4 Preparación de especímenes y aplicación de recubrimiento	85
4.5 Simulación de ambiente marino	87
4.6 Configuración experimental y técnicas electroquímicas.....	90
4.7 Variables de estudio.....	96
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	98
5.1 Potencial de circuito abierto	98
5.2 Resistencia a la polarización lineal.....	101
5.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica.....	106
5.4 Polarización potenciodinámica cíclica (CPP) y pendientes de Tafel	116

5.5 Comparación del desempeño de recubrimientos	121
5.5.1 Influencia de los recubrimientos en la integridad del acero	122
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN	128
6.1 Análisis del comportamiento anticorrosivo en ambiente marino.....	128
6.2 Relación entre desempeño electroquímico y durabilidad	129
6.3 Discusión ambiental del uso de thinner y silicón	129
6.4 Implicaciones para la ingeniería civil costera	131
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
7.1 Conclusiones generales	131
7.2 Conclusiones ambientales	132
7.3 Recomendaciones técnicas para infraestructura en ambientes marinos.....	133
7.4 Recomendaciones para trabajos futuros	133
REFERENCIAS.....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Riesgo de corrosión en estructuras marítimas según su ubicación	27
Figura 2. Esquema del proceso electroquímico de corrosión del acero de refuerzo en hormigón ..	30
Figura 3. Representación esquemática de la corrosión por picaduras inducida por cloruros	33
Figura 4. Representación del diagrama de Nyquist para el circuito equivalente de Randles	38
Figura 5. Diagrama de Bode (Impedancia contra frecuencia en un circuito simple)	40
Figura 6. Diagrama de Bode (Ángulo de fase contra frecuencia en un circuito simple)	40
Figura 7. Circuito eléctrico equivalente para simular la corrosión del acero en ambientes salinos .	41
Figura 8. Análisis de Tafel con las regiones lineales identificadas en el área sombreada, y líneas en ángulo que indican regresiones lineales	45
Figura 9. Varilla corrugada $\frac{3}{8}$ " grado 42	79
Figura 10. Especímenes de recubrimiento REC1 (color verde) y REC2 (color amarillo).....	87
Figura 11. Sistema experimental para exposición de especímenes.....	88
Figura 12. Ejemplo de un circuito eléctrico equivalente simulado en EC-Lab	94
Figura 13. Evolución del potencial a circuito abierto en función del tiempo para las varillas evaluadas: sin recubrimiento, con recubrimiento REC1 y con recubrimiento REC2.	98
Figura 14. Evolución de la densidad de corriente de corrosión (icorr) en función del tiempo para las varillas evaluadas: sin recubrimiento, con recubrimiento REC1 y con recubrimiento REC2.	100
Figura 15. Respuesta de polarización lineal para la varilla sin recubrimiento en solución de NaCl al 3.5% p/p, evaluada en diferentes tiempos de exposición.....	102
Figura 16. Respuesta de polarización lineal para la varilla con recubrimiento REC1 en solución de NaCl al 3.5% p/p, evaluada en diferentes tiempos de exposición.	103
Figura 17. Respuesta de polarización lineal para la varilla con recubrimiento REC2 en solución de NaCl al 3.5% p/p, evaluada en diferentes tiempos de exposición.	104
Figura 18. Comparativa de la respuesta de la resistencia a la polarización lineal para las tres condiciones en solución de NaCl al 3.5% p/p, evaluada el día 20 de exposición.....	105
Figura 19. Evaluación de la impedancia electroquímica (diagrama de Nyquist) para varilla sin recubrimiento en solución de NaCl al 3.5% p/p.....	107
Figura 20. Evaluación de la impedancia electroquímica (diagrama de Nyquist) para varilla con recubrimiento REC1 en solución de NaCl al 3.5% p/p.....	108
Figura 21. Evaluación de la impedancia electroquímica (diagrama de Nyquist) para varilla con recubrimiento REC2 en solución de NaCl al 3.5% p/p.....	109
Figura 22. Comparación de los diagramas de Nyquist para las tres condiciones en solución de NaCl al 3.5% p/p. al día 20 de exposición.	110
Figura 23. Diagramas de Bode (izquierda módulo de impedancia y derecha ángulo de fase VS frecuencia) de la varilla sin recubrimiento en solución de NaCl al 3.5% p/p.	111
Figura 24. Diagramas de Bode (izquierda módulo de impedancia y derecha ángulo de fase VS frecuencia) de la varilla con recubrimiento REC1 en solución de NaCl al 3.5% p/p.....	112

Figura 25. Diagramas de Bode (izquierda módulo de impedancia y derecha ángulo de fase VS frecuencia) de la varilla con recubrimiento REC2 en solución de NaCl al 3.5% p/p.....	113
Figura 26. Curvas de polarización para varillas con diferentes sistemas de recubrimiento en solución de NaCl al 3.5% p/p.....	117
Figura 27. Varilla de acero corrugado sin recubrimiento antes de la exposición.....	122
Figura 28. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC1 antes de la exposición.	122
Figura 29. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC2 antes de la exposición.	123
Figura 30. Varilla de acero corrugado sin recubrimiento en el día 7 de exposición.....	123
Figura 31. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC1 en el día 7 de exposición.	124
Figura 32. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC2 en el día 7 de exposición.	125
Figura 33. Varilla de acero corrugado sin recubrimiento en el día 20 de exposición.	125
Figura 34. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC1 en el día 20 de exposición.	126
Figura 35. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC2 en el día 20 de exposición.	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de recubrimientos inorgánicos para acero de refuerzo	52
Tabla 2. Composición de thinner. Adaptado de Identificación del riesgo ambiental en el manejo de thinner estándar en una fábrica de muebles. (Razo, 2025), Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.	60
Tabla 3. Especificaciones Técnicas Varilla Corrugada 3/8" (No. 3). Elaboración propia con información recopilada de normas técnicas y literatura especializada (ASTM A615/A615M; NMX-B-457-CANACERO).	79
Tabla 4. Composición química del acero de refuerzo. Elaboración propia con información recopilada de normas técnicas y literatura especializada (ASTM A615/A615M; NMX-B-457-CANACERO).	79
Tabla 5. Formulación de los recubrimientos evaluados.....	80
Tabla 6. Resistencia total del sistema (R) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.	114
Tabla 7. Resistencia del recubrimiento (R_{cp}) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.	114
Tabla 8. Resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.	114
Tabla 9. Capacitancia del recubrimiento (C_{cp}) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.	115
Tabla 10. Capacitancia del recubrimiento (C_{dl}) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.	115
Tabla 11. Parámetros utilizados para el ajuste de las pendientes de Tafel para los diferentes recubrimientos.	119

**“Evaluación del desempeño anticorrosivo de recubrimientos en
acero de refuerzo expuesto a ambientes marinos, bajo un
enfoque de durabilidad y sustentabilidad”**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria de la construcción depende profundamente del concreto armado como su sistema estructural predilecto. Esta preferencia no es casualidad; su versatilidad, sólidas propiedades mecánicas y una relación costo-beneficio competitiva lo convierten en el estándar para el desarrollo de infraestructura global. Sin embargo, la durabilidad de este sistema no es absoluta, sino que está intrínsecamente ligada a las condiciones del entorno donde se emplaza. En entornos críticos como las zonas marinas, la estructura se enfrenta a una exposición constante a iones de cloruro, los cuales actúan como el principal detonante de la corrosión electroquímica, degradando tanto el acero de refuerzo como la matriz de concreto que lo protege (Torobeo & Tenorio, 2021).

El impacto de este fenómeno no es meramente estético. Cuando el acero comienza a corroerse, la formación de productos expansivos genera presiones internas que derivan en fisuras, desprendimientos del recubrimiento y una pérdida crítica de la adherencia entre el metal y el concreto. Estas patologías no solo comprometen la seguridad estructural y acortan la vida útil de diseño, sino que además disparan los costos económicos y ambientales asociados al mantenimiento y la rehabilitación (Torres et al., 2006).

Ante este escenario, surge la necesidad de implementar estrategias de protección más eficientes, destacando el uso de recubrimientos anticorrosivos como una de las soluciones más viables. Bajo esta premisa, la presente investigación evalúa un sistema de recubrimiento de silicón modificado mediante la reutilización de thinner, diseñado para actuar como una barrera física que limite el ingreso de agentes agresivos. El propósito central es estudiar cómo esta capa protectora logra mantener la pasividad del acero, reduciendo la densidad de corriente de corrosión y elevando la resistencia a la polarización, incluso bajo la presión constante de un ambiente saturado de cloruros (Castro, 1995).

No obstante, la originalidad de este trabajo reside en que la protección técnica se entrelaza con un firme compromiso ambiental. Al utilizar thinner recuperado para la dilución del silicón, el proyecto no solo busca mitigar la corrosión, sino también proponer una alternativa de gestión para desechos químicos industriales. De este modo, la investigación transita desde la eficiencia electroquímica hacia una ingeniería sostenible, donde la prolongación de la vida útil de las estructuras y la reducción de intervenciones de mantenimiento se alinean directamente con los principios de la economía circular.

1.1 Planteamiento del problema

Las estructuras de concreto armado situadas en entornos costeros enfrentan un desafío crítico de durabilidad debido a su interacción con el medio ambiente. La exposición constante a ambientes marinos facilita la penetración de agentes agresivos, principalmente iones de cloruro, a través de la red porosa del concreto; una vez que estos alcanzan el acero de refuerzo, rompen su capa pasiva y desencadenan procesos de corrosión electroquímica de alta severidad (Torres Acosta, 2001). Este fenómeno no es menor: la pérdida de sección transversal del acero y la formación de productos de corrosión expansivos generan presiones internas que derivan en el fisuramiento y desprendimiento del recubrimiento, comprometiendo severamente la integridad y la capacidad de carga de la estructura (Tuutti, 1982). Como resultado, la corrosión se mantiene como la causa principal de fallas prematuras en la infraestructura costera, lo que subraya la urgencia de desarrollar recubrimientos anticorrosivos que logren mitigar la velocidad de este proceso y prolongar la vida útil de las obras.

Sin embargo, la búsqueda de soluciones técnicas para la infraestructura no puede ignorar el impacto ambiental de los materiales empleados en su protección. En este contexto, el manejo de solventes industriales, como el thinner, representa una problemática ambiental creciente. A pesar de su uso extendido como agente de limpieza y diluyente, su disposición final suele carecer de una gestión

rigurosa, lo que contraviene normativas sobre residuos peligrosos debido a su alta volatilidad y toxicidad (SEMARNAT, 2005; GHS, 2015). La falta de protocolos de recuperación deriva frecuentemente en prácticas inadecuadas de desecho, convirtiendo a estos solventes en pasivos ambientales que representan un riesgo latente tanto para los mantos acuíferos como para la salud humana por la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV).

Ante la convergencia de estos dos escenarios, la vulnerabilidad de la infraestructura marina y la gestión deficiente de residuos químicos surge una oportunidad de innovación orientada a la eficiencia de los recursos. Es imperativo explorar alternativas que permitan la revalorización del thinner como residuo, transformándolo en un componente activo de un sistema de protección. El desafío reside, por tanto, en evaluar si la integración controlada de este solvente recuperado en un recubrimiento de silicón puede ofrecer un desempeño anticorrosivo eficaz, resolviendo simultáneamente una necesidad de ingeniería estructural y un imperativo de sostenibilidad bajo un enfoque de economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

1.2 Contexto de la corrosión en concretos: ambientes marinos

La agresividad del ambiente marino es, quizás, uno de los desafíos más complejos para la ingeniería de materiales. Este entorno se define por una alta concentración de sales disueltas que actúan de forma sinérgica para degradar las estructuras. Según Prada (1998), estas sales son principalmente cloruro sódico (NaCl), cloruro magnésico (MgCl_2), sulfato magnésico (MgSO_4), sulfato cálcico (CaSO_4), así como cloruros y sulfatos potásicos (KCl y K_2SO_4). En mar abierto, la concentración de estos compuestos suele oscilar entre los 33 y 38 gramos por litro, creando un medio electrolítico altamente conductivo y agresivo.

Cuando una estructura de concreto se somete a estas condiciones, se desencadena un proceso de degradación multifactorial que abarca ataques físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, entre

todos los agentes presentes, los iones de cloruro son los más críticos para la integridad del sistema. Su capacidad de penetración es tal que, al alcanzar el acero de refuerzo, rompen la capa de pasivación una barrera natural de óxidos protectores y dan inicio al proceso de corrosión electroquímica. Por lo tanto, la exposición a la salinidad marina no es solo una condición ambiental, sino un riesgo latente que compromete de manera directa la durabilidad y la seguridad del concreto armado a largo plazo (Prada, 1998).

1.3 Importancia del control de la corrosión en la ingeniería civil

En el ámbito de la ingeniería civil, la gestión de la integridad estructural ha evolucionado de un enfoque puramente reactivo a uno preventivo y predictivo. Bajo esta perspectiva, el control de la corrosión se erige como un pilar fundamental, dado que este fenómeno constituye uno de los problemas más recurrentes y críticos en las estructuras de concreto reforzado. Como señala Villao (2021), la corrosión afecta de manera directa la integridad del acero de refuerzo, comprometiendo la adherencia con la matriz de concreto y, en última instancia, socavando la durabilidad global del sistema estructural.

Debido a que el daño por corrosión suele ser interno y progresivo, la evaluación sistemática de parámetros como la resistencia a la polarización y la velocidad de corrosión se ha convertido en una necesidad técnica imperativa. Estas mediciones no solo permiten diagnosticar el estado actual de una obra, sino que son la base para predecir con exactitud la vida útil remanente de la infraestructura (Villao, 2021). Una cuantificación precisa permite a los tomadores de decisiones adoptar medidas de mantenimiento y reparación que sean tanto oportunas como efectivas, evitando que el deterioro alcance niveles irreversibles.

En conclusión, el análisis sistemático de la corrosión no representa únicamente un protocolo de diagnóstico; es una estrategia clave para garantizar la seguridad estructural. Al implementar

controles anticorrosivos eficientes desde las etapas de diseño o rehabilitación temprana, la ingeniería moderna busca reducir drásticamente los costos operativos asociados a fallas catastróficas o mantenimientos prematuros, alineando la funcionalidad de las obras con los estándares internacionales de seguridad y resiliencia.

1.4 Justificación de la investigación

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto armado constituye uno de los desafíos más críticos para la durabilidad de la infraestructura civil contemporánea, especialmente en aquellas obras expuestas a la agresividad de los ambientes marinos. Este fenómeno encuentra su origen en la elevada concentración de cloruros presentes en el entorno, los cuales actúan como catalizadores del deterioro estructural. Como se detalla en las investigaciones de Vásquez et ál. (2016), existen múltiples factores que facilitan la tendencia del acero a la corrosión, destacando la presencia de iones agresivos que logran penetrar la matriz del concreto hasta romper la capa pasiva del acero, acelerando los procesos de oxidación y provocando una pérdida progresiva de la sección transversal del refuerzo. Esta problemática trasciende lo meramente técnico para convertirse en una crisis económica de escala global; se estima que el costo anual derivado de la degradación de estructuras de hormigón supera el 3% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial, cifra que se incrementa exponencialmente cuando las intervenciones se realizan de forma reactiva y no preventiva (Garcés et ál., 2021). Desde la óptica de la ingeniería moderna, el control de la corrosión debe ser abordado no como un evento aislado, sino como una estrategia de gestión integral que garantice la seguridad estructural y la eficiencia económica durante todo el ciclo de vida del proyecto. En este sentido, la durabilidad del sistema dependerá de su capacidad para resistir agentes externos, ataques químicos y procesos de abrasión, lo que obliga a los proyectistas a implementar diseños basados estrictamente en la vida útil de la edificación (Llallire et al., 2020).

Dentro de la gama de soluciones disponibles, los recubrimientos anticorrosivos se erigen como una de las alternativas más viables y accesibles, funcionando como barreras físicas y químicas que impiden el ingreso de cloruros y otros agentes deletéreos. Según explican Zhang et ál. (2024), el mecanismo de protección por aislamiento o blindaje, logrado mediante superficies hidrofóbicas, es fundamental para minimizar el área de contacto entre el acero y el electrolito corrosivo. Sin embargo, la presente investigación va más allá de la simple aplicación de un recubrimiento comercial, justificándose en la necesidad de evaluar de manera objetiva, cuantificable y bajo rigor científico el desempeño de sistemas formulados específicamente para condiciones severas. Para ello, se emplean técnicas electroquímicas de alta precisión, tales como la medición del potencial de corrosión, las curvas de polarización y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Estas herramientas, respaldadas por las normativas ASTM e ISO, permiten traducir el comportamiento físico-químico del sistema acero-recubrimiento en datos técnicos que facilitan la elaboración de diagnósticos y pronósticos precisos sobre el estado de salud de las estructuras, optimizando así las decisiones de mantenimiento y reduciendo los costos por reemplazo prematuro (Valdés et ál., 2021).

La dimensión ambiental de este estudio se centra de forma exclusiva y responsable en la gestión de solventes, específicamente en la reutilización del thinner como agente clave en la formulación del recubrimiento. En la industria de las pinturas y recubrimientos, el thinner es indispensable para controlar la viscosidad, mejorar la humectación del sustrato y asegurar la formación de una película homogénea y continua (Croll, 2021). No obstante, el uso de solventes vírgenes implica una alta huella de carbono y riesgos asociados a la emisión de compuestos orgánicos volátiles. Esta investigación propone un enfoque de economía circular al integrar solventes recuperados o reutilizados en el proceso experimental. Esta decisión se justifica bajo la premisa de que la sustentabilidad no reside únicamente en el uso de materiales "verdes", sino en la optimización y el aprovechamiento máximo de los recursos ya existentes en la cadena industrial. Según los principios

de la jerarquía de manejo de residuos y la norma ISO 14001, la reutilización de solventes permite mitigar el impacto ambiental derivado de su fabricación y disposición final, transformando un residuo peligroso en un insumo funcional que no sacrifica la calidad técnica del producto terminado (International Organization for Standardization, 2015). Al demostrar que un recubrimiento elaborado con thinner reutilizado mantiene un alto desempeño anticorrosivo, se abre una vía para prácticas de ingeniería más conscientes y alineadas con la preservación de los recursos naturales.

Esta propuesta encuentra su validación definitiva en la construcción del título de la investigación, el cual ha sido estructurado para reflejar la complejidad y el alcance real del trabajo. El uso del concepto "desempeño anticorrosivo" es fundamental, ya que establece que la evaluación no es meramente estética o cualitativa, sino que se fundamenta en la capacidad de respuesta del material ante el ataque electroquímico. Al incluir el término "sustentabilidad", el título hace referencia directa al modelo de aprovechamiento del thinner reutilizado y a la extensión de la vida útil estructural; ambos pilares contribuyen a una ingeniería de menor impacto ambiental. La precisión terminológica del título asegura que el lector identifique de inmediato que la investigación se sitúa en la intersección entre la ciencia de materiales y la gestión ambiental aplicada. Asimismo, la mención de los conceptos de "durabilidad" refuerza la idea de que la mejor forma de proteger el medio ambiente es construyendo estructuras que no necesiten ser demolidas o reparadas constantemente, reduciendo así el flujo de residuos de construcción (Huang et al., 2025).

Finalmente, el estudio se justifica por su viabilidad y su aporte a la dimensión humana de la profesión. Al desarrollarse bajo condiciones de laboratorio académico con materiales accesibles y normativas vigentes, el proyecto demuestra que es posible generar innovación técnica sin requerir presupuestos inalcanzables. Esta investigación no pretende ignorar el impacto químico de los insumos, sino demostrar que, mediante un uso documentado, ético y orientado a la eficiencia, es posible mejorar la infraestructura nacional. En última instancia, este trabajo busca formar una visión

crítica en el ingeniero civil, donde la elección de un sistema de protección no solo dependa de su costo inicial, sino de su capacidad para armonizar la resistencia estructural con la responsabilidad ambiental, garantizando así un legado de infraestructura resiliente para las generaciones futuras.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño anticorrosivo de sistemas de recubrimiento formulados mediante la combinación de silicón y solvente reutilizado, aplicados sobre acero de refuerzo Grado 42 expuesto a un ambiente marino simulado, utilizando técnicas electroquímicas y criterios de durabilidad para determinar su efectividad como barrera protectora.

1.5.2 Objetivos específicos

- Formular dos sistemas de recubrimiento (REC1 y REC2) a base de silicón, empleando thinner recuperado como agente solvente bajo un enfoque de revalorización de residuo y economía circular.
- Caracterizar el mecanismo de corrosión inicial del acero al carbono Grado 42 sin protección, mediante la inmersión en una solución salina al 3.5% p/p de NaCl para establecer una línea base de comparación.
- Monitorear el comportamiento electroquímico de los especímenes recubiertos (REC1 y REC2) a través de técnicas electroquímicas como potencial de corrosión (E_{corr}), curvas de polarización y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).
- Cuantificar la eficiencia de protección y la resistencia a la polarización de ambos sistemas para determinar la capacidad de aislamiento frente al ingreso de iones cloruro.

- Comparar el daño superficial de las superficies metálicas recubiertas (REC1 y REC2) y no recubiertas mediante técnicas de microscopía, con el fin de evaluar las diferencias en su deterioro y el efecto protector de los recubrimientos.

1.6 Hipótesis de trabajo

La aplicación de sistemas de recubrimiento formulados a base de silicón y solvente reutilizado (REC1 y REC2) sobre acero de refuerzo Grado 42, incrementan significativamente su resistencia a la degradación en ambientes marinos simulados. Se postula que estos sistemas actúan como una barrera física e hidrofóbica que preserva el estado de pasividad del metal, logrando una reducción en la densidad de corriente de corrosión y un aumento en los valores de resistencia a la polarización en comparación con el acero sin protección, validando así la viabilidad técnica de este modelo de protección sustentable.

1.7 Alcances de la investigación

El presente estudio se limita a la evaluación experimental del comportamiento electroquímico de varillas de acero al carbón Grado 42 recubiertas con los sistemas formulados (REC1 y REC2), bajo condiciones controladas de laboratorio.

Las probetas serán sometidas a inmersión en una solución acuosa al 3.5 % en peso de NaCl, empleada como medio simulador de ambiente marino, con el propósito de reproducir la acción de los iones cloruro sobre el material, conforme a la normativa ASTM G44, durante un periodo de exposición de 20 días. Posteriormente, se realizarán ensayos electroquímicos tales como medición del potencial de corrosión, curvas de polarización y espectroscopía de impedancia electroquímica, con el fin de cuantificar su desempeño frente a la corrosión. Asimismo, se contemplará el análisis superficial mediante técnicas de caracterización para evaluar posibles daños o formación de productos de corrosión.

La investigación no contempla ensayos a escala estructural, exposiciones en ambiente marino real ni evaluaciones a largo plazo bajo condiciones naturales. Tampoco se incluye un análisis económico detallado del ciclo de vida del sistema propuesto, centrándose exclusivamente en la viabilidad técnica y el desempeño electroquímico de los recubrimientos formulados.

1.8 Alcances y limitaciones ambientales

Más allá del rigor técnico, este estudio incorpora una dimensión de sostenibilidad al proponer la revalorización de residuos industriales mediante la integración de thinner recuperado en la formulación de los sistemas anticorrosivos. Desde esta perspectiva, el alcance ambiental se define por demostrar que un solvente, que convencionalmente sería descartado como un residuo peligroso, puede ser reintegrado en la cadena de valor de la construcción como un insumo funcional. De este modo, la investigación promueve de manera tangible los principios de la economía circular, transformando un desecho con potencial impacto contaminante en una herramienta para la preservación de infraestructura.

Bajo este enfoque, se busca mitigar indirectamente la huella ambiental de la ingeniería civil. Al extender la vida útil del acero de refuerzo, se reduce la frecuencia de intervenciones de mantenimiento y, por consecuencia, disminuye el consumo de materias primas vírgenes y la energía asociada a la fabricación de nuevos materiales de reparación. Así, la sustentabilidad en este trabajo se aborda desde la optimización del recurso y la gestión responsable de subproductos químicos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Concreto armado

El concreto reforzado es un material de gran demanda dentro del área de la construcción debido a su capacidad estructural y versatilidad de aplicaciones dentro del campo para el desarrollo de nuevas estructuras. Según las Normas Técnicas Complementarias (2017), el concreto reforzado se define como el concreto estructural que incluye acero de refuerzo diseñado para que ambos materiales trabajen conjuntamente. Sin embargo, estas estructuras pueden encontrarse en ambientes muy variados, desde zonas urbanas, rurales y periurbanas, en condiciones atmosféricas y ambientales agresivas, lo cual influye directamente en su correcto desempeño y durabilidad durante el periodo de vida para el cual fueron diseñadas según mencionan Echavarria & Medina (2023).

Osornio (2000) señala que la durabilidad de una estructura se determina por la velocidad a la que el concreto y el acero pueden deteriorarse debido a reacciones químicas que son provocadas principalmente, por agentes que son trasladados por el medio ambiente en donde se encuentra localizada.

Estos ambientes están definidos por la presencia de agentes agresivos como la humedad, los cloruros, los sulfatos, los ciclos de congelación y la abrasión. De acuerdo con el American Concrete Institute (2008), el comportamiento y la durabilidad del concreto dependen en gran medida del ambiente al que estará expuesto durante su vida útil. Por ello, la norma ACI 318 clasifica las condiciones de exposición en cuatro categorías principales: F (congelación y deshielo), S (ataque por sulfatos), P (condiciones que requieren baja permeabilidad) y C (riesgo de corrosión del acero de refuerzo).

Cada una de estas categorías se divide en distintos niveles de severidad, que van desde condiciones poco agresivas hasta exposiciones muy severas. Esta forma de clasificación permite definir requisitos específicos de diseño, como la relación agua/cemento, resistencia mínima y recubrimiento del acero, con el fin de asegurar un desempeño adecuado y prolongar la vida útil de las estructuras de concreto armado (ACI, 2008).

2.2 Concreto armado en ambientes marinos

El ambiente marino es uno de los entornos más agresivos a los que se enfrentan las estructuras pues en ellos se exponen a la presencia constante de humedad, salinidad elevada, ciclos de mojado-secado y brisa cargada de aerosoles salinos los cuales aceleran y favorecen el proceso de degradación del material (Mehta y Monteiro, 2014).

2.2.1 Zonas de Exposición

Las estructuras de concreto reforzados expuestas a ambientes marinos están sometidas a diferentes condiciones que influyen directamente en su desempeño y durabilidad. Según menciona Llallire et ál. (2020) existen diferentes zonas de exposición, las cuales se clasifican en:

a. Zona de atmósfera marina

Se refiere a una zona que no tiene contacto directo con el agua de mar; es allí donde se recibe el aerosol marino, compuesto por la combinación del contenido de cloruros y la brisa proveniente del mar cercano. Esto significa que, a medida que aumenta la distancia desde la costa, la concentración de cloruros disminuye y, por ende, también el riesgo de corrosión.

b. Zona de salpicaduras

Esta región se encuentra por encima de la marea alta y está expuesta a la erosión por salpicadura marina. Además del ataque de los cloruros, la erosión por salpicadura es una de las causas del deterioro físico del concreto. Es la zona más afectada por los cloruros, ya que

sus poros se encuentran abiertos e insaturados, lo que vuelve a la superficie permeable. La acción del viento también facilita la penetración de los cloruros en el concreto, alcanzando las armaduras y provocando allí las reacciones químicas que conducen a la despasivación y oxidación del acero de refuerzo.

c. Zona de mareas

Esta zona es la más agresiva para las estructuras de concreto reforzado, ya que el contenido de humedad varía drásticamente. Durante la marea alta, permanece completamente sumergida y expuesta al impacto constante de las olas, lo que favorece la saturación de los poros; además, los cloruros presentes en la superficie comienzan a transportarse progresivamente hacia el interior de la estructura. Por otro lado, cuando la marea descende, los cambios bruscos de temperatura y humedad promueven la formación de compuestos que atacan el concreto.

d. Zona sumergida

Corresponde a la zona ubicada por debajo del nivel de la marea baja, la cual se mantiene en contacto permanente con el agua de mar. En esta región, los poros del concreto se encuentran completamente saturados y el contenido de oxígeno es bajo, lo que limita, en cierta medida, la penetración de agentes corrosivos, ya que actúa como una capa prácticamente impermeable.

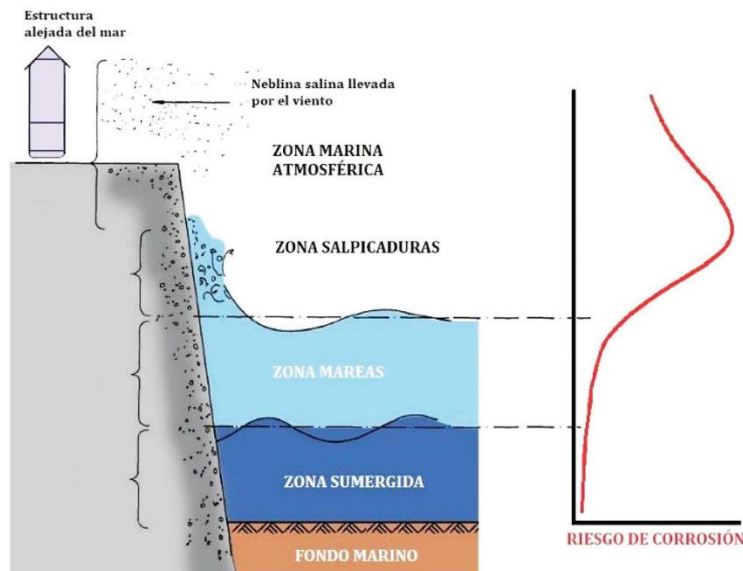


Figura 1. Riesgo de corrosión en estructuras marítimas según su ubicación. Tomada de “Alargamiento de la vida útil de estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos mediante la aplicación de técnicas electroquímicas” por Garcés et ál (2021), Revista ALCONPAT, 11 (1), p.52.

2.3 Fuentes y mecanismos de ingreso de cloruros

La presencia de cloruros en el concreto de refuerzo es uno de los principales problemas de degradación y para el mantenimiento de las estructuras pues estos atacan directamente al refuerzo del elemento provocando deterioro electroquímico irreparable. Una vez que los iones de cloruro ingresan a los poros del concreto, se establece una celda electroquímica en la que el acero actúa como el ánodo, mientras que el agua y el oxígeno funcionan como cátodo; esta solución electrolítica permite que los iones se muevan y, con el tiempo, se genere óxido de hierro, es decir, el acero se corroe (Llallire et al., 2020).

Existen diversos mecanismos fisicoquímicos mediante los cuales los agentes contaminantes pueden penetrar en la masa del concreto. Este ingreso ocurre principalmente por el movimiento del agua contenida en los poros internos del material, o bien por el transporte por difusión a través de su estructura de poros. Entre los mecanismos más relevantes involucrados en estos procesos están (Pedron, 2005):

- **Absorción capilar**

Se refiere a un mecanismo de transporte originado por la acción de la tensión superficial de los líquidos en el interior de los conductos capilares. Este fenómeno genera diferencias de presión en el sistema poroso, lo que provoca el desplazamiento del fluido a través de la red capilar. En consecuencia, los agentes contaminantes disueltos en los líquidos son transportados a través de los poros capilares del concreto.

- **Permeabilidad**

Se puede definir a la permeabilidad como la capacidad de un material para permitir el paso de fluidos líquidos o gaseosos cuando existe un gradiente de presión aplicado. En el caso del concreto esta propiedad depende principalmente de la estructura de su sistema poroso, especialmente del tamaño, la distribución y la conectividad de los poros.

- **Difusión**

El mecanismo de difusión se refiere al fenómeno de transporte originado por la agitación a escala molecular. Este proceso implica que, cuando en un medio existen dos puntos con diferentes concentraciones, la sustancia se desplaza desde la zona de mayor concentración hacia la de menor concentración.

Se denomina coeficiente de difusión, o difusividad, al parámetro que permite cuantificar la capacidad de transporte mediante este mecanismo. Cuando este fenómeno ocurre en fase líquida, el medio de transporte más común para las sustancias contaminantes es el agua; mientras que, en fase gaseosa, el medio más frecuente es el aire.

- **Migración**

En el mecanismo de migración, la fuerza impulsora del transporte es originada por la presencia de un gradiente de campo eléctrico en el interior del material. Bajo la acción de este campo, todos los iones presentes participan en el proceso de desplazamiento. La

dirección de desplazamiento iónico depende de la interacción entre la carga eléctrica de cada ion y el campo eléctrico.

- Efecto Mecha

Corresponde a un mecanismo de transporte que se presenta en aquellos conductos del concreto que conectan a una zona permanente saturada de agua con una región expuesta al aire, en donde ocurre un proceso continuo de evaporación. Dicha diferencia de condiciones genera un flujo sostenido de humedad que a través de la red porosa arrastra sustancias disueltas desde la zona húmeda hacia la superficie expuesta.

2.4 Corrosión del acero de refuerzo

La corrosión puede definirse según González (1989) como “un fenómeno natural, por medio del cual los sistemas químicos expresan su tendencia hacia un estado de equilibrio estable y puede definirse de varias maneras: a) destrucción o deterioración de un material a causa de su reacción con el medio ambiente; b) destrucción de los materiales por medios cualesquiera, excepto mecánicos; c) proceso inverso de la metalurgia extractiva, en virtud del cual los materiales metálicos tienden a volver al estado combinado, en el que se encuentran en la naturaleza, etc.” (p. 12).

Desde una perspectiva termodinámica, la causa de que un metal se corroa se debe a que, la mayoría de los materiales metálicos no son puros en su estado natural, si no combinados con otros elementos con los que forma compuestos tales como óxidos, sulfuros, sulfatos, cloruros, etc. Para obtener un metal de alta pureza es necesario separarlo de dichos compuestos mediante procesos que demandan una gran cantidad de energía, en consecuencia, entre más energía se requiera mayor será su tendencia a retornar a una condición termodinámica más estable. Este fenómeno, asociado

a un proceso de oxidación, se denomina corrosión y se manifiesta como la destrucción progresiva del metal (Sosa, 2003).

El acero, se utiliza en la mayoría de las estructuras de concreto como refuerzo y la corrosión representa una de las principales causas de deterioro pues según menciona Torres et ál (2006), cuando el acero está embebido en el concreto y comienza a corroerse, se produce la pérdida progresiva de material en su superficie y la formación de producto de corrosión, tales como óxidos o hidróxidos de hierro, alrededor de la barra. Como consecuencia, se forman grietas y desprendimientos del concreto, las cuales además de afectar la apariencia de la estructura, pueden disminuir el anclaje del acero, comprometiendo potencialmente la resistencia del elemento estructural.

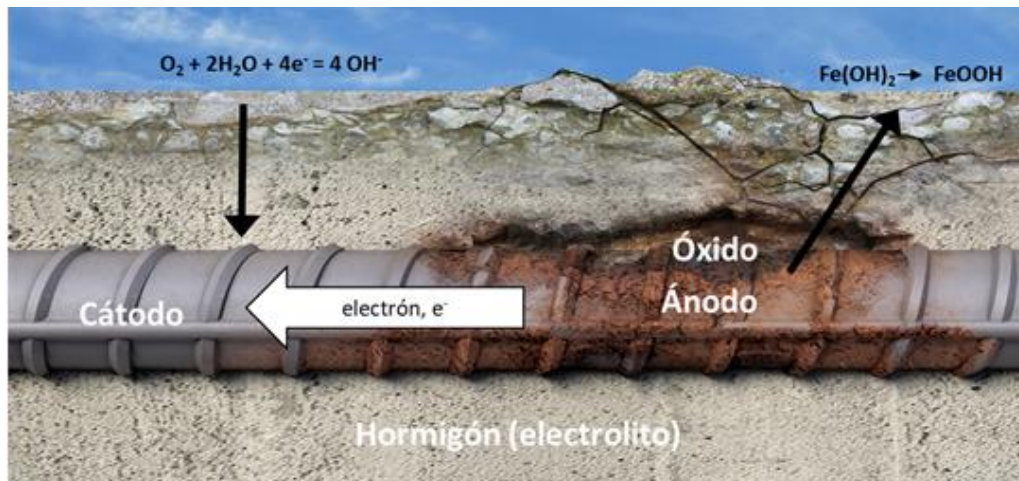


Figura 2. Esquema del proceso electroquímico de corrosión del acero de refuerzo en hormigón. Tomado de *Gestión integral de la corrosión. Análisis documental*, por M. Donadio, J. Capacho y L. Santander, 2023, Revista ALCONPAT, 13(2), pp. 235–253. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690>

2.4.1 Mecanismos electroquímicos

La corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto es un fenómeno de naturaleza electroquímica que se manifiesta cuando convergen las condiciones termodinámicas y cinéticas para la formación de una celda galvánica. Este proceso requiere la coexistencia de cuatro elementos fundamentales: un ánodo y un cátodo sobre la superficie metálica, un conductor electrónico (el acero) y un medio electrolítico que facilite el transporte de especies iónicas. En el sistema del concreto armado, la solución acuosa que satura la red de poros actúa como el electrolito, permitiendo el cierre del circuito eléctrico y el movimiento de iones entre las regiones activas de la varilla (González, 1989).

En las regiones anódicas, ocurre la disolución del metal mediante una reacción de oxidación, donde el hierro pierde electrones y se transforma en iones ferrosos de acuerdo con la Ecuación 1:



Los electrones liberados se desplazan a través del cuerpo de la barra de refuerzo hacia las zonas catódicas. En estas regiones, y bajo condiciones normales de servicio donde existe disponibilidad de humedad y oxígeno disuelto, ocurre la reacción de reducción del oxígeno como se muestra en la Ecuación 2:



El flujo de electrones a través del acero y el transporte de iones en la solución de poros del concreto cierran el circuito electroquímico, permitiendo la continuidad del proceso de corrosión. Los iones ferrosos generados en el ánodo reaccionan posteriormente con los hidroxilos para formar productos

de corrosión, tales como hidróxidos y óxidos de hierro, los cuales pueden acumularse alrededor de la barra de refuerzo y dar lugar a proceso de deterioro del concreto (Bertolini et al., 2013).

Finalmente, es importante destacar que la cinética de este mecanismo no es estática; la velocidad de corrosión está intrínsecamente ligada a variables ambientales y estructurales. Factores como la resistividad eléctrica del concreto, la difusividad del oxígeno y el contenido de humedad relativa en los poros son los que determinan, en última instancia, la magnitud de las corrientes de corrosión y la severidad del deterioro del sistema estructural (Fontana, 1986).

2.4.2 Corrosión por cloruros

La corrosión del acero de refuerzo inducida por cloruros constituye uno de los principales mecanismos de deterioro en estructuras de concreto armado expuestas a ambientes marinos o fuentes de sales. En condiciones normales, el acero embebido en el concreto se encuentra protegido por una capa pasiva, formada debido al elevado pH de la solución de poros del concreto, lo que le proporciona un estado de estabilidad frente a la corrosión (Bertolini et al., 2004).

De acuerdo con Castro (1995), durante la etapa de iniciación los agentes agresivos del ambiente penetran en el concreto hasta alcanzar el nivel de refuerzo mediante distintos mecanismos de transporte, siendo la difusión el proceso predominante en la mayoría de los casos. La velocidad de penetración de los cloruros depende de factores como el ambiente de exposición, la relación agua/cemento, el grado de curado, las condiciones de humedad y secado, así como el espesor del recubrimiento.

El perfil de concentración de cloruros en el concreto varía con el tiempo y la profundidad, y el inicio del proceso de corrosión ocurre cuando la concentración en la superficie del acero alcanza un valor crítico. En este sentido, el control de la difusión del cloruro resulta fundamental para estimar el

tiempo de inicio de la corrosión y, por lo tanto, la vida útil de las estructuras de concreto reforzado expuestas a ambientes agresivos (Castro, 1995).

Los iones cloruros pueden incorporarse al concreto por contaminación interna durante su elaboración o, con mayor frecuencia, por penetración desde el ambiente exterior. Su ingreso ocurre a través de los poros del material mediante proceso de difusión, absorción capilar o permeación, dependiendo de la calidad del concreto, su grado de saturación y las condiciones de exposición. A medida que los cloruros penetran en el concreto, tienden a acumularse en la interfase acero-concreto. Cuando su concentración supera un valor crítico conocido como el contenido umbral de cloruros, se produce la ruptura localizada de la capa pasiva que protege al concreto. En consecuencia, la corrosión inducida por cloruros se caracteriza por su naturaleza localizada, manifestándose en forma de picadura (pitting). Este tipo de ataque puede provocar pérdidas importantes de sección de acero sin producir inicialmente daños visibles en el concreto, lo que incrementa el riesgo estructural (Bertolini et al., 2004).

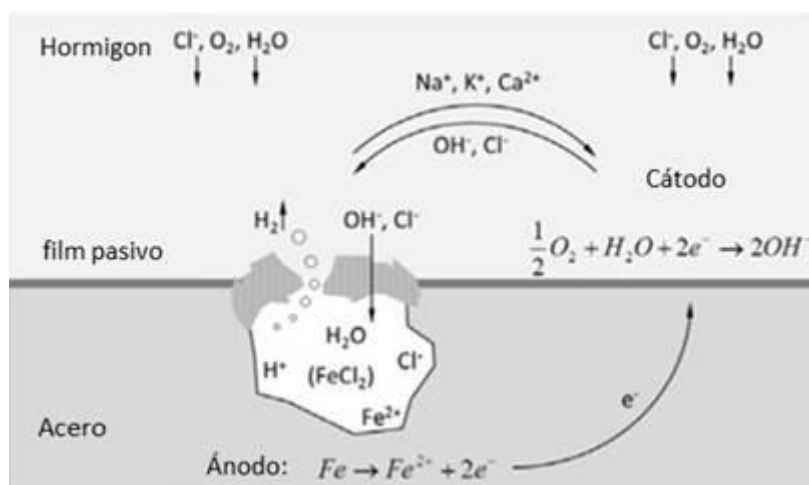


Figura 3. Representación esquemática de la corrosión por picaduras inducida por cloruros. Tomado de *Gestión integral de la corrosión. Análisis documental*, por M. Donadio, J. Capacho y L. Santander, 2023, Revista ALCONPAT, 13(2), pp. 235–253. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690>

2.5 Técnicas electroquímicas para evaluación de la corrosión

Las técnicas electroquímicas de evaluación de corrosión son métodos instrumentales basados en la naturaleza electroquímica del proceso de corrosión, el cual involucra reacciones de oxidación y reducción mediante la transferencia de electrones en la interfase formada por un metal y un electrolito (Pérez, 2012). Estas técnicas utilizan equipos electrónicos, generalmente potenciostatos, para medir o imponer variaciones de potencial (voltaje) o de corriente sobre un material metálico sumergido en un medio conductor (Sosa, 2003).

Su objetivo principal es obtener información cuantitativa y cualitativa sobre la cinética, la velocidad y los mecanismos del deterioro del metal. Presentan grandes ventajas frente a métodos tradicionales (como la pérdida de peso), ya que son pruebas rápidas, muy precisas y, en su mayoría, no destructivas, lo que permite monitorear *in situ* estructuras reales (como el acero de refuerzo embebido en concreto) sin afectar su integridad ni alterar su evolución natural (Contreras, 2013).

2.5.1 Potencial de Circuito Abierto

El potencial de corrosión, E_{corr} , potencial a circuito abierto o potencial mixto se refiere al potencial de un material cuando se encuentra en estado de degradación en un medio corrosivo y nos proporciona información sobre la tendencia termodinámica del acero a oxidarse. En este sentido, valores de E_{corr} más positivos (más nobles) indican una mayor protección del material, mientras que valores más negativos se relacionan con una mayor actividad corrosiva (Universidad Complutense de Madrid, 2022).

2.5.2 Resistencia a la Polarización Lineal

La técnica de resistencia a la polarización lineal es un método electroquímico ampliamente empleado para determinar la velocidad de corrosión de materiales metálicos. Esta técnica consiste

en aplicar una pequeña perturbación de potencial alrededor del potencial de corrosión, lo que genera una respuesta de corriente proporcional que permite analizar el comportamiento electroquímico del sistema. A partir de la respuesta de corriente obtenida, es posible calcular la resistencia a la polarización (R_p), la cual se relaciona inversamente con la velocidad de corrosión (Pérez, 2012).

La resistencia de polarización es un parámetro fundamental, ya que es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión, lo que permite estimar de manera rápida la tasa de deterioro del material. La relación entre la resistencia de polarización y la corriente de corrosión se establece mediante la Ecuación 3 de Stern-Geary:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3)$$

donde i_{corr} es la corriente de corrosión, R_p es la resistencia a la polarización y B es una constante que depende de las pendientes anódica y catódica (coeficientes de Tafel). Esta ecuación permite cuantificar la velocidad de corrosión a partir de mediciones electroquímicas simples (Supliequip, 2020).

La principal ventaja de la técnica LPR radica en su carácter no destructivo y en la rapidez con la que se pueden obtener resultados confiables. Además, al trabajar en un intervalo de potencial reducido, se evita alterar significativamente el estado del sistema electroquímico, lo que permite evaluar el comportamiento del material en condiciones cercanas a su estado natural. Esta técnica es especialmente útil en estudios de monitoreo de corrosión en tiempo real y en la evaluación de recubrimientos protectores (Pérez, 2012).

2.5.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

La espectroscopía de impedancia electroquímica es una técnica ampliamente utilizada para caracterizar sistemas electroquímicos mediante la aplicación de una señal de corriente alterna de pequeña amplitud en un amplio rango de frecuencias. Esta técnica permite analizar los diferentes procesos que ocurren en la interfaz electrodo-electrolito, tales como la transferencia de carga, la formación de la doble capa eléctrica y los fenómenos de difusión (Contreras, 2013).

La impedancia electroquímica se define como la relación entre el potencial aplicado y la corriente resultante en el dominio de la frecuencia, y se expresa como una magnitud compleja como se muestra en la Ecuación 4:

$$Z(\omega) = \frac{E(\omega)}{I(\omega)} = Z' + jZ'' \quad (4)$$

donde Z' representa la parte real de la impedancia, es decir, la resistencia del sistema al paso de la corriente; Z'' corresponde a la parte imaginaria, asociada a fenómenos de almacenamiento de energía como la capacitancia; j es un número imaginario que permite separar ambos comportamientos; y ω es la frecuencia angular, que indica qué tan rápido cambia la señal aplicada y se relaciona con la frecuencia mediante $\omega=2\pi f$. En conjunto, estos términos permiten describir de manera más clara cómo responde el sistema electroquímico ante diferentes condiciones de medición (BioLogic, 2025).

El análisis en función de la frecuencia permite separar procesos electroquímicos que ocurren en diferentes escalas de tiempo, siendo los fenómenos de alta frecuencia asociados principalmente a la resistencia del electrolito, mientras que los procesos de baja frecuencia suelen estar relacionados con fenómenos de difusión (Piratoba et al., 2009).

Los resultados obtenidos de esta técnica se representan principalmente mediante diagramas de Nyquist y Bode, los cuales permiten interpretar de manera gráfica la respuesta del sistema electroquímico en función de la frecuencia. A partir de estas representaciones, es posible evaluar parámetros como la resistencia del recubrimiento, la resistencia a la transferencia de carga y la capacitancia del sistema, donde valores elevados de impedancia indican un mejor desempeño anticorrosivo (BioLogic, 2025).

En particular, el análisis mediante diagramas de Nyquist permite identificar de forma directa los procesos de transferencia de carga y resistencia del sistema, mientras que los diagramas de Bode facilitan la interpretación del comportamiento en función de la frecuencia y la identificación de distintos fenómenos electroquímicos. Complementariamente, el uso de circuitos equivalentes permite modelar el comportamiento del sistema y obtener parámetros cuantitativos asociados a los procesos observados (Piratoba et al., 2009).

Diagramas de Nyquist

El diagrama de Nyquist es una representación gráfica de la impedancia electroquímica en la que la parte imaginaria negativa ($-Z''$) se grafica en función de la parte real (Z'). Esta representación permite identificar de manera directa los procesos electroquímicos presentes en el sistema, ya que cada fenómeno genera una respuesta característica en la gráfica.

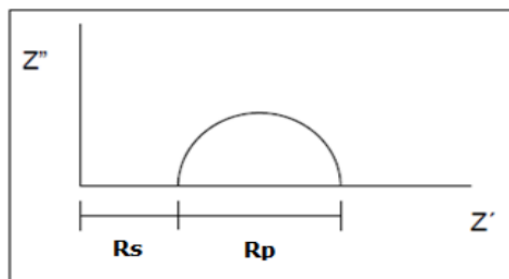


Figura 4. Representación del diagrama de Nyquist para el circuito equivalente de Randles. Tomado de *Evaluación mediante técnicas electroquímicas del comportamiento de recubrimientos alquídicos utilizados en la protección anticorrosiva del acero* por Villacís (2012).

En sistemas de corrosión, es común observar semicircunferencias cuyo diámetro está relacionado con la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}), la cual se asocia directamente con la velocidad de corrosión del material. Asimismo, la intersección del diagrama con el eje real a altas frecuencias corresponde a la resistencia del electrolito (R_s), mientras que, a bajas frecuencias, pueden presentarse comportamientos asociados a fenómenos de difusión, representados mediante una línea inclinada conocida como impedancia de Warburg. Estas características permiten interpretar de manera cualitativa el comportamiento del sistema electroquímico. En este sentido, el diagrama facilita una interpretación rápida del sistema, ya que el tamaño y la forma de los arcos proporcionan información cualitativa sobre el desempeño del material frente a la corrosión; así, mayores diámetros indican una mayor resistencia a la transferencia de carga y, por lo tanto, un mejor comportamiento anticorrosivo (Arzola, 2001).

Diagramas de Bode

Los diagramas de Bode representan la respuesta del sistema electroquímico en función de la frecuencia mediante dos gráficas: una correspondiente a la magnitud de la impedancia ($|Z|$) y otra al ángulo de fase (ϕ), ambas en escala logarítmica. Esta representación permite analizar de manera

más detallada los procesos electroquímicos, ya que cada uno domina en un intervalo específico de frecuencias.

La magnitud de la impedancia se define como se muestra en la Ecuación 5:

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (5)$$

mientras que el ángulo de fase está dado por la Ecuación 6:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (6)$$

En estos diagramas, valores elevados de impedancia a bajas frecuencias suelen indicar una mayor resistencia a la corrosión, mientras que el ángulo de fase permite identificar comportamientos capacitivos o resistivos del sistema. Por ejemplo, un ángulo cercano a -90° está asociado a un comportamiento capacitivo ideal, característico de sistemas con buena protección superficial (Metrohm, 2023).

Además, los diagramas de Bode facilitan la identificación de múltiples constantes de tiempo, lo cual resulta fundamental para analizar sistemas complejos como recubrimientos, donde pueden coexistir varios procesos electroquímicos simultáneamente (Piratoba et al., 2009).

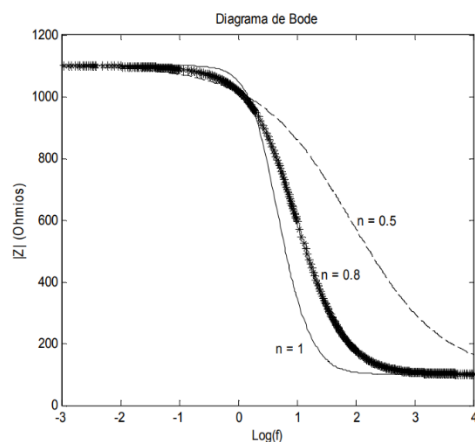


Figura 5. Diagrama de Bode (Impedancia contra frecuencia en un circuito simple). Tomado de *Aspectos básicos en la interpretación de impedancia electroquímica* por Piratoba et al. (2009).

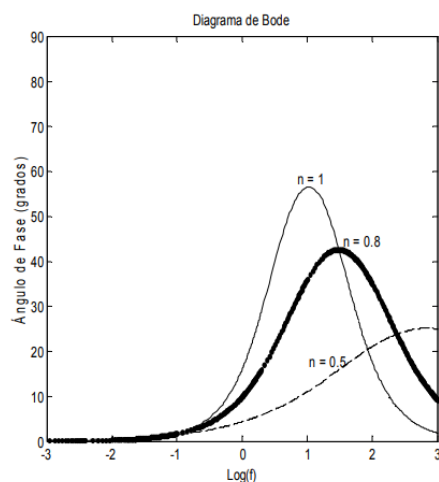


Figura 6. Diagrama de Bode (Ángulo de fase contra frecuencia en un circuito simple). Tomado de *Aspectos básicos en la interpretación de impedancia electroquímica* por Piratoba et al. (2009).

Ajuste de Circuitos Equivalentes

Para una interpretación cuantitativa de los resultados obtenidos mediante EIS, es común emplear circuitos equivalentes, los cuales permiten modelar el comportamiento electroquímico del sistema a partir de elementos eléctricos ideales. Estos circuitos simulan la respuesta del sistema mediante combinaciones de resistencias, capacitancias y elementos difusivos y con estos se obtienen

parámetros electroquímicos cuantitativos y relacionarlos con propiedades físicas del sistema, como la resistencia a la corrosión o la eficiencia de un recubrimiento, lo que convierte a esta herramienta en un elemento fundamental para el análisis e interpretación de datos de impedancia electroquímica (Piratoba et al., 2009).}

Para el caso del acero de refuerzo con algún tipo de recubrimiento anticorrosivo expuesto a un ambiente salino, la respuesta electroquímica puede describirse considerando, en primer lugar, la resistencia del electrolito (R_{Ω}), asociada a la solución salina; seguida de una contribución relacionada con el recubrimiento, la cual se modela mediante un arreglo resistencia–capacitancia (R_{cp} – C_{cp}) que representa el comportamiento de la película protectora y sus propiedades dieléctricas. Finalmente, la interfaz metal–electrolito se representa mediante un elemento en paralelo compuesto por la capacitancia de la doble capa (C_{dl}) y la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}), parámetro directamente vinculado con los procesos de corrosión del sustrato metálico. Este tipo de configuración ha sido ampliamente usada para representar fenómenos de corrosión en las varillas del concreto, permitiendo reproducir adecuadamente los espectros de impedancia obtenidos experimentalmente. Asimismo, el uso de elementos de fase constante (Q) en lugar de capacitancias ideales se justifica por la heterogeneidad superficial, la rugosidad del recubrimiento y la distribución no uniforme de corrientes, condiciones típicas en sistemas expuestos a medios agresivos como soluciones salinas (Caravaca et al., 2023)

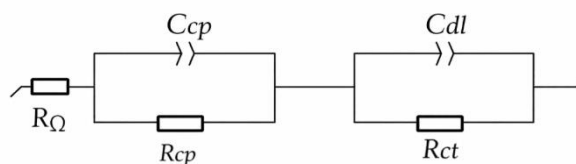


Figura 7. Circuito eléctrico equivalente para simular la corrosión del acero en ambientes salinos. Adaptado de *Mediciones de espectroscopía de impedancia electroquímica en estructuras de concreto reforzado, para identificar mecanismos de degradación asociados a la corrosión en varilla de refuerzo* por Caravaca et al. (2023).

2.5.4 Polarización Potenciodinámica Cíclica

Para comprender la interacción del acero con un medio corrosivo, la polarización potenciodinámica cíclica se considera una de las herramientas más reveladoras. Esta técnica permite analizar fenómenos electroquímicos fundamentales, como la corrosión localizada, la pasividad, así como la influencia de los elementos de aleación y la acción de inhibidores sobre la cinética de las reacciones electroquímicas que gobiernan el comportamiento del material. En el caso específico de la corrosión por picaduras, las curvas de polarización potenciodinámica deben registrarse dentro de un intervalo adecuado de potencial, con el propósito de identificar parámetros clave como el potencial de protección (E_{pro}) y el potencial de picadura (E_{pit}), los cuales son determinantes para evaluar la susceptibilidad del material a este tipo de degradación (Almazán, 2017).

Como señala López (2018), a partir del análisis de las curvas de polarización obtenidas es posible determinar gráficamente, mediante la intersección de las ramas anódica y catódica, parámetros fundamentales como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}). Asimismo, estas curvas permiten obtener información adicional relevante, como las pendientes de Tafel correspondientes a los procesos anódico (β_a) y catódico (β_c), así como inferir el mecanismo mediante el cual se desarrolla el proceso de corrosión.

De acuerdo con el mismo autor, dependiendo del sistema evaluado y del tipo de ensayo realizado, también es posible identificar otros parámetros de interés, tales como el potencial de picadura, la temperatura crítica de picadura y el grado de sensibilización del material, lo que contribuye a una caracterización más completa de su comportamiento electroquímico.

Asimismo, López (2018) explica que cuando el barrido de potencial se realiza a partir del potencial de corrosión hacia valores más negativos, se obtiene una curva asociada a las reacciones de

reducción, conocida como curva de polarización catódica. Por el contrario, si el barrido se dirige hacia potenciales más positivos, se favorecen las reacciones de oxidación del metal, generando la denominada curva de polarización anódica.

Como describe López (2023), la técnica de polarización potenciodinámica permite determinar la densidad de corriente de corrosión a partir del análisis de las curvas de polarización y las pendientes de Tafel. En este contexto, la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) se calcula mediante la Ecuación 7 de Stern-Geary, la cual establece una relación entre i_{corr} , las pendientes anódica (β_a) y catódica (β_c), y la resistencia a la polarización (R_p):

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{1}{R_p} \quad (7)$$

De acuerdo con el mismo autor, esta expresión puede simplificarse mediante la constante de Stern-Geary (B), de tal forma que la densidad de corriente de corrosión también puede expresarse como indica la Ecuación 8:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (8)$$

donde B depende de las pendientes de Tafel obtenidas experimentalmente. Esta relación pone de manifiesto que la velocidad de corrosión es inversamente proporcional a la resistencia a la polarización del sistema.

Asimismo, López (2023) indica que, para obtener la corriente de corrosión total (I_{corr}), es necesario considerar el área expuesta del material, de acuerdo con la relación en la Ecuación 9:

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{\text{Área}} \quad (9)$$

Finalmente, señala que la velocidad de corrosión (v_{corr}) puede determinarse a partir de la densidad de corriente de corrosión mediante la siguiente expresión mostrada en la Ecuación 10:

$$v_{corr} = \frac{0.13 \cdot I_{corr} \cdot (p.eq)}{\rho} \quad (10)$$

donde p.eq corresponde al peso equivalente del material y ρ a su densidad. Esta ecuación permite expresar la velocidad de corrosión en unidades de mm/año, proporcionando una medida cuantitativa del deterioro del material en el medio de estudio.

Análisis de las Pendientes de Tafel

Como describe Villalobos (1988), la determinación de parámetros electroquímicos a partir de curvas de polarización requiere identificar regiones donde el sistema exhiba un comportamiento tipo Tafel, es decir, una relación lineal entre el potencial y el logaritmo de la densidad de corriente. En este sentido, el método de extrapolación de Tafel es válido únicamente cuando tanto la rama anódica como la catódica presentan dicho comportamiento lineal, lo que permite definir con precisión las pendientes de Tafel y extrapolarlas hasta el potencial de corrosión.

En este contexto, Villalobos (1988) señala que la respuesta de la curva de polarización no es lineal en valores de sobrepotencial bajos ni en las cercanías del potencial de corrosión (E_{corr}), debido a la presencia de un régimen mixto en el que coexisten simultáneamente las reacciones de oxidación y reducción. Por ello, las regiones lineales características del comportamiento de Tafel se localizan a sobrepotenciales más elevados, donde predomina un único mecanismo electroquímico. Asimismo, el autor indica que, en una representación semilogarítmica, esta linealidad suele presentarse a sobrepotenciales superiores a ± 120 mV respecto a E_{corr} , lo que resalta la importancia de seleccionar adecuadamente las zonas de ajuste para garantizar la validez del análisis. En casos donde existe

interferencia en la rama catódica, es posible realizar la extrapolación únicamente a partir de la rama anódica sin comprometer la determinación de los parámetros cinéticos.

Así mismo, Villalobos (1988) establece que el ajuste de las pendientes de Tafel consiste en seleccionar las regiones lineales apropiadas en ambas ramas, aplicar un ajuste matemático sobre dichos segmentos y extrapolarlos hasta su punto de intersección. Este procedimiento permite determinar con mayor confiabilidad el potencial de corrosión (E_{corr}), la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y las pendientes anódica (β_a) y catódica (β_c), parámetros fundamentales para la evaluación de la cinética de corrosión del sistema.

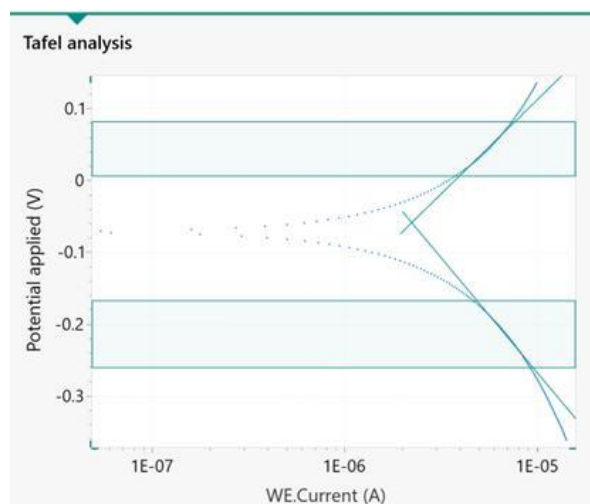


Figura 8. Análisis de Tafel con las regiones lineales identificadas en el área sombreada, y líneas en ángulo que indican regresiones lineales. Tomado de *Determinación de la velocidad de corrosión con INTELLO* por Metrohm (2023).

2.6 Métodos de protección contra la corrosión en concreto armado

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado es una propiedad que debe gestionarse desde la fase de proyecto, mediante la implementación de estrategias orientadas a restringir el ingreso de agentes agresivos y a mitigar la cinética del proceso corrosivo. En el contexto nacional, los criterios para el diseño y construcción con enfoque de durabilidad se fundamentan en las

Normas Mexicanas (NMX) emitidas por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), así como en los reglamentos de construcción vigentes, los cuales establecen los requisitos mínimos de desempeño para la infraestructura (ONNCCE, 2017).

Estos lineamientos técnicos consideran la severidad de la exposición ambiental, la calidad de la mezcla de concreto (relación agua/cementante) y el espesor del recubrimiento como los pilares fundamentales para salvaguardar el acero de refuerzo. No obstante, dada la naturaleza estocástica del fenómeno de corrosión y la creciente demanda de vidas útiles que superen los 50 años, los criterios nacionales suelen complementarse con estándares internacionales de alta especialización. Organismos como el American Concrete Institute (ACI) y la Fédération Internationale du Béton (fib) proporcionan metodologías avanzadas para el diseño por durabilidad, basándose en modelos de difusión que permiten predecir con mayor precisión el tiempo de iniciación por ingreso de cloruros (ACI Committee 318, 2019; fib, 2010).

De manera general, las estrategias de protección pueden clasificarse en dos niveles fundamentales de intervención, dependiendo de si el enfoque se centra en la matriz de concreto o directamente en el refuerzo metálico (Bertolini et al., 2013):

1. Medidas de prevención: Son aquellas que se aplican durante la etapa de diseño y construcción, orientadas a garantizar que el concreto posea una permeabilidad lo suficientemente baja para retardar el ingreso de agentes agresivos. Estas incluyen la selección de una relación agua/cementante adecuada, un curado eficiente y la garantía de espesores de recubrimiento suficientes.
2. Medidas de protección adicionales: Se implementan cuando las condiciones de exposición son extremadamente severas como en los ambientes marinos y la barrera natural del concreto no es suficiente por sí sola. Dentro de este grupo destacan los recubrimientos

anticorrosivos aplicados sobre el acero de refuerzo, los cuales actúan interrumpiendo el circuito electroquímico y aislando el sustrato metálico del electrolito circundante.

2.6.1 Métodos constructivos y diseño

En la ingeniería de la durabilidad, el diseño y los métodos constructivos representan la primera línea de defensa contra la degradación. Su objetivo primordial es configurar una matriz de concreto con baja permeabilidad que actúe como un obstáculo físico, incrementando el tiempo necesario para que los agentes agresivos, como los cloruros, alcancen la superficie del acero de refuerzo (Mehta & Monteiro, 2014).

El espesor del recubrimiento es, posiblemente, el factor determinante en el control de la corrosión, ya que establece la distancia que los iones de cloruro deben recorrer antes de iniciar la despasivación del acero. De acuerdo con la NMX-C-155-ONNCCE-2017, este parámetro debe definirse estrictamente en función de la agresividad del ambiente y la tipología del elemento estructural (ONNCCE, 2017). Para condiciones de exposición severa, como el ambiente marino objeto de este estudio, las normativas suelen exigir recubrimientos mínimos que oscilan entre los 40 mm y 75 mm, valores que convergen con las recomendaciones del ACI 318-19 para elementos en contacto directo con suelos o aguas salinas (ACI, 2019).

Además, la resistencia a la penetración de cloruros depende principalmente de la relación agua/cemento y de la compacidad de la matriz. La NMX-C-155-ONNCCE-2017 recomienda, para ambientes agresivos una relación agua/cemento menor o igual que 0.45, así como resistencias a compresión entre 30 y 40 MPa (ONNCCE, 2017). Estas condiciones permiten obtener un concreto más denso y menos permeable. Una menor relación agua/cemento reduce la porosidad capilar y

puede disminuir el coeficiente de difusión de cloruros en un orden de magnitud (Mehta y Monteiro, 2014).

Adicional a esto, el uso de adiciones minerales como ceniza volante, escoria o humo de sílice mejora la durabilidad al refinar la microestructura del concreto y reduce su permeabilidad. Sustituciones típicas incluyen:

- Ceniza volante: 15-30%
- Escoria: 30-50%
- Humo de sílice: 5-10%

Estas adiciones pueden reducir significativamente la penetración de cloruros y el riesgo de corrosión (Bertolini et al., 2013).

Finalmente, la efectividad de las medidas anteriores depende críticamente de la ejecución en obra. Un curado húmedo adecuado, mantenido por al menos 7 días, es esencial para favorecer la hidratación completa del cemento y cerrar las redes de porosidad capilar (Mehta & Monteiro, 2014). Asimismo, se debe prestar especial atención al control de la fisuración. Dado que las grietas actúan como vías de acceso directo para los cloruros, el comité ACI 224R recomienda limitar el ancho de fisura a valores inferiores a 0.3 mm en condiciones de exposición severa, evitando así que el mecanismo de protección del concreto sea vulnerado de forma prematura (ACI, 2001).

2.6.2 Recubrimientos anticorrosivos

El uso de recubrimientos anticorrosivos constituye una estrategia complementaria de alto valor para incrementar la durabilidad del acero de refuerzo en ambientes críticos. Estos sistemas se emplean cuando el diseño convencional resulta insuficiente ante la exposición severa a cloruros, humedad o agentes contaminantes que podrían acelerar el proceso de corrosión y reducir drásticamente la vida

útil de la estructura (ACI, 2019). Su función principal es actuar como una barrera física de alta eficiencia que interrumpe el circuito electroquímico; al limitar el contacto del acero con el electrolito presente en los poros del concreto, se reduce significativamente la penetración de agua, oxígeno e iones cloruro hacia la superficie metálica. En consecuencia, esta disminución en el transporte de especies agresivas logra retrasar la despasivación del acero y postergar el inicio del proceso corrosivo (Bertolini et al., 2004).

En la práctica de la ingeniería, estos sistemas de protección ofrecen versatilidad en su implementación, pudiendo aplicarse directamente sobre las barras de refuerzo antes del colado. Ejemplos comunes de esta modalidad son los recubrimientos epóxicos adheridos por fusión o los recubrimientos metálicos. Alternativamente, la protección puede ejercerse sobre la superficie del elemento de concreto ya terminado, mediante el uso de selladores y recubrimientos protectores diseñados para reducir la permeabilidad global del material (Revie y Uhlig, 2008).

Sin embargo, la efectividad de estas soluciones no es universal, sino que depende de una selección rigurosa basada en el diagnóstico del entorno. Factores como el nivel de exposición ambiental, la concentración esperada de cloruros, las fluctuaciones de humedad y los requerimientos de vida útil son determinantes para elegir el sistema adecuado. Particularmente en ambientes marinos o zonas de salpicadura donde la agresividad es máxima, el uso de recubrimientos anticorrosivos se convierte en un aliado fundamental que complementa el espesor de recubrimiento del concreto y otras medidas de diseño normativas (ISO, 2017).

Para comprender el desempeño de estas barreras, es necesario distinguir sus naturalezas químicas. De acuerdo con su composición y mecanismo de protección, los recubrimientos utilizados en la protección del acero pueden clasificarse en sistemas orgánicos e inorgánicos. Esta distinción es

clave, ya que cada categoría presenta características de desempeño, adherencia y resistencia química diferenciadas, las cuales definen su éxito en la preservación del acero de refuerzo.

2.7 Recubrimientos orgánicos e inorgánicos

Los recubrimientos orgánicos están constituidos por resinas poliméricas que forman una película continua sobre la superficie del acero, reduciendo la permeabilidad al agua, oxígeno y agentes agresivos como los cloruros. Su principal mecanismo de protección es el efecto barrera, aunque algunos sistemas pueden incorporar pigmentos inhibidores o partículas metálicas (Revie y Uhlig, 2008).

Según menciona Gonzáles (2010), los recubrimientos orgánicos se agrupan en tres categorías principales según su composición (vehículo, disolvente y pigmentos):

- **Pinturas:** Mezcla líquida, pastosa o polvorienta de un vehículo orgánico con pigmentos (óxidos metálicos o sales inorgánicas finamente divididas). Aplicada en capas delgadas con disolvente, se solidifica por procesos físico-químicos, formando una película protectora y decorativa que, una vez curada, integra el recubrimiento al sustrato.
- **Barnices:** Soluciones coloidales de aceites, resinas y sustancias filmógenas, transparentes por ausencia de pigmentos.
- **Lacas:** Resinas disueltas en sustancias filmógenas volátiles (con o sin pigmentos), cuya película sólida se forma por evaporación del disolvente.

Adicionalmente, existen pinturas especiales que generan películas lisas en tiempos de curado mucho más cortos que las convencionales.

La selección de sistemas orgánicos depende del nivel de exposición ambiental, el espesor aplicado y la correcta preparación de la superficie, factores que influyen directamente en su desempeño y vida útil (ISO, 2017).

Por otra parte, los recubrimientos inorgánicos están compuestos de materiales de naturaleza mineral o metálica que proporciona protección mediante barrera física, pasivación química o protección catódica. Estos sistemas suelen presentar mayor estabilidad térmica y química que los orgánicos, lo que los hace adecuados para ambientes altamente agresivos (Broomfield, 2007).

Este tipo de recubrimientos se basa en la formación de capas protectoras mediante procesos químicos o electroquímicos, ya sea por conversión de la superficie metálica o por deposición de compuestos como óxidos, fosfatos, cromatos o materiales cerámicos. En donde la eficacia de estos depende tanto de la preparación de la superficie como de las condiciones de aplicación, lo que influye directamente en su capacidad para mejorar la durabilidad y resistencia frente a agentes corrosivos (Cabrera & Aguilar, 2024).

Los principales tipos de recubrimientos inorgánicos utilizados en la protección de acero son:

- Galvanizado (recubrimiento de zinc): Proporciona protección por barrera y protección catódica, siendo de los sistemas más utilizados para aceros de refuerzo.
- Metalizado térmico (zinc o aluminio proyectado): Se refiere a un proceso para añadir a un metal capas del mismo material o de metales diferentes. Aplicado por aspersión térmica para ambientes marinos o industriales severos.
- Recubrimientos cementicios: Morteros o lechadas alcalinas que restablecen el ambiente protector alrededor del acero en trabajos de reparación.
- Recubrimientos a base de silicatos minerales: generan capas densas y químicamente estables.

- Recubrimientos cerámicos: utilizados en condiciones de alta agresividad química o abrasión.
- Recubrimientos geopoliméricos o minerales modificados: sistemas de baja permeabilidad con alta compatibilidad con el concreto.

Estos sistemas son particularmente adecuados cuando se requiere compatibilidad con el concreto o cuando se busca una protección adicional frente a la penetración de cloruros y la pérdida de alcalinidad (Bertolini et al., 2004).

Tabla 1. Tipos de recubrimientos inorgánicos para acero de refuerzo

RECUBRIMIENTO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	DESVENTAJAS
Galvanizado	Proporciona protección por barrera física y protección catódica gracias al zinc, el cual se sacrifica frente al acero. Se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión y larga vida útil, requiere poco o nulo mantenimiento y ofrece una protección integral del acero. Además, presenta elevada resistencia a golpes y abrasión, es un proceso económico y reciclable, y destaca por su versatilidad para distintas aplicaciones y ambientes (López, 2015).	Este recubrimiento se consume con el tiempo, especialmente en ambientes agresivos o altamente contaminados. Además, la protección disminuye cuando existen áreas grandes de acero expuesto debido a cortes, daños o rayaduras. De igual manera, la capa protectora de óxido/carbonato de zinc puede disolverse en ambientes con humedad ácida (GalvInfo Center, 2007).
Metalizado térmico	Se caracteriza por una baja inversión, elevada velocidad de deposición, gran eficiencia, facilidad de operación y bajo costo de mantenimiento (Marulanda, 2007).	Presentan baja fuerza de enlace, adherencia limitada y alta porosidad (Marulanda, 2007).
Recubrimientos cementicios	Morteros o lechadas alcalinas que restablecen el ambiente básico (pH alto) alrededor del acero, favoreciendo la repasivación y funcionando como barrera física, los cuales protegen contra la corrosión del acero de refuerzo tanto nuevo como el que ha sido atacado (Euclid Chemical Toxement, 2020).	Pueden fisurarse por contracción hidráulica o diferencias térmicas; Si la capa es delgada o de baja calidad, se vuelve muy permeable a agua y cloruros y deja de proteger (Euclid Chemical Toxement, 2020).
Recubrimientos a base de silicatos minerales	Ofrecen una ventaja estratégica al inhibir el ataque localizado en el acero de construcción mediante su incorporación directa a la película pasiva del metal, reforzando su estructura interna. Mediante un pretratamiento con metasilicato de sodio, el acero al carbono logra pasivarse y generar una película protectora robusta que reduce significativamente la degradación (Ucci Galasso, 2025).	Presentan limitaciones importantes relacionadas con su desempeño en medios altamente alcalinos, como los del concreto armado. Aunque estos recubrimientos reducen el ataque corrosivo, no logran eliminarlo completamente, observándose corrosión localizada tras periodos de exposición prolongados. Su desempeño también depende fuertemente del pH, la temperatura y las condiciones de aplicación, lo que dificulta su control y reproducibilidad en campo (Ucci Galasso, 2025).

Cerámicos	Incremento de la resistencia a la corrosión, fricción y deterioro físico sin alterar las propiedades originales de dureza y resistencia del sustrato (Carbajal et al., 2011).	Pueden agrietarse o fisurarse después de la exposición corrosiva lo que permiten el inicio de la corrosión del metal. Su desempeño depende mucho de la viscosidad y del momento de aplicación y el tratamiento térmico y el secado pueden generar defectos de superficie Carbajal et al., 2011).
Geopoliméricos o minerales modificados	Tienen buena resistencia química y térmica, pueden mejorar la protección superficial del concreto, son una alternativa más sostenible y pueden adherirse bien al sustrato (Martínez, 2022).	Su formulación y ejecución requieren control cuidadoso, pueden presentar problemas de seguridad debido a la alta alcalinidad y experimentar problemas con el fraguado (demasiado rápido) (Martínez, 2022).

2.7.1 Función técnica del silicón

El silicón es un polímero inorgánico-orgánico basado en polisiloxanos, caracterizado por su estructura química de enlaces silicio-oxígeno (Si-O-Si), los cuales proporcionan alta estabilidad térmica, resistencia a la radiación ultravioleta, flexibilidad y elevada durabilidad frente a condiciones ambientales agresivas. Estas propiedades permiten su uso como sellador y material de protección en sistemas de recubrimiento y construcción, especialmente en aplicaciones expuestas a humedad, variaciones térmicas y agentes corrosivos (Dow, 2017).

Una de las funciones técnicas principales del silicón es el sellado de juntas y uniones, donde actúa como una barrera impermeable que impide la penetración de agua, vapor y contaminantes hacia el sustrato o hacia sistemas metálicos protegidos con recubrimientos. Su elevada elasticidad, con capacidades de elongación superiores al 200–400 %, permite absorber movimientos estructurales, dilataciones térmicas y vibraciones sin pérdida de adherencia ni formación de grietas (Klosowski, 2007).

Además, el silicón se emplea como complemento en sistemas anticorrosivos, ya que el ingreso de humedad y oxígeno a través de juntas o discontinuidades es uno de los principales factores que aceleran la corrosión del acero. El uso de selladores basados en elastómeros de silicón contribuye a

mantener la continuidad del sistema de protección y a prolongar la vida útil de los recubrimientos aplicados en estructuras metálicas o de concreto reforzado (SSPC, 2012).

Otra de sus funciones importantes es su desempeño en condiciones ambientales extremas. Los selladores de silicón mantienen sus propiedades mecánicas en rangos de temperatura aproximados de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, además de presentar una baja absorción de agua (generalmente menor al 1 %). Estas características favorecen su estabilidad dimensional y su comportamiento como material impermeabilizante (Wacker Chemie AG, 2016).

Desde el punto de vista de su aplicación, las siliconas pueden clasificarse en sistemas de curado acético, neutro u oxímico, dependiendo del mecanismo de reticulación. Los sistemas de curado neutro son los más utilizados en aplicaciones de construcción y protección de metales, debido a que no liberan subproductos corrosivos durante el proceso de curado, lo cual evita afectaciones en sustratos metálicos o en recubrimientos protectores (ASTM International, 2020).

En conjunto, el uso técnico del silicón en sistemas constructivos y de protección radica en su capacidad para proporcionar sellado hermético, flexibilidad ante movimientos estructurales y resistencia a condiciones ambientales severas, lo que contribuye significativamente a la durabilidad y al desempeño integral de los sistemas de recubrimiento y protección anticorrosiva.

Según lo mencionado por Delimi et al., (2022), la PACVD, por sus siglas en inglés Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition (deposición química de vapor asistida por plasma), es una técnica adecuada para el desarrollo de materiales amorfos, los cuales se caracterizan por presentar baja conductividad eléctrica. Esta propiedad evita el acoplamiento galvánico con el sustrato metálico, contribuyendo así a su protección contra la corrosión. Además, esta técnica permite la producción de películas densas y adherentes con tasas de deposición relativamente altas.

Dentro de esta misma investigación, los autores señalan que, para incrementar las propiedades de barrera en aplicaciones anticorrosivas, es necesario aumentar la cantidad de enlaces Si–O y disminuir la concentración de hidrógeno en el recubrimiento. Asimismo, afirman que la inhibición de la corrosión fue evaluada mediante el uso de recubrimientos organosiliconados, los cuales mejoraron significativamente las propiedades de protección del material y pueden sintetizarse mediante un proceso PACVD relativamente sencillo.

Los resultados obtenidos en dicha investigación demostraron que los recubrimientos basados en silicio tipo SiOx, aplicados sobre acero al carbono mediante PACVD, mejoraron significativamente la resistencia a la corrosión en una solución de NaCl al 3%.

Por otra parte, Harb et al. (2017), en la investigación Organic-Inorganic Hybrid Coatings for Corrosion Protection, analizan el desarrollo y el desempeño de recubrimientos híbridos orgánico-inorgánicos a base de sílice, diseñados para la protección anticorrosiva de superficies metálicas, principalmente acero al carbono y aleaciones de aluminio. El estudio se centra en sistemas híbridos epoxi-sílice y PMMA-sílice obtenidos mediante el proceso sol-gel, una técnica que permite generar redes densas y altamente entrecruzadas entre las fases orgánica e inorgánica, lo que mejora significativamente las propiedades de barrera del recubrimiento. Los autores explican que los recubrimientos híbridos de sílice presentan ventajas importantes frente a los recubrimientos convencionales, ya que combinan la flexibilidad y procesabilidad de los polímeros con la estabilidad térmica, la resistencia mecánica y la capacidad de barrera propias de los materiales cerámicos. En estos sistemas, la sílice actúa como una fase inorgánica capaz de formar enlaces covalentes tanto con la matriz polimérica como con el sustrato metálico, lo que da lugar a películas homogéneas, adherentes y con baja permeabilidad frente al ingreso de especies corrosivas como agua, oxígeno e iones cloruro.

2.7.2 Implicaciones ambientales del uso de polímeros inorgánicos

Los polímeros inorgánicos, entre los que se incluyen materiales como siliconas, polisiloxanos, silicatos y recubrimientos cerámicos híbridos, son ampliamente utilizados en la industria de la construcción y en sistemas de protección debido a su alta durabilidad, estabilidad química y resistencia a condiciones ambientales severas. Sin embargo, su ciclo de vida (desde la producción hasta su disposición final) implica diversas consideraciones ambientales que deben evaluarse para asegurar su uso sostenible (OECD, 2004).

Una de las mayores ventajas ambientales de los polímeros basados en silicio radica en su comportamiento tras la pérdida de su función técnica. Según Graiver et al. (2003), las siliconas no se fragmentan en microplásticos persistentes, uno de los problemas ecológicos más graves de la actualidad. En su lugar, experimentan un proceso de degradación abiótica (hidrólisis y fotólisis) en el suelo, donde se descomponen gradualmente hasta retornar a su estado original de sílice mineral, agua y dióxido de carbono. Esta mineralización es clave para reducir la acumulación de contaminantes sintéticos bioacumulables en el entorno marino y terrestre, diferenciándolos drásticamente de las resinas derivadas del petróleo.

El principal impacto ambiental de los polímeros inorgánicos está asociado al consumo energético y a las emisiones generadas en los procesos de síntesis. En el caso de las siliconas, su fabricación requiere la transformación de sílice mediante procesos termoquímicos de alta temperatura, lo que implica un consumo significativo de energía y emisiones indirectas de CO₂. No obstante, estos impactos iniciales suelen compensarse parcialmente por la larga vida útil del material y su bajo requerimiento de mantenimiento durante el servicio (Wacker Chemie AG, 2016).

Los polímeros inorgánicos destacan por su estabilidad frente a radiación UV, humedad, temperatura y agentes químicos, lo que disminuye la frecuencia de reemplazo y reduce la generación de residuos

a largo plazo. Esta durabilidad contribuye a la reducción de consumo de materiales y del impacto ambiental asociado a actividades de mantenimiento y rehabilitación en estructuras expuestas a ambientes agresivos (PlasticsEurope, 2018).

Otro de los principales retos ambientales es su baja biodegradabilidad. Los polisiloxanos y otros polímeros inorgánicos presentan alta estabilidad química y pueden persistir en el ambiente si no se gestionan adecuadamente. Aunque no se consideran altamente tóxicos ni bioacumulables en la mayoría de sus formas comerciales, su acumulación en residuos de construcción y demolición representa un desafío para los sistemas de manejo de residuos sólidos (OECD, 2004).

Desde una perspectiva de sostenibilidad, diversas evaluaciones de ciclo de vida indican que el impacto ambiental global de los polímeros inorgánicos depende principalmente de su durabilidad y eficiencia funcional. Cuando su uso prolonga la vida útil de estructuras o sistemas de protección, se reduce el consumo de recursos y la generación de residuos, lo que mejora el desempeño ambiental en comparación con materiales de menor vida útil (Wacker Chemie AG, 2016).

Las implicaciones ambientales del uso de polímeros inorgánicos se relacionan principalmente con el consumo energético en su producción y su persistencia al final de su vida útil, sin embargo, su baja emisión de contaminantes durante la aplicación y su elevada durabilidad los convierten en una alternativa favorable dentro de estrategias de construcción y protección orientadas a la sostenibilidad.

2.8 Uso de solventes en sistemas de recubrimiento

Según menciona el Instituto Ecuatoriano de Normalización (2012), se puede definir un solvente activo (disolvente) como: “Un líquido generalmente volátil que se usa en la fabricación de la pintura para disolver o dispersar los constituyentes formadores de la película; se evapora durante el secado,

de modo que no llega a formar parte de la película seca. Los solventes se usan para controlar la consistencia y el carácter del acabado, así como para regular las propiedades de aplicación”.

Paint and Coating Testing Manual (Koleske, 2012) menciona que los solventes son sustancias usualmente líquidas que son capaces de disolver otras sustancias para convertirlas a forma líquida. En la industria de pintura y recubrimientos, los solventes disuelven los sólidos o semisólidos para formar resinas y reducir la viscosidad de la pintura para que pueda ser aplicada de forma uniforme a una superficie. Los solventes son responsables de características no solo para la aplicación de la pintura, si no de la apariencia, además de propiedades físicas y de la durabilidad del recubrimiento.

Hay muchas aplicaciones de los solventes en la industria de los recubrimientos. Estos se pueden clasificar químicamente en tres generales categorías:

- Solventes de hidrocarburos

Los solventes de hidrocarburos se utilizan principalmente como diluyentes de bajo costo en formulaciones de recubrimientos, pinturas y barnices. Son mezclas derivadas del petróleo que contienen compuestos orgánicos con diferente composición dependiendo de la fuente. Debido a su baja capacidad de solvatación comparada con otros solventes oxigenados, son eficaces para disolver resinas naturales y modificadas, aceites secantes, asfaltos y algunos tipos de resinas petroquímicas.

Sin embargo, presentan limitada capacidad para disolver resinas sintéticas más complejas como vinílicas, epóxicas o poliuretanos. Por ello, comúnmente se emplean como parte de mezclas de solventes para ajustar viscosidad, mejorar la aplicación y facilitar la formación de película en sistemas de recubrimiento.

- Solventes oxigenados

Los solventes oxigenados son compuestos sintéticos que contienen oxígeno en su estructura molecular y generalmente presentan alta pureza y composición química definida, a diferencia de los solventes derivados del petróleo. Debido a su mayor poder de solvatación, se emplean principalmente como solventes activos en formulaciones de recubrimientos y pinturas, donde facilitan la disolución de una amplia variedad de resinas sintéticas. Estos solventes poseen rangos de destilación estrechos, buena capacidad de evaporación controlada y mayor compatibilidad con sistemas poliméricos complejos. Son ampliamente utilizados en la industria de recubrimientos para mejorar la formación de película, la estabilidad de la formulación y la dispersión de componentes.

- Otros solventes

Los hidrocarburos clorados se han utilizado principalmente como solventes en diferentes aplicaciones industriales. El cloruro de metileno se emplea ampliamente como agente activo en removedores de pintura debido a su gran poder disolvente y su rápida velocidad de evaporación. El 1,1,1-tricloroetano se usaba en formulaciones de recubrimientos porque se consideraba poco reactivo fotoquímicamente y contribuía menos a la formación de compuestos orgánicos volátiles. Por su parte, el tricloroetileno se ha utilizado de manera extendida en la limpieza y desengrase de metales, especialmente en procesos de desengrase en fase vapor. Sin embargo, su uso ha disminuido debido a preocupaciones ambientales y de salud, como el daño a la capa de ozono y su posible toxicidad y carácter cancerígeno.

2.8.1 Función técnica del thinner

Para comprender el papel del solvente en un sistema de protección, es necesario remitirse a su naturaleza físico-química. El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2012) define al thinner como un líquido homogéneo, volátil y transparente, constituido por una mezcla balanceada de disolventes, diluyentes y cosolventes. Su diseño está orientado a ajustar la viscosidad original de un producto hasta alcanzar los parámetros de aplicación recomendados, garantizando que el proceso no altere la funcionalidad ni las propiedades protectoras del recubrimiento final.

Desde una perspectiva química, el thinner no es una sustancia pura, sino una compleja mezcla de compuestos orgánicos volátiles cuya formulación varía según su uso comercial. Generalmente, está compuesto por hidrocarburos aromáticos como el tolueno y el xileno, además de alcoholes, cetonas, ésteres y hexano (Universidad Nacional Federico Villarreal, s.f.). Esta combinación de solventes orgánicos le confiere características distintivas, como una densidad aproximada entre 0.77 y 0.83 g/cm³, una alta volatilidad y una nula solubilidad en agua, propiedades que son críticas durante la fase de evaporación y formación de la película.

Tabla 2. Composición de thinner. Adaptado de *Identificación del riesgo ambiental en el manejo de thinner estándar en una fábrica de muebles*. (Razo, 2025), Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

INGREDIENTE	%
Tolueno	≥25 - ≤ 50
Acetona	≥10 - ≤ 25
Xilenos, mezcla de isómeros	≥10 - ≤ 15
Metanol	≤13
Metilisoamilcetona	≤9.5
n-Butanol	≤3
Propan-2-ol	≤3
n-Hexano	≤3
Metilisobutilcetona	≤3
Propionato de butilo	≤3
Metiletilcetona	≤3
Nafta disolvente (petróleo) fracción aromática pesada	≤3
Etilbenceno	≤1.8

En el contexto de la aplicación de recubrimientos, la función del thinner trasciende la simple dilución. Su presencia es fundamental para reducir la viscosidad del sistema, lo que facilita una aplicación uniforme y mejora el acabado superficial al permitir una mejor nivelación de la capa protectora. Asimismo, su capacidad solvente asegura la correcta humectación del sustrato metálico, promoviendo una adherencia óptima. Finalmente, debido a su alto poder de disolución, este material es ampliamente empleado en la limpieza de herramientas y equipos, asegurando la eliminación de residuos poliméricos en los procesos de pintado industrial.

En la investigación “Evaluación de la protección a la corrosión en el acero de refuerzo implementando recubrimientos a base de nanotubos de carbono adicionado con zinc NTC-Zn como protección catódica”, el thinner fue utilizado como un disolvente polar aprótico dentro de la formulación del recubrimiento anticorrosivo a base de nanotubos de carbono y zinc (NTC-Zn). Su función principal consistió en facilitar la dispersión del compuesto sin provocar procesos de oxidación, permitiendo así obtener una mezcla homogénea adecuada para su aplicación como esmalte protector sobre acero de refuerzo.

El procedimiento experimental consistió en mezclar inicialmente 5 ml de thinner con 0.5 g del compuesto NTC-Zn bajo agitación controlada, para posteriormente incorporar esmalte acrílico sellador y formar el recubrimiento anticorrosivo. La investigación señala que el uso de este solvente ayudó a mantener la estabilidad del compuesto durante el proceso de síntesis y aplicación del recubrimiento (Gómez, 2017).

2.8.2 Implicaciones ambientales del uso de solventes

El uso indiscriminado de solventes orgánicos en la industria de los recubrimientos representa uno de los desafíos ambientales más críticos y complejos de la actualidad. El thinner, lejos de ser un

insumo inerte, es una mezcla de hidrocarburos aromáticos, cetonas, ésteres y alcoholes cuya peligrosidad es multidimensional. Durante las etapas de aplicación y secado, estos compuestos se transforman en Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), los cuales actúan como precursores químicos de alta reactividad que fomentan la formación de ozono troposférico y aerosoles secundarios, degradando la calidad del aire y exacerbando el calentamiento global (Stockwell et al., 2021).

En sectores como la impresión, la limpieza de metales y la fabricación de pinturas, estas emisiones pueden representar hasta el 65% del total de contaminantes liberados a la atmósfera si no se gestionan adecuadamente. Al reaccionar con óxidos de nitrógeno bajo la radiación solar, no solo deterioran la capa de ozono, sino que generan riesgos carcinogénicos directos para las poblaciones en áreas de aplicación intensiva (Guía ISTAS, 2007). Esta severidad ha impulsado una fuerte presión regulatoria que incentiva la transición hacia tecnologías más limpias, como sistemas de captura por carbón activado o la sustitución por solventes de base agua que reducen la carga de sustancias tóxicas en los procesos productivos.

Sin embargo, la verdadera crisis de este material se manifiesta en su gestión líquida post-industrial. Datos de la SEMARNAT (2018) sugieren que los solventes representan un volumen masivo de los residuos peligrosos nacionales; no obstante, esta problemática se agrava por la informalidad en los sectores de mantenimiento. De acuerdo con García-García et al. (2023), existe un incumplimiento crítico de la normativa ambiental (específicamente la NOM-052-SEMARNAT-2005) en las micro y pequeñas empresas, donde predomina un manejo empírico de los residuos. Esta falta de conocimiento técnico y de protocolos de trazabilidad provoca que una fracción considerable de los solventes usados sea gestionada de forma inadecuada, terminando frecuentemente en vertederos

clandestinos o sistemas de alcantarillado municipal. Esta problemática se concentra en sectores específicos donde el mal manejo es una práctica cotidiana:

- **Industria de la Construcción:** La movilidad intrínseca de las obras civiles y la limpieza constante de equipos de aspersión y herramientas de aplicación generan volúmenes masivos de solventes residuales. Según la Environmental Protection Agency (EPA, 2005), la naturaleza temporal y dinámica de los sitios de construcción dificulta la implementación de protocolos de control específicos, lo que deriva en que estos desechos líquidos sean vertidos frecuentemente de forma directa al suelo o en sistemas de drenaje pluvial.
- **Sector Automotriz y Talleres de Repintado:** Es uno de los mayores focos de contaminación difusa. El thinner sucio, mezclado con restos de pintura y grasas, suele ser desechado en el drenaje municipal para evitar los costos de recolección especializada (García-García et al., 2023).
- **Industria de la Madera e Impresión:** El uso intensivo de diluyentes para lacas y lavado de rodillos resulta en un desperdicio por evaporación crítica y en la generación de lodos con metales pesados que terminan como desechos líquidos abandonados (Razo, 2025).

El impacto del vertido líquido de thinner y otros solventes es particularmente devastador para la infraestructura urbana y los ecosistemas hídricos. Debido a su baja tensión superficial, estos líquidos actúan como agentes de transporte que facilitan la infiltración de contaminantes hacia los mantos freáticos. Según Granada et ál., (2015) el desecho de estas sustancias químicas en el alcantarillado no solo degrada las tuberías por su naturaleza corrosiva, sino que inhibe los procesos biológicos en las plantas de tratamiento, dejando el agua inhabilitada para el consumo y aniquilando la microbiota del suelo encargada de los ciclos de regeneración natural (UNODC, 2012)."

Ante este escenario de contaminación persistente, la revalorización técnica del thinner deja de ser una opción secundaria para convertirse en una necesidad imperativa. La problemática actual demuestra que el simple confinamiento en vertederos no es una solución definitiva, sino una postergación del impacto. Por ello, la presente investigación propone la recuperación y reciclaje de solventes usados como una ruta crítica para mitigar esta emergencia. Al reintegrar el thinner recuperado en la formulación de recubrimientos anticorrosivos, se logra un doble beneficio: se reduce la demanda de recursos vírgenes derivados del petróleo y se garantiza el confinamiento seguro de una sustancia tóxica dentro de una matriz polimérica estable, transformando un pasivo ambiental peligroso en una herramienta de protección para la infraestructura civil.

Si bien los esfuerzos actuales apuntan hacia el desarrollo de solventes derivados de biomasa con menor huella de carbono, su implementación a gran escala aún requiere evaluaciones de ciclo de vida exhaustivas (Biomass-derived solvents, 2025). Mientras tanto, la reutilización controlada y el aprovechamiento de los residuos industriales existentes representan la respuesta más pragmática y responsable ante la crisis de durabilidad y sustentabilidad en la construcción moderna.

2.9 Sustentabilidad y durabilidad en infraestructura costera

La efectividad de un sistema anticorrosivo no depende únicamente de su composición química, sino del equilibrio entre sus componentes moleculares y el entorno de aplicación. En la ingeniería moderna, la protección de estructuras debe trascender la eficiencia técnica para considerar las implicaciones ambientales de su ciclo de vida: desde la producción hasta su disposición final. En este sentido, la interacción entre la matriz protectora —el polímero— y el medio que facilita su aplicación —el solvente— es el factor que determina tanto la durabilidad de la obra como la huella ambiental del sistema (Jones et ál., 2017).

Bajo esta premisa, la industria ha empleado tradicionalmente polímeros orgánicos derivados del petróleo, como epóxicos y poliuretanos. Sin embargo, estos materiales presentan limitaciones críticas de degradación frente a la radiación UV y el envejecimiento térmico. Como alternativa a estas carencias, los polímeros inorgánicos, específicamente las siliconas y polisiloxanos, han ganado relevancia por su estabilidad en ambientes agresivos. Su estructura de enlaces silicio-oxígeno les confiere una resistencia superior a la radiación solar y a climas extremos, gracias a la flexibilidad de su esqueleto siloxano y una baja tensión superficial que optimiza su desempeño industrial (Andriot et al., 2009).

Ahora bien, para que este polímero ejerza su función de barrera contra la humedad y los cloruros, su puesta en obra es fundamental. Es aquí donde el solvente adquiere un rol protagónico, pues permite ajustar la viscosidad y asegurar una dispersión uniforme sobre el sustrato. Mediante métodos como la aspersión o el rodillo, el solvente facilita la manejabilidad del sistema para luego evaporarse, permitiendo que la resina consolide la película protectora definitiva (Jones et ál., 2017).

No obstante, el uso de estos solventes conlleva una responsabilidad normativa que no siempre se cumple. En el caso de México, el manejo de sus residuos está estrictamente regulado por la NOM-052-SEMARNAT-2005. A pesar de este marco legal, la realidad operativa es distinta: diversas investigaciones señalan que el cumplimiento es irregular, especialmente en talleres y pequeñas industrias donde la gestión suele ser empírica y carece de protocolos ambientales formales (García-García et al., 2023).

Esta gestión deficiente resulta particularmente preocupante cuando los sistemas se aplican en ambientes marinos. En estas zonas, la combinación de salinidad y humedad extrema acelera la penetración de iones cloruro, provocando la corrosión prematura del acero de refuerzo en el concreto (Pachón, 2017). Por lo tanto, la durabilidad del recubrimiento no es solo una cuestión

estética, sino un pilar de la sostenibilidad: al prolongar la vida útil de la infraestructura, se reduce drásticamente el consumo de recursos y la energía necesaria para reparaciones constantes.

En respuesta a este doble desafío técnico y ambiental, surge la oportunidad de integrar solventes recuperados en sistemas basados en silicona. Esta estrategia se alinea con los principios de la economía circular, al reducir la generación de residuos peligrosos y la demanda de materia prima virgen. Así, al combinar la capacidad hidrofóbica de las siliconas con una gestión responsable de los insumos, es posible proteger eficazmente las estructuras frente a la corrosión mientras se minimiza el impacto ambiental a largo plazo (Andriot et al., 2009; Pachón, 2017).

2.10 Estado del arte y vacíos de conocimiento

La búsqueda de infraestructuras más resilientes ha llevado a la ciencia de materiales a explorar fronteras más allá de una simple protección. Actualmente, el estado del arte en recubrimientos anticorrosivos se enfoca en el desarrollo de sistemas de alta durabilidad que minimicen la huella de carbono. Investigaciones recientes han demostrado que los recubrimientos basados en polisiloxanos superan significativamente a las resinas orgánicas en ambientes marinos debido a su inercia química y resistencia a la fotodegradación (Zhang et al., 2024).

Por otro lado, la recuperación de disolventes ha ganado terreno como una estrategia fundamental dentro de los principios de la química verde y la economía circular. Diversos estudios han señalado que la reutilización de solventes residuales permite reducir el consumo de materias primas, disminuir la generación de residuos peligrosos y mejorar la sostenibilidad de los procesos industriales. Por ejemplo, en la investigación “Gestión de la recuperación de disolventes en una empresa farmoquímica” se analiza la recuperación de disolventes en la industria química y farmoquímica como una estrategia para optimizar procesos, reducir costos y disminuir el impacto ambiental. El estudio desarrolló metodologías y tecnologías de recuperación que permiten

reintroducir disolventes reutilizables a los procesos de manufactura, especialmente en la producción de APIs (ingredientes farmacéuticos activos).

El trabajo destaca que la simulación computacional y las herramientas de modelado químico son fundamentales para predecir el comportamiento de los balances de materia y energía, permitiendo evaluar tecnologías de recuperación sin necesidad de realizar pruebas experimentales costosas. Asimismo, se utilizaron herramientas de análisis de riesgos, como árboles de fallas y modelados de dispersión, fuego y explosión, para identificar posibles impactos derivados del manejo de solventes y mejorar la seguridad industrial.

Los resultados obtenidos mostraron avances importantes en la recuperación y valorización de disolventes. Se logró un cumplimiento del 75.5 % respecto al objetivo de incrementar la recuperación de solventes, además de un aumento del 47.8 % en la valorización de disolventes gastados vendidos a terceros. También se desarrollaron cuatro tecnologías de recuperación, superando ampliamente el objetivo inicial planteado. Sin embargo, la investigación señala que factores regulatorios y disminuciones en la producción limitaron parcialmente el uso de solventes recuperados en algunos procesos industriales.

Finalmente, el estudio concluye que una gestión integral de recuperación de disolventes puede contribuir significativamente a la sustentabilidad industrial, debido a que permite reducir la compra de solventes originales, minimizar residuos peligrosos y reincorporar materiales al ciclo productivo bajo principios de economía circular (González, 2017).

No obstante, la mayor parte de las investigaciones sobre recuperación de solventes se ha enfocado en su purificación para reincorporarlos en operaciones similares, como procesos de limpieza, extracción o síntesis química. En consecuencia, existe todavía un vacío en la literatura respecto a su posible aprovechamiento como insumo en nuevas formulaciones de materiales, particularmente en

sistemas de recubrimientos protectores (Aboagye, Chea & Yenkie, 2021). En el contexto latinoamericano, aunque existen esfuerzos por normar la gestión de residuos peligrosos en talleres y obras, la transición hacia una economía circular aplicada a la protección del concreto armado es aún incipiente (García-García et al., 2023).

El principal vacío de conocimiento identificado radica en la falta de caracterización del desempeño mecánico y químico de matrices inorgánicas (siliconas) cuando son diluidas con solventes de recuperación en condiciones de exposición costera real. No se cuenta con evidencia suficiente que valide si las impurezas traza presentes en el thinner recuperado afectan la capacidad de pasivación del acero. Por tanto, esta investigación se propone cerrar dicha brecha, evaluando si la revalorización de este residuo no solo es ambientalmente responsable, sino técnicamente viable para garantizar la durabilidad de la infraestructura frente a los cloruros.

CAPÍTULO 3. MARCO NORMATIVO Y AMBIENTAL

Este capítulo establece los lineamientos técnicos y legales que rigen la protección anticorrosiva, el diseño de ensayos de laboratorio y la gestión responsable de los insumos químicos utilizados en esta investigación.

3.1 Normatividad para corrosión y recubrimiento

Para garantizar la reproducibilidad y validez de los resultados, la selección y aplicación del recubrimiento, así como la evaluación de los especímenes, se fundamentan estándares internacionales.

3.1.1 Normas ISO aplicables

Clasificación del ambiente y durabilidad

La norma ISO 12944 es el referente global para la protección de estructuras de acero; esta norma proporciona criterios para identificar ambientes corrosivos en función de factores como humedad, presencia de sales y concentración de agentes contaminantes, permitiendo relacionar las condiciones del ensayo con categorías de corrosividad utilizadas internacionalmente. De esta manera, la norma sirve como referencia para evaluar el desempeño y durabilidad de los recubrimientos anticorrosivos aplicados a las varillas de prueba, así como para comparar los resultados obtenidos con otros estudios y sistemas de protección utilizados en ambientes marinos o altamente salinos. Para esta tesis, se toman como base las siguientes partes:

ISO 12944-2: Clasifica los ambientes de exposición. Esta investigación se enfoca en la categoría CX (Extrema), correspondiente a zonas tropicales de alta salinidad, y Im2 (Inmersión en agua de mar), condiciones que se simulan en el diseño experimental.

La normativa cubre dos categorías principales de corrosión, atmosférica y sumergida.

Atmosféricas

- C1 - Muy baja
- C2 – Baja
- C3 – Media
- C4 – Alta
- C5-I - Muy alta
- C5-M - Muy alta

- CX - Extrema: Está destinada a estructuras en alta mar y también a estructura en área industriales con humedad extrema, atmósferas agresivas, tropicales y subtropicales.

Sumergidas

- Im 1 - Agua dulce
- Im 2 - Agua de mar o salobre
- Im 3 – Tierra
- Im 4 - Agua de mar o salobre con protección catódica

ISO 12944-6: Define los ensayos de comportamiento en laboratorio. Es el sustento para utilizar pruebas de inmersión acelerada para validar la eficacia de los sistemas de pintura antes de su aplicación en campo.

3.1.2 Normas ASTM aplicables

El rigor científico del ensayo de corrosión acelerada desarrollado en esta investigación se sustenta en la aplicación de normativas ASTM reconocidas internacionalmente para la evaluación del comportamiento de metales y recubrimientos anticorrosivos en ambientes salinos controlados. Estas normas proporcionan lineamientos estandarizados que permiten garantizar la confiabilidad, repetibilidad y comparabilidad de los resultados obtenidos durante el estudio.

En particular, la norma ASTM G44 resulta de gran relevancia para la presente investigación, ya que establece un método de ensayo basado en ciclos alternados de inmersión y secado en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3.5 %, simulando condiciones similares a las que se presentan en ambientes marinos o altamente corrosivos. La selección de esta normativa permitió justificar el periodo de exposición de los especímenes, debido a que la combinación de humedad, oxígeno y

sales acelera los procesos electroquímicos de corrosión, generando condiciones más agresivas que las encontradas en ambientes naturales.

Gracias a esta metodología, fue posible evaluar en un menor tiempo la eficiencia y durabilidad de los recubrimientos anticorrosivos aplicados sobre las varillas de acero de refuerzo. Además, el uso de la ASTM G44 aporta validez técnica al estudio al definir parámetros específicos para el desarrollo del ensayo, como la concentración salina, los tiempos de exposición y los ciclos de inmersión-secado. Esto permite que los resultados obtenidos puedan compararse con otras investigaciones relacionadas con corrosión acelerada y desempeño de recubrimientos protectores en estructuras metálicas expuestas a medios salinos.

ASTM G44 (Eje central del experimento): “Práctica estándar para la exposición de metales y aleaciones mediante inmersión alternada en una solución neutra de cloruro de sodio al 3,5 %”; establece un método de ensayo para evaluar la resistencia a la corrosión de metales y aleaciones mediante ciclos alternados de inmersión y secado en una solución neutra de cloruro de sodio al 3.5 %, simulando condiciones típicas de ambientes marinos.

El ensayo de inmersión alternada consiste en ciclos de una hora, donde las probetas permanecen 10 minutos sumergidas en una solución acuosa de cloruro de sodio al 3,5 % y posteriormente 50 minutos fuera de la solución, permitiendo su secado. Este ciclo se repite continuamente durante 24 horas al día por el número de días establecido según el material evaluado. Generalmente, las aleaciones de aluminio y los materiales ferrosos se someten a exposición entre 20 y 90 días o más, dependiendo de su resistencia a la corrosión en ambientes salinos.

3.2 Normatividad para concreto en ambientes marinos

El análisis principal de esta investigación se enfoca en el uso de recubrimientos aplicados sobre varillas de acero de refuerzo expuestas a ambientes agresivos, particularmente ambientes salinos, donde el material se encuentra vulnerable al ataque de iones cloruro, uno de los principales agentes responsables del proceso de corrosión. Dentro del contexto del concreto armado, esta problemática representa un factor importante en la disminución de la durabilidad y vida útil de las estructuras.

En complemento al análisis de corrosión y al comportamiento de los recubrimientos anticorrosivos, se consideraron diversas normativas como apoyo técnico para comprender las condiciones de desempeño y durabilidad del concreto expuesto a ambientes agresivos. Estas referencias permitieron contextualizar el comportamiento del acero de refuerzo y las condiciones de exposición dentro de sistemas de concreto armado.

1. NMX-C-414-ONNCCE: Esta norma establece las especificaciones y métodos de ensayo para cementantes hidráulicos usados en la construcción. Dentro de esta normativa se definen clasificaciones por componentes y resistencia, límites químicos, tiempos de fraguado y pruebas de calidad para garantizar su correcta aplicación y resistencia.
2. ACI 318-19 (Capítulo 19): Define los requisitos de diseño y durabilidad para concreto armado; incluye aspectos como materiales, proporciones de mezcla, exposición ambiental y protección contra corrosión, para asegurar el desempeño y vida útil de las estructuras de concreto armado.

3.3 Regulación ambiental relacionada con solventes

Debido a que la investigación contempla el uso y recuperación de solventes, resulta fundamental considerar el cumplimiento del marco legal ambiental mexicano, promoviendo así el

aprovechamiento responsable de estos residuos y su reincorporación como recursos dentro de un enfoque de sustentabilidad.

3.3.1 Gestión de residuos peligrosos

Como complemento al análisis experimental de los recubrimientos anticorrosivos, también se consideraron diversas normativas ambientales y de gestión de residuos como referencia para comprender el manejo, reutilización y disposición de solventes utilizados durante la investigación, particularmente el thinner empleado como parte del sistema de recubrimiento.

La inclusión de estas normativas permitió abordar el uso de solventes desde una perspectiva de sustentabilidad, considerando no solo su función dentro de la formulación del recubrimiento, sino también los posibles impactos ambientales asociados a su manejo y generación de residuos.

1. NOM-052-SEMARNAT: Norma mexicana que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y listado de los residuos peligrosos. Su finalidad es determinar cuáles residuos representan un riesgo para la salud y el medio ambiente debido a propiedades como toxicidad, inflamabilidad, corrosividad o reactividad.
2. NOM-161-SEMARNAT-2011: Esta norma establece los criterios para clasificar los residuos de manejo especial y determina cuáles deben sujetarse a un plan de manejo, con el fin de regular su adecuada gestión y prevenir impactos ambientales y riesgos a la salud.
3. La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR): Es el marco legal federal que regula la prevención, manejo y disposición final de los residuos en México. Establece las responsabilidades de los generadores y autoridades, y promueve una gestión integral orientada a minimizar impactos ambientales y proteger la salud pública.

4. NOM-054-SEMARNAT-1993: Esta norma regula la incompatibilidad entre residuos, esto asegura que la combinación del polímero con el thinner no genere reacciones violentas, garantizando la seguridad en la fabricación de los recubrimientos R1 y R2.

3.4 Revalorización de solventes y economía circular

La transición de un modelo lineal basado en extraer, usar y desechar hacia un modelo de economía circular constituye uno de los ejes principales de esta investigación. En México, este enfoque no solo representa una propuesta orientada a la sustentabilidad, sino que también cuenta con respaldo legal a través de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). Dicha ley establece la valorización de residuos como una prioridad, promoviendo que estos dejen de considerarse un desecho final y sean aprovechados nuevamente como recursos potenciales dentro de los ciclos productivos, bajo criterios de eficiencia, responsabilidad ambiental y aprovechamiento sostenible.

Con el propósito de que esta revalorización sea técnica y ambientalmente viable, la investigación se desarrolla bajo un marco normativo que garantiza tanto la seguridad del proceso como la integridad del material obtenido. En primer lugar, el solvente utilizado (thinner) es identificado y clasificado mediante la NOM-052-SEMARNAT-2005, normativa que permite determinar sus características de peligrosidad. Esta clasificación evidencia la necesidad de recuperar y reutilizar el solvente, evitando que se convierta en un contaminante ambiental derivado de una disposición inadecuada.

Posteriormente, resulta indispensable asegurar la compatibilidad y seguridad de los materiales empleados durante la formulación de los recubrimientos. Para ello, se considera la NOM-054-SEMARNAT-1993, la cual establece el procedimiento para evaluar la incompatibilidad entre residuos peligrosos. Su aplicación dentro de la fase experimental permite verificar que la combinación del

polímero inorgánico con el thinner recuperado no genere reacciones químicas inestables, garantizando así un proceso de fabricación seguro y controlado.

De manera complementaria, la estrategia de aprovechamiento y reincorporación de los solventes recuperados se apoya en la NOM-161-SEMARNAT-2011, normativa que funciona como guía para la clasificación y manejo integral de estos insumos. Gracias a ello, materiales que comúnmente serían desechados pueden reincorporarse legal y técnicamente como materia prima en la elaboración de los recubrimientos R1 y R2, fortaleciendo el enfoque de economía circular aplicado en esta investigación.

En conjunto, este enfoque permite reducir la brecha entre la durabilidad industrial y la preservación ambiental. Al someter un material proveniente del reciclaje a las estrictas condiciones de evaluación establecidas por la norma ASTM G44, se demuestra que la economía circular no compromete el desempeño técnico; por el contrario, puede generar soluciones anticorrosivas de alto desempeño con un menor impacto ambiental. De esta manera, el uso de solventes recuperados deja de percibirse únicamente como una alternativa de bajo costo y se consolida como una estrategia innovadora para la protección de infraestructura expuesta a ambientes agresivos, particularmente en zonas costeras, contribuyendo al mismo tiempo a la reducción de la huella ambiental del proceso constructivo e industrial.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 Diseño de la investigación

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, cuantitativo y aplicado, con el objetivo de evaluar el desempeño anticorrosivo de recubrimientos formulados a partir de silicona y

thinner reutilizado, aplicados sobre acero de refuerzo expuesto a condiciones simuladas de ambiente marino.

El carácter experimental de la investigación se fundamenta en la manipulación controlada de variables asociadas a la formulación de los recubrimientos, así como en la evaluación de su respuesta frente a un medio corrosivo mediante técnicas electroquímicas. Por su parte, el enfoque cuantitativo permitió medir parámetros electroquímicos como la densidad de corriente de corrosión, el potencial de corrosión y la impedancia del sistema, los cuales constituyen indicadores directos del nivel de protección anticorrosiva.

Asimismo, la investigación es de tipo aplicado, debido a que busca generar una alternativa sustentable mediante la reutilización de residuos peligrosos (thinner), incorporándolos como componente funcional en sistemas de recubrimiento con potencial aplicación en el sector de la construcción.

El diseño experimental adoptado fue de tipo comparativo, en el cual se evaluaron distintas formulaciones de recubrimientos, incluyendo un sistema sin recubrimiento (testigo) y sistemas modificados (REC1 y REC2), con el fin de analizar la influencia de la composición sobre el comportamiento anticorrosivo.

La investigación se desarrolló de manera secuencial en varias etapas bien definidas, desde la preparación inicial hasta el análisis final de resultados.

Primero se seleccionaron varilla de acero de refuerzo, las cuales fueron sometidas a un proceso de limpieza superficial para eliminar contaminantes, óxidos y residuos que pudieran afectar la adherencia del recubrimiento o interferir con las mediciones electroquímicas.

A continuación, se prepararon dos tipos de recubrimiento experimental (REC 1 y REC 2) usando silicón como matriz polimérica y thinner reutilizado como solvente, en donde se variaron las proporciones para explorar diferentes configuraciones. Estos recubrimientos se aplicaron uniformemente sobre las probetas, controlando el espesor y la homogeneidad para asegurar resultados reproducibles.

Una vez que se aplicaron los recubrimientos, las probetas se sometieron a un proceso de consolidación, durante el cual se permitió la evaporación del solvente y la formación de una película continua y adherente. Esta etapa es fundamental para el desarrollo de las propiedades del recubrimiento, tales como su cohesión interna, adherencia al sustrato y resistencia a la barrera contra agentes agresivos, sentando las bases para las pruebas de durabilidad y resistencia.

Las probetas recubiertas fueron sometidas a un sistema de exposición cíclica en solución salina, alternando periodos de inmersión y secado, con el propósito de reproducir condiciones agresivas características de la zona de salpicadura marina.

Finalmente, el comportamiento anticorrosivo de los dos sistemas de recubrimiento fue evaluado mediante técnicas electroquímicas, específicamente curvas de polarización potenciodinámica (CPP), resistencia a la polarización lineal (LPR) y espectroscopía de impedancia electroquímica (PEIS), permitiendo cuantificar la resistencia a la corrosión de cada sistema. Los resultados obtenidos fueron analizados de manera comparativa, con el fin de identificar la formulación más eficiente en términos de protección anticorrosiva, así como evaluar la viabilidad del uso de thinner reutilizado dentro del sistema de recubrimiento.

4.2 Materiales empleados

Los materiales utilizados en esta investigación fueron seleccionados en función de los requerimientos establecidos para la preparación, aplicación y evaluación de los recubrimientos anticorrosivos. Asimismo, se consideraron sus características técnicas y su influencia en el comportamiento electroquímico y la protección del acero de refuerzo.

4.2.1 Acero de refuerzo

Las varillas de acero utilizadas en este trabajo corresponden a varillas corrugadas de acero al carbono grado 42 de tipo comercial, seleccionadas debido a su amplio empleo en estructuras de concreto reforzado, donde su geometría superficial favorece la unión mecánica con el concreto. Además de sus propiedades mecánicas, este material presenta susceptibilidad a fenómenos de corrosión cuando es expuesto a ambientes agresivos, lo que permitió analizar el desempeño y la capacidad protectora de los recubrimientos aplicados.

Las varillas empleadas presentan grabados superficiales de identificación correspondientes al fabricante, grado y designación comercial del material, permitiendo su trazabilidad y verificación conforme a los requerimientos establecidos en las normas NMX-B-457-CANACERO y ASTM A615/A706 para acero de refuerzo corrugado. Dichas normativas establecen criterios relacionados con propiedades mecánicas, composición química, dimensiones y sistema de identificación marcado sobre la superficie de la varilla, garantizando así la calidad y especificación del material utilizado en la investigación.

A continuación, se presenta una tabla con las especificaciones técnicas y propiedades mecánicas de la varilla corrugada empleada durante el desarrollo experimental del proyecto.

Tabla 3. Especificaciones Técnicas Varilla Corrugada 3/8" (No. 3). Elaboración propia con información recopilada de normas técnicas y literatura especializada (ASTM A615/A615M; NMX-B-457-CANACERO).

CONCEPTO	ESPECIFICACIÓN
Tipo	Varilla corrugada de acero al carbono
Designación	No. 3
Diámetro nominal	3/8" (9.5 mm)
Área transversal	0.71 cm ²
Peso unitario	0.56 kg/m
Longitud comercial	6.72 kg
Peso por varilla (12 m)	12m
Límite de fluencia (Grado 42)	420 MPa
Resistencia a la tensión mínima	630-700 MPa
Elongación mínima	9-12%
Normatividad aplicable	NMX-B-457-CANACERO/ASTM A615/A706
Usos comunes	Castillo, dallas, losas y estribos

Tabla 4. Composición química del acero de refuerzo. Elaboración propia con información recopilada de normas técnicas y literatura especializada (ASTM A615/A615M; NMX-B-457-CANACERO).

ELEMENTO QUÍMICO	PORCENTAJE MÁXIMO (%) – ANÁLISIS DE COLADA	PORCENTAJE MÁXIMO (%) – ANÁLISIS DE PRODUCTO
Carbono (C)	0.30	0.33
Manganeso (Mn)	1.50	1.56
Fósforo (P)	0.035	0.043
Azufre (S)	0.045	0.053
Silicio (Si)	0.50	0.55
Normatividad aplicable	ASTM NMX B-457-CANACERO	



Figura 9. Varilla corrugada 3/8" grado 42. Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Recubrimientos anticorrosivos

La formulación de los recubrimientos se realizó a partir de la combinación de dos componentes principales: el solvente (thinner) y el soluto (silicón). A partir de diferentes pruebas de formulación, en las que se evaluaron propiedades como consistencia, fluidez y capacidad de disolución del silicón, fue posible definir dos recubrimientos con las características y condiciones adecuadas para su aplicación sobre las varillas de acero.

El thinner empleado no solo cumplió una función técnica dentro de la preparación de los recubrimientos, sino que también representó el principal elemento de revalorización ambiental considerado en esta investigación. Las proporciones utilizadas se apartaron de las recomendaciones convencionales de dilución, con el propósito de incrementar el aprovechamiento y reutilización del residuo solvente sin comprometer las propiedades de aplicación del sistema formulado. Las composiciones empleadas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Formulación de los recubrimientos evaluados.

RECUBRIMIENTO	PROPORCIÓN
REC 1	0.6 g de silicón / 25 ml de thinner
REC 2	0.6 g de silicón / 12 ml de thinner.

El recubrimiento REC1 se formuló a partir de una silicona blanca de grado comercial, idónea para áreas expuestas a humedad constante. Se seleccionó por su contenido de aditivos fungicidas y su elevada capacidad hidrofóbica, propiedades que le permiten resistir condiciones de alta humedad y exposición continua al vapor. Por ello, resulta apropiada para simular ambientes agresivos similares a los marinos, donde la presencia de agua y sales acelera los procesos de corrosión.

Técnicamente, la formulación REC1 presenta una relación de dilución alta diseñada para evaluar la capacidad de la matriz polimérica inorgánica de incorporar y estabilizar grandes volúmenes de solvente residual sin perder su facultad de formar una película continua. Este enfoque provoca una sobresaturación controlada del sistema, reduciendo notablemente la viscosidad de la mezcla y mejorando la humectación y penetración sobre la superficie metálica.

En contraste, el recubrimiento REC2 se formuló con silicona transparente de grado comercial. Esta matriz destaca por su versatilidad de adhesión en superficies lisas y por su estabilidad en interiores y exteriores. A diferencia de REC1, REC2 está libre de pigmentos y aditivos específicos, lo que permite evaluar el comportamiento de una matriz polimérica más pura frente a la corrosión y usarla como referencia para medir la influencia de los aditivos en el desempeño anticorrosivo. Además, la consistencia más líquida de esta silicona requirió una menor cantidad de diluyente (thinner) en comparación con REC1.

En conjunto, esta estrategia tuvo como objetivo analizar la viabilidad de reintegrar cantidades significativas de solventes residuales en sistemas de recubrimiento bajo un enfoque de economía circular. Además de preservar la integridad estructural y la protección anticorrosiva, la propuesta busca valorizar residuos peligrosos mediante su incorporación controlada en aplicaciones de protección, sin comprometer la estabilidad electroquímica del recubrimiento.

4.3 Equipo de medición

El equipo utilizado en las pruebas electroquímicas fue seleccionado con base en su capacidad para garantizar mediciones precisas, repetibles y representativas del comportamiento corrosivo del sustrato en estudio. Asimismo, se consideraron aspectos como su confiabilidad, sensibilidad, rango de operación y compatibilidad con las metodologías experimentales empleadas.

4.3.1 Potenciometro/Galvanostato

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el potenciostato/galvanostato SP-150 de BioLogic, un equipo de sobremesa diseñado para realizar mediciones electroquímicas controladas y de alta precisión. Su función principal consiste en imponer y controlar un potencial (modo potenciostático) o una corriente (modo galvanostático) entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo, mientras registra la respuesta eléctrica del sistema. Esto permite caracterizar fenómenos electroquímicos como procesos de transferencia de carga, corrosión y almacenamiento de energía, entre otros (BioLogic, 2024).

Entre sus principales características destacan su amplio rango de operación y alta resolución; el equipo cuenta con capacidad nativa para realizar Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) en un amplio rango de frecuencias, incorporando indicadores de calidad que contribuyen a validar la confiabilidad de las mediciones obtenidas (BioLogic, 2024).

En esta investigación, el equipo fue empleado principalmente para la realización de pruebas de resistencia a la polarización lineal (LPR), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y curvas de polarización tipo Tafel. En las pruebas de LPR, el SP-150 permitió aplicar pequeñas perturbaciones de potencial alrededor del potencial de circuito abierto (OCP) y registrar con precisión la corriente resultante, lo que hizo posible calcular la resistencia a la polarización (R_p) y estimar las tasas de corrosión del sistema evaluado.

Por otra parte, en las pruebas de espectroscopía de impedancia electroquímica, el equipo permitió analizar la respuesta en frecuencia del sistema y generar diagramas de Nyquist y Bode, facilitando el estudio de procesos resistivos, capacitivos y de difusión presentes en la interfaz electroquímica. De igual manera, mediante el uso de circuitos equivalentes, fue posible ajustar modelos

electroquímicos como R_s , R_{ct} y Cdl/CPE , permitiendo obtener parámetros relevantes para la interpretación del comportamiento corrosivo de las muestras.

Finalmente, para las curvas de polarización y el análisis de Tafel, el SP-150 controló barridos potenciodinámicos y registró corrientes con la resolución necesaria para obtener las pendientes anódicas y catódicas (β_a y β_c), así como la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}).

4.3.2 Software EC-Lab

El control experimental y el análisis de datos del equipo SP-150 se realiza mediante el software EC-Lab de BioLogic, el cual permite programar los métodos experimentales, adquirir datos en tiempo real y efectuar análisis integrados, incluyendo la generación de diagramas de Bode y Nyquist, el ajuste de circuitos equivalentes mediante Z-Fit, la corrección iR y el ajuste de curvas de Tafel (BioLogic, 2024).

En términos simples, el programa funciona como el “centro de mando” del equipo: desde ahí se definen los parámetros del experimento, se selecciona la técnica electroquímica, se inicia la medición y luego se analizan los datos obtenidos. Además, integra herramientas de visualización y ajuste que permiten trabajar directamente con diagramas de Bode y Nyquist, así como con modelos de circuitos equivalentes, sin necesidad de exportar los datos a otro software (BioLogic, 2024).

El programa funciona como la interfaz entre el usuario y el equipo electroquímico. A través de EC-Lab se definen los parámetros de cada ensayo, como el tipo de técnica, el rango de potencial o corriente, la amplitud de la perturbación, el tiempo de estabilización y las condiciones de adquisición de datos; posteriormente, el software envía estas instrucciones al potenciostato y registra en tiempo real la respuesta del sistema. Además, EC-Lab permite construir secuencias experimentales complejas mediante la vinculación de distintas técnicas dentro de un mismo protocolo, lo que facilita la automatización y la reproducibilidad de los ensayos (BioLogic, 2024).

En este trabajo, EC-Lab fue utilizado para llevar a cabo resistencia a la polarización lineal, espectroscopía de impedancia electroquímica, curvas de polarización y ajuste de pendientes de Tafel. En el caso de la EIS, el software permite representar los resultados en diagramas de Bode y Nyquist, así como ajustar los datos a circuitos equivalentes para interpretar el comportamiento resistivo, capacitivo y difusivo del sistema. Para las curvas de polarización y el análisis de Tafel, el programa facilita la obtención de barridos potenciodinámicos y el tratamiento matemático de las regiones lineales necesarias para estimar parámetros como el potencial de corrosión, la densidad de corriente de corrosión y las pendientes anódica y catódica.

4.3.3 Electrodo de referencia

El electrodo de referencia de calomelano saturado (ECS) es un electrodo ampliamente utilizado en mediciones electroquímicas debido a su potencial estable y reproducible. Su función principal es servir como punto de comparación para medir el potencial del electrodo de trabajo durante los ensayos, permitiendo así obtener resultados confiables y comparables entre diferentes mediciones. En este estudio, su uso fue fundamental para controlar y registrar con precisión la respuesta electroquímica de las muestras evaluadas (BenchChem Technical Support Team, 2026).

El principio de funcionamiento del electrodo de calomelano saturado se basa en el equilibrio entre mercurio líquido, cloruro mercurioso y una solución saturada de cloruro de potasio. Esta combinación genera un potencial de referencia prácticamente constante, lo que reduce la variación asociada a la medición del potencial en la celda electroquímica. Gracias a esta estabilidad, el ECS se considera una referencia adecuada para técnicas como resistencia a la polarización lineal, espectroscopía de impedancia electroquímica y curvas de polarización (Ahmad, 2006, p. 33).

En el contexto de este trabajo, el electrodo de referencia permitió establecer una base común para comparar la respuesta electroquímica de los sistemas evaluados bajo las mismas condiciones

experimentales. Su empleo aseguró que los valores obtenidos en las pruebas fueran consistentes y permitieran un análisis más preciso del comportamiento corrosivo de los recubrimientos estudiados.

4.4 Preparación de especímenes y aplicación de recubrimiento

La preparación del acero se realizó siguiendo rigurosamente la norma ASTM G1, considerando que la adherencia de un recubrimiento con alta carga de solvente depende en gran medida de la limpieza y del acondicionamiento adecuado de la superficie. Se utilizaron varillas de acero Grado 42, cortadas a una longitud estándar de 10 cm. Esta longitud se eligió para conservar una sección metálica suficientemente continua que garantizara una buena conductividad eléctrica durante las pruebas, evitando efectos de borde excesivos y obteniendo mediciones más estables, representativas y reproducibles entre muestras.

Tras el corte, se eliminó la capa de óxido superficial y las rebabas generadas en el proceso mecánico. Posteriormente, las varillas se sometieron a limpieza en un baño ultrasónico utilizando un limpiador ultrasónico Cavitator de Mettler Electronics Corp., empleando alcohol etílico como medio de limpieza durante un tiempo de 15 minutos. Este procedimiento tuvo como finalidad remover contaminantes finos, partículas residuales y posibles impurezas alojadas en los microporos de la superficie metálica. Una vez concluida la limpieza, las muestras se secaron mediante una pistola de calor para eliminar la humedad remanente. Esta etapa de acondicionamiento superficial resultó fundamental para favorecer el anclaje mecánico del recubrimiento de silicón y minimizar la influencia de contaminantes, grasas o residuos que pudieran afectar el desempeño anticorrosivo.

Una vez acondicionadas, el área de exposición se delimitó mediante tubería termocontráctil (Termofit) colocada en los extremos de cada varilla. De esta forma se definió una superficie activa constante para todas las probetas de aproximadamente 3 cm, lo que facilitó la comparación directa entre el testigo sin recubrimiento y las muestras protegidas con los sistemas REC1 y REC2.

Finalmente, se prepararon cinco muestras por cada tipo de recubrimiento (REC1, REC2 y acero sin recubrimiento como muestra testigo). Dos de ellas se destinaron a ensayos de exposición bajo la norma ASTM G44, para simular un ambiente marino; una funcionó como réplica para verificar la repetibilidad del comportamiento anticorrosivo. Otras dos muestras se utilizaron en las pruebas de curvas de polarización, destinadas al análisis electroquímico detallado; nuevamente, una se consideró réplica para confirmar la consistencia de los valores de corrosión obtenidos. La quinta muestra se reservó como control para inspección visual o posibles ensayos complementarios.

Previo a la aplicación de los recubrimientos, se realizó la formulación de las mezclas utilizando una báscula científica marca Controls para determinar las proporciones correspondientes de thinner y silicón. Posteriormente, ambos componentes fueron colocados en vasos de precipitados y sometidos a agitación mediante un agitador magnético Thermo Scientific–Cimarec equipado con barras de agitación, con el objetivo de favorecer la integración homogénea del silicón con el solvente y obtener la consistencia requerida para cada sistema de recubrimiento.

Una vez alcanzada una adecuada disolución y homogeneización de las formulaciones correspondientes a REC1 y REC2, las varillas fueron recubiertas mediante inmersión directa en las soluciones preparadas, utilizando como límite de aplicación la zona delimitada previamente con tubería termocontráctil (Termofit). La elevada fluidez de las mezclas favoreció la auto-nivelación del recubrimiento sobre la superficie metálica, permitiendo una distribución uniforme y continua sobre el área activa expuesta.

Posteriormente, todos los especímenes recubiertos se sometieron a un periodo de secado de 24 horas a temperatura ambiente antes de iniciar cualquier evaluación experimental. Este tiempo permitió la evaporación del exceso de solvente y la consolidación de la matriz polimérica del silicón,

asegurando la estabilidad y adherencia del recubrimiento antes de su exposición a los medios corrosivos y a las pruebas electroquímicas.



Figura 10. Especímenes de recubrimiento REC1 (color verde) y REC2 (color amarillo).

4.5 Simulación de ambiente marino

Para reproducir las condiciones agresivas características de la zona de salpicadura marina, se implementó un sistema de exposición cíclico húmedo-seco basado en los lineamientos establecidos en la norma ASTM G44, empleando un electrolito controlado y un dispositivo mecánico diseñado específicamente para este estudio.

La confiabilidad del ensayo dependió en gran medida de la preparación adecuada de la solución corrosiva utilizada como medio de exposición. Para ello, inicialmente se pesaron 35 g de cloruro de sodio (NaCl) grado analítico mediante una balanza de precisión, con el propósito de obtener una concentración representativa de las condiciones presentes en ambientes marinos.

Posteriormente, el NaCl se disolvió en 1 L de agua destilada, utilizada como medio base para evitar interferencias asociadas a impurezas o minerales presentes en agua no tratada. La mezcla fue sometida a agitación continua mediante un agitador magnético y una barra de agitación, hasta alcanzar la completa disolución del soluto y obtener una solución homogénea y transparente.

La solución preparada correspondió a una concentración de 3.5 % en peso, valor característico de la salinidad promedio del agua de mar, permitiendo simular de manera representativa las condiciones de exposición marina.

Con el fin de reproducir las condiciones reales presentes en la zona de salpicadura, se diseñó un sistema experimental capaz de someter las probetas a ciclos alternados de inmersión y secado, tal como se muestra en la Figura 11.

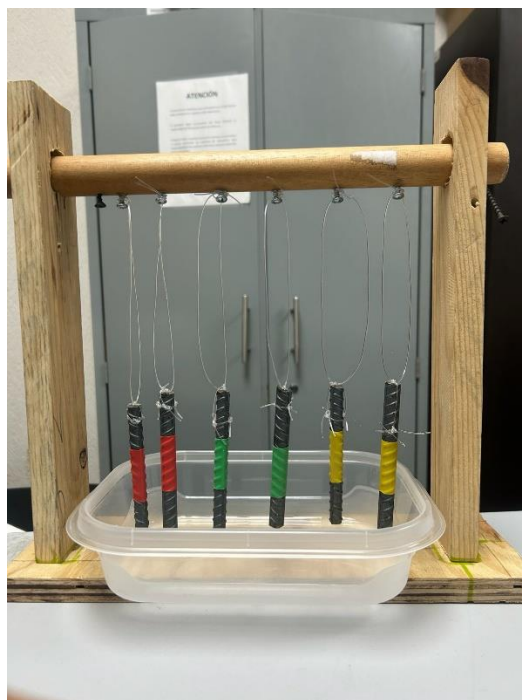


Figura 11. Sistema experimental para exposición de especímenes.

El sistema consistió en una estructura de soporte fabricada en madera, equipada con un eje horizontal giratorio (rodillo), del cual se suspendieron las probetas de acero mediante hilos de sujeción. En la parte inferior se colocó un recipiente que contenía la solución salina previamente preparada. El mecanismo operó mediante la rotación manual del eje, permitiendo alternar la posición de los especímenes entre dos condiciones de exposición.

Para la fase de inmersión, las probetas fueron sumergidas en la solución de NaCl durante un periodo de 10 minutos, favoreciendo la absorción de humedad y la penetración de iones cloruro en el sistema recubrimiento-metal.

Posteriormente, las probetas fueron elevadas y expuestas para exponerlas al ambiente durante 50 minutos. Durante esta etapa, la evaporación del agua incrementa la concentración de sales sobre la superficie, promoviendo procesos de corrosión más agresivos. Este tipo de exposición cíclica reproduce de manera representativa los fenómenos presentes en ambientes marinos, donde los materiales están sujetos a humectación intermitente, evaporación y concentración salina, condiciones críticas para la degradación de recubrimientos.

Adicionalmente, el sistema permitió mantener condiciones homogéneas para todas las probetas, controlar los tiempos de exposición de manera reproducible y minimizar variaciones experimentales entre muestras. El ciclo completo de exposición tuvo una duración de 60 minutos (10 minutos de inmersión y 50 minutos de secado), repitiéndose de forma continua durante un periodo de 20 días.

Se emplearon réplicas de cada tipo de recubrimiento (testigo, REC1 y REC2), con el objetivo de asegurar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados, descartando comportamientos aislados y permitiendo un análisis comparativo consistente.

4.6 Configuración experimental y técnicas electroquímicas

La evaluación del desempeño anticorrosivo de los recubrimientos se llevó a cabo mediante técnicas electroquímicas, que permiten analizar la interacción entre el sustrato metálico, el recubrimiento y el medio corrosivo, así como cuantificar la velocidad de degradación del material. En este estudio se emplearon técnicas complementarias: espectroscopía de impedancia electroquímica (PEIS), resistencia a la polarización lineal (LPR) y curvas de polarización potenciodinámica (CPP). Adicionalmente, se determinó el potencial de circuito abierto (OCP) como parámetro de referencia y como indicador complementario del estado electroquímico del sistema.

Las mediciones se realizaron con un potenciostato/galvanostato de alta resolución BioLogic, modelo SP-150, operado mediante el software especializado EC-Lab de BioLogic. Para las pruebas se utilizó una celda electroquímica estándar de tres electrodos: como electrodo de trabajo se empleó una varilla de acero grado 42; el electrodo de referencia fue un electrodo de calomel saturado, elegido por su potencial estable y reproducible; y como contraelectrodo se utilizó una barra de grafito de alta pureza para cerrar el circuito de corriente. Esta configuración permitió obtener mediciones precisas y comparables entre las distintas técnicas, garantizando una caracterización robusta del comportamiento anticorrosivo de los recubrimientos evaluados.

Previo a la aplicación de las técnicas electroquímicas, se determinó el potencial de circuito abierto de los especímenes con el objetivo de establecer una condición de referencia para los ensayos y obtener información sobre el estado electroquímico del sistema. La medición se realizó con un multímetro digital, conectando la terminal positiva al electrodo de trabajo (varilla de acero de refuerzo) y la terminal negativa al electrodo de referencia, que en este caso fue un electrodo de calomel saturado. Antes de cada ensayo se llevó a cabo un periodo de monitoreo del potencial bajo condiciones de reposo para permitir su estabilización y aproximar el sistema a un estado de

equilibrio electroquímico; el valor registrado al final de este periodo, expresado en milivoltios (mV), se consideró representativo del potencial de circuito abierto.

Para las técnicas electroquímicas, el potenciómetro usado se conectó mediante tres cables principales, cada uno con una función específica en la celda de tres electrodos: el cable del electrodo de trabajo, el cable del electrodo de referencia y el cable del contraelectrodo (también llamado electrodo auxiliar).

El cable del electrodo de trabajo se conecta a la muestra que se desea estudiar en este caso, la varilla de acero de refuerzo y es por donde el potenciómetro aplica el potencial programado y mide la corriente que fluye a través de la superficie de la muestra; esta corriente es la que refleja la velocidad de las reacciones de corrosión. El cable del electrodo de referencia se conecta al electrodo de referencia (electrodo de calomel saturado) y sirve para medir el potencial del electrodo de trabajo con gran precisión sin pasar corriente por él, de modo que el potencial de referencia permanezca estable y no se polarice durante la medición. El cable del contraelectrodo se conecta a la barra de grafito de alta pureza y completa el circuito de corriente: es por este electrodo por donde entra o sale la corriente necesaria para mantener el potencial establecido entre el trabajo y la referencia, sin afectar el potencial de referencia.

Esta disposición asegura que el potenciómetro pueda mantener el potencial deseado entre el trabajo y la referencia mientras controla la corriente a través del contraelectrodo, lo cual es esencial para obtener datos reproducibles en PEIS, LPR y curvas de polarización.

Adicionalmente, los parámetros empleados en las técnicas electroquímicas se seleccionaron con base en valores comúnmente utilizados para este tipo de ensayos, ya que permiten evaluar el comportamiento corrosivo del sistema de manera controlada, reproducible y sin perturbarlo de

forma excesiva. En particular, este tipo de configuraciones se emplea de manera habitual en pruebas electroquímicas porque facilita la obtención de respuestas representativas del material, especialmente cuando se trabaja con pequeñas variaciones alrededor del potencial natural del sistema y se busca estimar su tendencia a la corrosión. De igual forma, el uso de un potencial de referencia como el OCP y la aplicación de rangos de medición moderados responden a prácticas ampliamente aceptadas en este tipo de análisis, pues los parámetros no son universales, sino que se ajustan de acuerdo con el material, el medio de exposición y el objetivo específico del ensayo.

Para la técnica de resistencia a la polarización lineal (LPR), la medición se configuró en EC-Lab de BioLogic mediante un barrido muy pequeño alrededor del potencial de circuito abierto, con el fin de perturbar lo menos posible el sistema y obtener una estimación de su comportamiento corrosivo en condiciones cercanas al equilibrio. En esta prueba se aplicó una velocidad de barrido de 10 mV/min, iniciando desde -0.030 V respecto al OCP (potencial de circuito abierto) y finalizando en $+0.030$ V respecto al OCP, lo que permitió analizar la respuesta lineal del material en una ventana de potencial estrecha. Además, se configuró un rango de potencial de -2.5 V a 2.5 V y se seleccionó un ancho de banda de nivel 7, correspondiente a una respuesta rápida, para optimizar la adquisición de datos. En conjunto, estos parámetros permitieron evaluar con precisión la tendencia del acero a polarizarse y, por tanto, su susceptibilidad a la corrosión en el medio de ensayo.

Por otro lado, para realizar el análisis de espectroscopia de impedancia electroquímica (PEIS) se aplicó una señal sinusoidal de baja amplitud de 10 mV alrededor del potencial de circuito abierto (OCP). En términos prácticos, esto significa que el material fue perturbado de manera muy suave, evitando modificar o dañar su superficie durante la medición. Este tipo de señal es suficiente para obtener información confiable sobre el comportamiento electroquímico del sistema sin alterar sus condiciones naturales.

El estudio se realizó en un rango de frecuencias desde 100 kHz hasta 0.1 Hz. Trabajar con frecuencias altas y bajas permite analizar distintos fenómenos dentro del sistema electroquímico. Las frecuencias altas ayudan a identificar aspectos relacionados con la resistencia de la solución y las conexiones eléctricas del sistema, mientras que las frecuencias bajas permiten evaluar procesos más lentos, como la transferencia de carga y los mecanismos de difusión que ocurren en la superficie del material.

Asimismo, el ensayo fue configurado con varios puntos de medición por década y múltiples lecturas en cada frecuencia, lo que mejora la precisión y estabilidad de los resultados. El equipo también trabajó con ajuste automático de corriente y un ancho de banda medio, configuraciones que ayudan a reducir interferencias y obtener señales más limpias y confiables.

Una de las ventajas del software EC-Lab de BioLogic es que no solo controla el ensayo, sino que también facilita el análisis de los datos obtenidos. El programa permite generar automáticamente los diagramas de Nyquist y Bode, herramientas fundamentales en espectroscopia de impedancia electroquímica.

El diagrama de Nyquist muestra la relación entre la parte real y la parte imaginaria de la impedancia, permitiendo identificar fenómenos como la resistencia a la corrosión y la transferencia de carga del sistema. Por otro lado, el diagrama de Bode representa cómo cambian la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase conforme varía la frecuencia aplicada. En conjunto, ambos diagramas ofrecen una representación clara y visual del comportamiento electroquímico del material, facilitando la interpretación de los resultados y el análisis de sus propiedades electroquímicas.

Además, EC-Lab de BioLogic permite desarrollar y ajustar circuitos equivalentes, los cuales son modelos eléctricos compuestos por resistencias, capacitores y otros elementos que simulan el comportamiento electroquímico del sistema analizado. A través de estos modelos es posible obtener parámetros importantes como la resistencia de transferencia de carga, la resistencia del electrolito o la capacitancia de la doble capa. De manera resumida, el usuario selecciona un circuito equivalente acorde con la forma observada en los diagramas de Nyquist o Bode, y posteriormente el software ajusta matemáticamente el modelo a los datos experimentales hasta obtener la mejor aproximación posible. Esto facilita una interpretación más precisa y cuantitativa de los fenómenos electroquímicos presentes en el sistema estudiado.

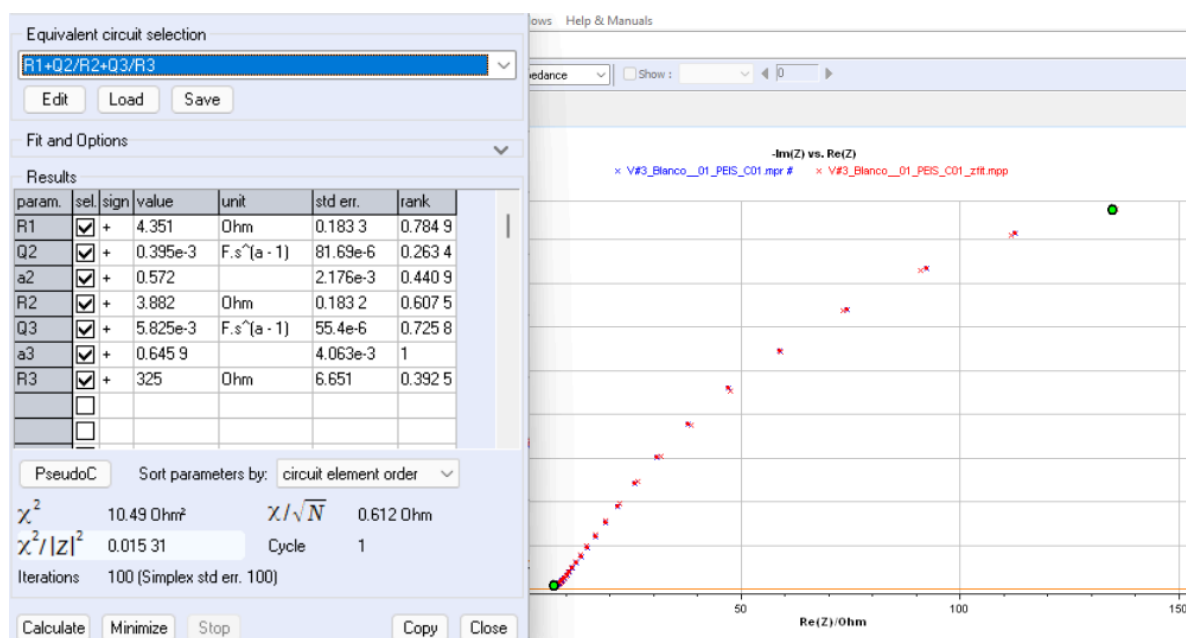


Figura 12. Ejemplo de un circuito eléctrico equivalente simulado en EC-Lab. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para complementar el análisis electroquímico, se realizó una prueba de polarización potenciodinámica cíclica (CPP), técnica que permite evaluar el comportamiento del material frente a los procesos de corrosión y, al mismo tiempo, identificar aspectos como su estabilidad electroquímica, su capacidad de pasivación y su posible susceptibilidad a corrosión localizada o por picadura.

Durante el ensayo, el potencial se barrió de manera controlada desde -1.0 V hasta 1.5 V respecto al electrodo de referencia, con una velocidad de barrido de 60 mV/min. En términos sencillos, esto significa que el equipo fue modificando gradualmente el potencial aplicado al material mientras registraba la corriente generada en respuesta. Gracias a este procedimiento fue posible observar cómo reaccionó el material bajo distintas condiciones electroquímicas y distinguir las regiones en las que se mantuvo estable de aquellas en las que comenzó a presentar procesos de corrosión.

El software EC-Lab de BioLogic facilitó tanto la ejecución del ensayo como el tratamiento de los resultados, ya que permitió visualizar de forma automática las curvas de polarización obtenidas. Estas gráficas muestran la relación entre el potencial aplicado y la corriente medida, y brindan información relevante sobre parámetros electroquímicos como el potencial de corrosión (E_{corr}), la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) y el comportamiento pasivo del material.

Para el análisis de las curvas de polarización potenciodinámica cíclica, se identificaron las regiones tafelianas anódica y catódica cercanas al potencial de corrosión (E_{corr}), debido a que en esas zonas existe una relación aproximadamente lineal entre el potencial aplicado y el logaritmo de la densidad de corriente. La selección de estas regiones se realizó evitando áreas afectadas por difusión, pasivación o inestabilidad de la señal, con el fin de que el análisis reflejara principalmente procesos controlados por transferencia de carga.

En este proyecto, la identificación de las zonas tafelianas se realizó primero considerando un intervalo de ± 50 mV respecto a E_{corr} , con el propósito de ubicar la región más cercana al equilibrio electroquímico. Después, a partir de esos límites, se amplió el análisis a un intervalo de ± 100 mV, en el cual se observó un comportamiento lineal más estable en la gráfica de potencial contra logaritmo de la densidad de corriente. Estas regiones se utilizaron para efectuar el ajuste de las pendientes de Tafel y obtener los parámetros electroquímicos del sistema.

Una vez identificadas las zonas lineales, se realizó el ajuste de las pendientes de Tafel anódica (β_a) y catódica (β_c) mediante extrapolación lineal de las regiones seleccionadas. A partir de la intersección de ambas pendientes se determinaron parámetros como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), los cuales permitieron evaluar el comportamiento electroquímico y la tendencia a la corrosión del material analizado.

4.7 Variables de estudio

Con el propósito de evaluar de manera ordenada el desempeño anticorrosivo de los recubrimientos formulados, en esta investigación se definieron variables independientes, dependientes y de control, cuya identificación permitió estructurar el estudio experimental y analizar la respuesta del sistema de forma sistemática.

Las variables independientes correspondieron a aquellos factores que fueron manipulados de manera intencional durante el desarrollo de la investigación. En primer lugar, se consideró el tipo de recubrimiento aplicado sobre las probetas, distinguiéndose tres condiciones experimentales: REC1, formulado con 0.6 g de silicón disueltos en 25 ml de thinner recuperado; REC2, preparado con 0.6 g de silicón en 12 ml de thinner recuperado; y el testigo, constituido por una varilla de acero sin recubrimiento. Asimismo, se incluyó como variable independiente el tiempo de exposición,

entendido como el periodo durante el cual las muestras permanecieron en contacto con el medio electrolítico, el cual en este estudio fue de 20 días.

Las variables dependientes fueron aquellas que respondieron a las modificaciones introducidas en las variables independientes y que, por tanto, permitieron evaluar el comportamiento anticorrosivo del sistema. Entre ellas se analizaron el potencial de corrosión (E_{corr}), indicador de la tendencia termodinámica del material a corroerse; la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), estrechamente relacionada con la velocidad de corrosión; la resistencia a la polarización (R_p), empleada como un parámetro representativo de la resistencia del sistema frente al proceso corrosivo; la impedancia electroquímica ($|Z|$), especialmente en bajas frecuencias, asociada con la capacidad barrera del recubrimiento; y la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}), obtenida mediante espectroscopía de impedancia electroquímica y vinculada con la cinética de las reacciones electroquímicas.

Por su parte, las variables de control fueron mantenidas constantes a lo largo de todo el experimento con el fin de garantizar la validez de los resultados y reducir la influencia de factores externos. Entre estas se incluyeron el tipo de acero, correspondiente al grado 42; el área expuesta del electrodo de trabajo (3cm aproximadamente); la composición del electrolito, preparada a partir de una solución salina; las condiciones de preparación superficial, que comprendieron procesos de limpieza y lijado previos al ensayo; así como los parámetros instrumentales establecidos para las pruebas electroquímicas, tales como la velocidad de barrido, la amplitud de señal y el rango de frecuencia.

Esta estructuración de variables permitió establecer una base metodológica sólida para comparar el comportamiento de las distintas formulaciones de recubrimiento y analizar su efecto sobre la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Potencial de circuito abierto

Con el objetivo de analizar la evolución del comportamiento electroquímico y la eficiencia de los recubrimientos, se presentan los resultados obtenidos mediante las técnicas de potencial de circuito abierto (OCP). Para ello, se elaboraron gráficas del potencial de circuito abierto en función del tiempo y de la densidad de corriente de corrosión en función del tiempo, permitiendo comparar el desempeño de las tres condiciones evaluadas: varilla sin recubrimiento, recubrimiento REC1 y recubrimiento REC2. Estas representaciones permiten identificar la evolución de la actividad corrosiva y el efecto protector proporcionado por cada sistema de recubrimiento durante el periodo de exposición.

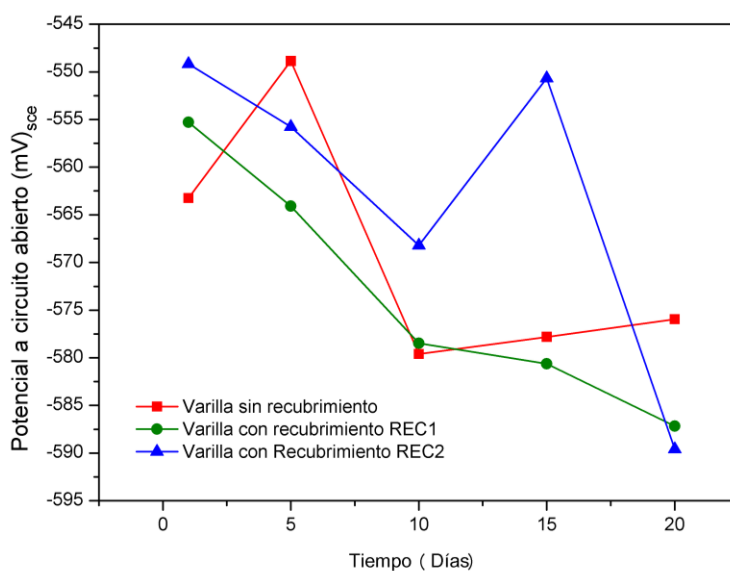


Figura 13. Evolución del potencial a circuito abierto en función del tiempo para las varillas evaluadas: sin recubrimiento, con recubrimiento REC1 y con recubrimiento REC2.

El análisis de la gráfica nos permitió comparar el comportamiento de las varillas con los diferentes recubrimientos en donde se puede observar que la varilla sin recubrimiento tiene un comportamiento variable durante los primeros días de exposición. Inicialmente, el potencial presenta un desplazamiento hacia valores menos negativos en el día 5, seguido de una caída significativa en el día 10. Posteriormente, el sistema tiende a estabilizarse ligeramente hacia valores cercanos a -578 mV. Este comportamiento sugiere un proceso de corrosión activa, en el cual pueden estar ocurriendo fenómenos de formación y ruptura de productos de corrosión sobre la superficie del material.

Por su parte, la varilla con recubrimiento R1 muestra una tendencia progresiva hacia valores más negativos a lo largo del tiempo, sin presentar fluctuaciones importantes. Este descenso continuo del potencial indica una pérdida gradual de la capacidad protectora del recubrimiento, lo que sugiere que el electrolito logra penetrar el sistema y favorecer la activación del proceso corrosivo en el sustrato metálico.

En contraste, la varilla con recubrimiento R2 presenta un comportamiento más inestable. Durante los primeros días, mantiene valores de potencial relativamente menos negativos en comparación con los otros sistemas, lo que indica una mejor protección inicial. Sin embargo, se observan fluctuaciones importantes a lo largo del tiempo, destacando una recuperación del potencial en el día 15, seguida de una caída abrupta hacia valores más negativos en el día 20. Este comportamiento puede asociarse con una falla localizada del recubrimiento, como fisuración, delaminación o ingreso repentino del electrolito, lo que provoca una activación acelerada de la corrosión.

En términos comparativos, el recubrimiento R2 presenta el mejor desempeño inicial, mientras que el recubrimiento R1 evidencia una degradación continua y menor efectividad como barrera protectora. La varilla sin recubrimiento, aunque presenta corrosión activa, muestra cierta tendencia

a la estabilización, posiblemente debido a la formación de productos de corrosión parcialmente adherentes.

En conjunto, los resultados indican que ninguno de los sistemas evaluados proporciona una protección completamente estable durante todo el periodo de exposición; sin embargo, existen diferencias significativas en la cinética de deterioro y en la efectividad inicial de los recubrimientos.

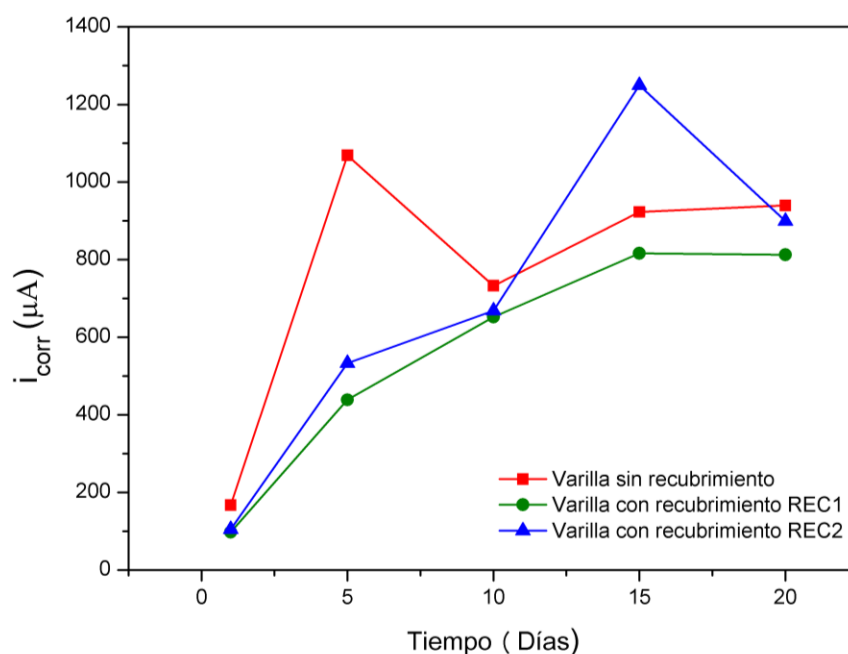


Figura 14. Evolución de la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) en función del tiempo para las varillas evaluadas: sin recubrimiento, con recubrimiento REC1 y con recubrimiento REC2.

En la gráfica representada en la Figura 14, se observa que la varilla sin recubrimiento presenta los valores más altos de i_{corr} durante la mayor parte del ensayo, alcanzando un valor elevado desde el día 5 (~1060 μA), lo que evidencia una alta velocidad de corrosión. Posteriormente, se observa una ligera disminución en el día 10, seguida de un nuevo incremento hacia los días 15 y 20, lo cual puede asociarse a la formación y ruptura de productos de corrosión parcialmente protectores.

Por su parte, la varilla con recubrimiento REC1 muestra el comportamiento más estable y los valores más bajos de i_{corr} a lo largo de todo el periodo evaluado. Aunque existe un incremento gradual (de aproximadamente $100 \mu A$ a $810 \mu A$), la tendencia es más controlada, lo que sugiere que este recubrimiento actúa como una barrera efectiva, reduciendo la cinética de corrosión y retardando el deterioro del material.

En contraste, la varilla con recubrimiento REC2 presenta un comportamiento intermedio, pero con una mayor variabilidad. Inicialmente muestra valores similares a REC1; sin embargo, a partir del día 10 se observa un incremento significativo, alcanzando el valor máximo del estudio en el día 15 ($\sim 1250 \mu A$). Este comportamiento podría indicar una pérdida de estabilidad del recubrimiento o la aparición de fenómenos de corrosión localizada, como la formación de picaduras.

Comparativamente, los resultados indican que el recubrimiento REC1 ofrece la mejor protección contra la corrosión, al mantener los valores de i_{corr} más bajos y con menor fluctuación. En cambio, el recubrimiento REC2, aunque inicialmente efectivo, presenta una degradación más pronunciada con el tiempo. Finalmente, la varilla sin recubrimiento confirma su alta susceptibilidad a la corrosión, evidenciando la importancia del uso de recubrimientos protectores.

5.2 Resistencia a la polarización lineal

Para complementar el análisis electroquímico y evaluar la evolución del proceso corrosivo durante el periodo de exposición, se determinaron los valores de resistencia a la polarización lineal (R_p) mediante la representación de las curvas potencial-corriente, expresadas como E_{we} (V) en función de la corriente aplicada I (mA). Las mediciones se realizaron en diferentes tiempos de exposición y los resultados se presentan de forma independiente para cada condición evaluada: varilla sin recubrimiento, recubrimiento REC1 y recubrimiento REC2. El análisis de estas curvas permitió

identificar las variaciones en la resistencia del sistema frente al proceso de corrosión y comparar el efecto protector proporcionado por los recubrimientos aplicados.

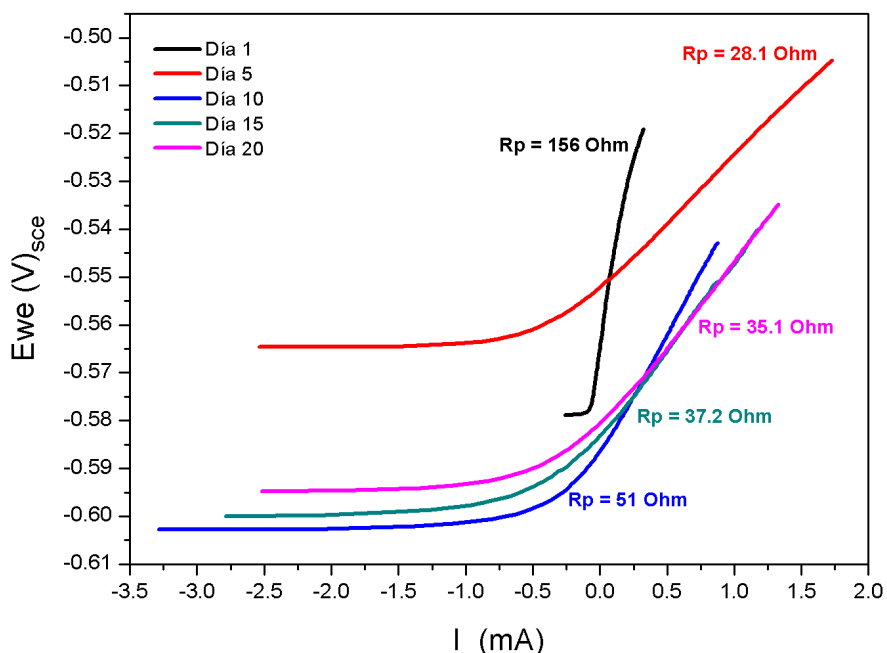


Figura 15. Respuesta de polarización lineal para la varilla sin recubrimiento en solución de NaCl al 3.5% p/p, evaluada en diferentes tiempos de exposición.

La Figura 15 muestra la evolución de la resistencia a la polarización (R_p) de la varilla sin recubrimiento en solución de NaCl al 3.5%. Se observa que el mayor valor de R_p ocurre en el día 1 (156 Ω), indicando una baja velocidad de corrosión inicial; este valor puede atribuirse a la presencia de una superficie metálica relativamente intacta.

Posteriormente, en el día 5, R_p disminuye significativamente hasta 24.4 Ω , lo que refleja un incremento considerable en la velocidad de corrosión, asociado a la acción agresiva de los iones cloruro y la posible ruptura de una película protectora inicial.

En los días 10, 15 y 20, los valores de R_p muestran una ligera recuperación (35.6, 28.3 y 27.8 Ω , respectivamente), aunque permanecen bajos, lo que indica que el material continúa en un estado activo de corrosión.

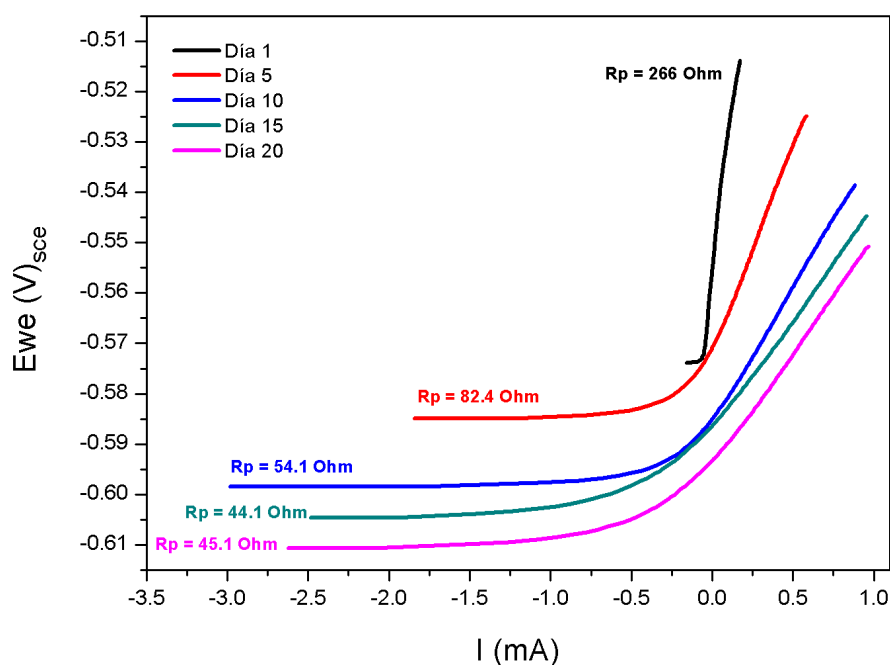


Figura 16. Respuesta de polarización lineal para la varilla con recubrimiento REC1 en solución de NaCl al 3.5% p/p, evaluada en diferentes tiempos de exposición.

En la Figura 16 se muestra la evolución de la resistencia a la polarización (R_p) para la varilla con recubrimiento REC1 en solución de NaCl al 3.5%. Se observa que el valor inicial de R_p es elevado (266 Ω en el día 1), lo que indica una baja velocidad de corrosión y una alta eficiencia protectora del recubrimiento en las primeras etapas.

Con el tiempo, R_p disminuye significativamente, alcanzando 59.5 Ω en el día 5 y valores cercanos a 40–32 Ω entre los días 10 y 20. Esta tendencia indica una pérdida progresiva de la capacidad protectora del recubrimiento, probablemente asociada a su degradación o a la penetración del electrolito. A partir del día 10, los valores de R_p tienden a estabilizarse, lo que sugiere un estado de corrosión más uniforme, aunque con menor protección en comparación con la condición inicial.

En conjunto, el recubrimiento REC1 muestra una protección efectiva en etapas tempranas, pero con una disminución considerable de su desempeño a lo largo del tiempo de exposición.

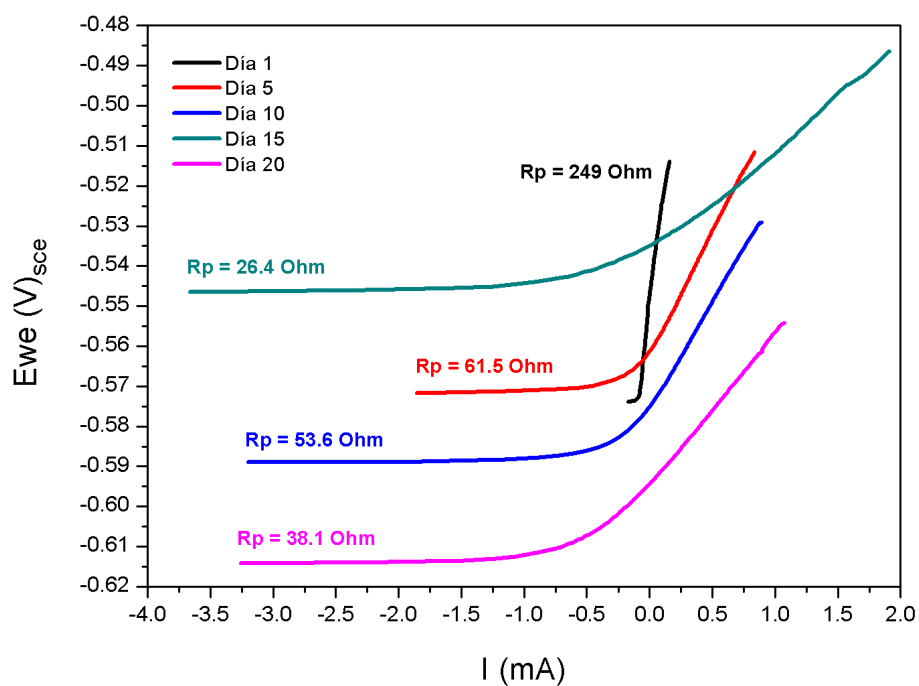


Figura 17. Respuesta de polarización lineal para la varilla con recubrimiento REC2 en solución de NaCl al 3.5% p/p, evaluada en diferentes tiempos de exposición.

Inicialmente la Figura 17 muestra que el sistema presenta un valor elevado de R_p (249Ω en el día 1), lo que indica una buena protección frente a la corrosión en etapas tempranas.

Sin embargo, en el día 5 se observa una disminución considerable de R_p a 48.9Ω , evidenciando un incremento en la actividad corrosiva. En los días posteriores (10 y 20), los valores continúan disminuyendo hasta aproximadamente 39Ω y 29Ω , respectivamente, lo que sugiere una degradación progresiva del recubrimiento. En el día 15 se observa un valor atípico (20.9Ω), indicando una condición de mayor susceptibilidad a la corrosión, posiblemente asociada a fallas locales o a la penetración del electrolito.

Finalmente, el recubrimiento REC2 muestra un buen desempeño inicial, pero con una pérdida continua de su capacidad protectora a lo largo del tiempo, presentando además mayor inestabilidad en comparación con otros sistemas.

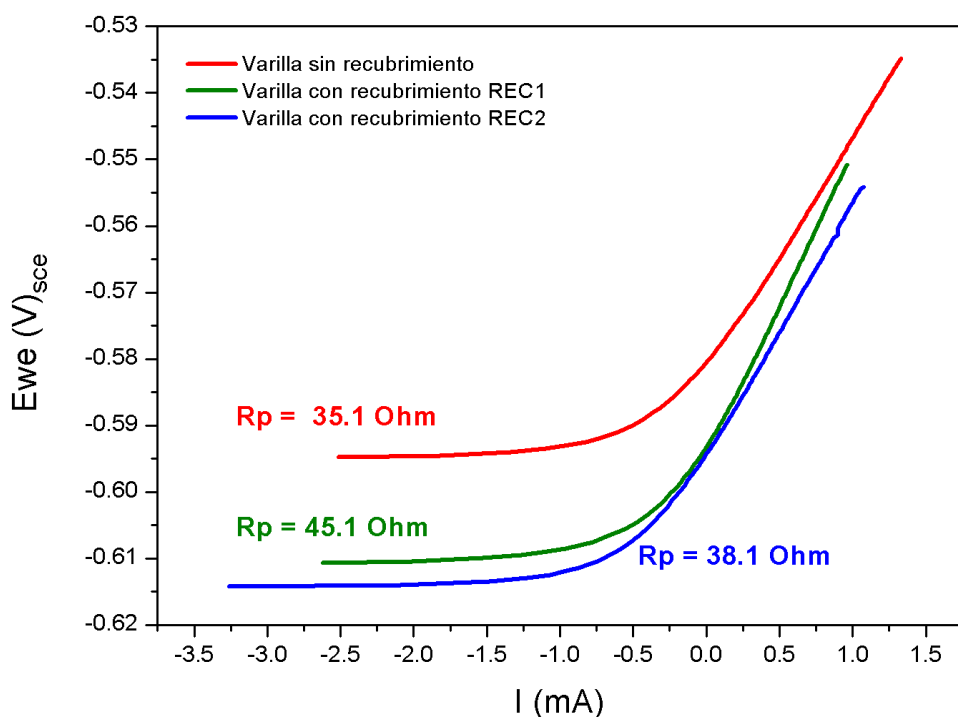


Figura 18. Comparativa de la respuesta de la resistencia a la polarización lineal para las tres condiciones en solución de NaCl al 3.5% p/p, evaluada el día 20 de exposición.

En la comparativa de la respuesta de la resistencia a la polarización lineal para las tres condiciones mostrada en la Figura 18, se observa que la varilla con recubrimiento REC1 presenta el mayor valor de R_p (32.1 Ω), seguida por el recubrimiento REC2 (29 Ω), mientras que la varilla sin recubrimiento presenta el valor más bajo (27.8 Ω).

Estos resultados indican que, aunque todos los sistemas muestran una disminución en su resistencia a la corrosión con el tiempo, los recubrimientos aún proporcionan una protección superior en comparación con la condición sin recubrimiento. Entre ellos, R1 mantiene el mejor desempeño, mientras que REC2 presenta un comportamiento intermedio.

Siendo así, la comparación confirma que el uso de recubrimientos mejora la resistencia a la corrosión, siendo R1 el más efectivo al final del periodo de evaluación.

5.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica

Con el propósito de profundizar en el comportamiento electroquímico de las varillas y evaluar la respuesta de los recubrimientos durante el periodo de exposición, se realizó el análisis mediante espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Los resultados se presentan a través de diagramas de Nyquist y diagramas de Bode obtenidos para cada condición evaluada: varilla sin recubrimiento, recubrimiento REC1 y recubrimiento REC2, permitiendo analizar la evolución de los mecanismos de transferencia de carga y las propiedades de barrera asociadas a los recubrimientos. Adicionalmente, las respuestas experimentales fueron ajustadas mediante circuitos equivalentes, a partir de los cuales se determinaron parámetros electroquímicos como la resistencia total (R), resistencia de transferencia de carga o del recubrimiento (R_{ct}), capacitancia del recubrimiento (C_{cp}) y capacitancia de doble capa (c_{dl}), cuyos valores se presentan para cada varilla a lo largo del tiempo de exposición.

Diagramas de Nyquist

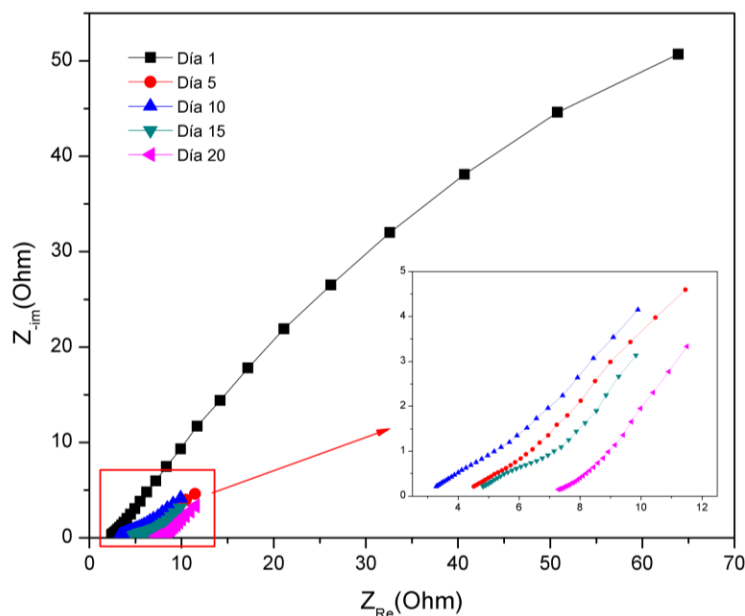


Figura 19. Evaluación de la impedancia electroquímica (diagrama de Nyquist) para varilla sin recubrimiento en solución de NaCl al 3.5% p/p.

En el diagrama de Nyquist para la varilla sin recubrimiento se observa que el diámetro del arco semicircular es mayor en el día 1, lo que indica una mayor resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) y, por tanto, una menor velocidad de corrosión en la etapa inicial.

Conforme avanza el tiempo (días 5 a 20), el diámetro de los arcos disminuye progresivamente, evidenciando una reducción en R_{ct} y un incremento en la actividad corrosiva del sistema. Este comportamiento es consistente con la degradación de la superficie metálica y la acción agresiva de los iones cloruro.

Además, los diagramas muestran una tendencia a comportamientos menos definidos y más lineales a tiempos mayores, lo que puede asociarse a la aparición de procesos difusivos y a una superficie más heterogénea debido a la formación de productos de corrosión.

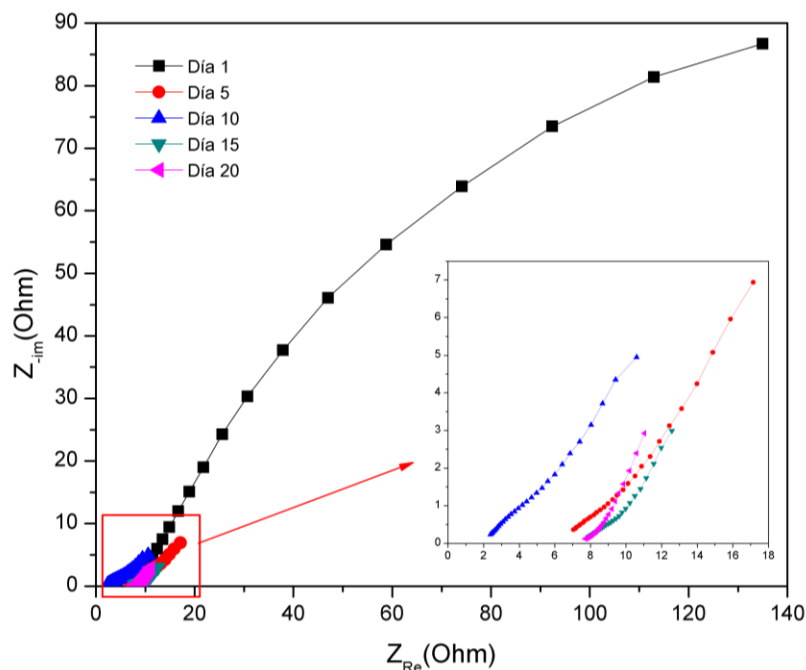


Figura 20. Evaluación de la impedancia electroquímica (diagrama de Nyquist) para varilla con recubrimiento REC1 en solución de NaCl al 3.5% p/p.

Para la varilla con recubrimiento REC1 el diagrama muestra de igual manera, que el mayor diámetro del arco corresponde al día 1, indicando una alta resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) y, por tanto, una baja velocidad de corrosión inicial.

Con el incremento del tiempo (días 5 a 20), el diámetro de los arcos disminuye progresivamente, lo que refleja una reducción en R_{ct} y una pérdida gradual de la capacidad protectora del recubrimiento. No obstante, los valores se mantienen superiores a los observados en la varilla sin recubrimiento, evidenciando que REC1 sigue actuando como una barrera efectiva.

Adicionalmente, los diagramas presentan una tendencia a comportamientos más abiertos en tiempos mayores, lo que sugiere la influencia de procesos difusivos y la posible degradación del recubrimiento.

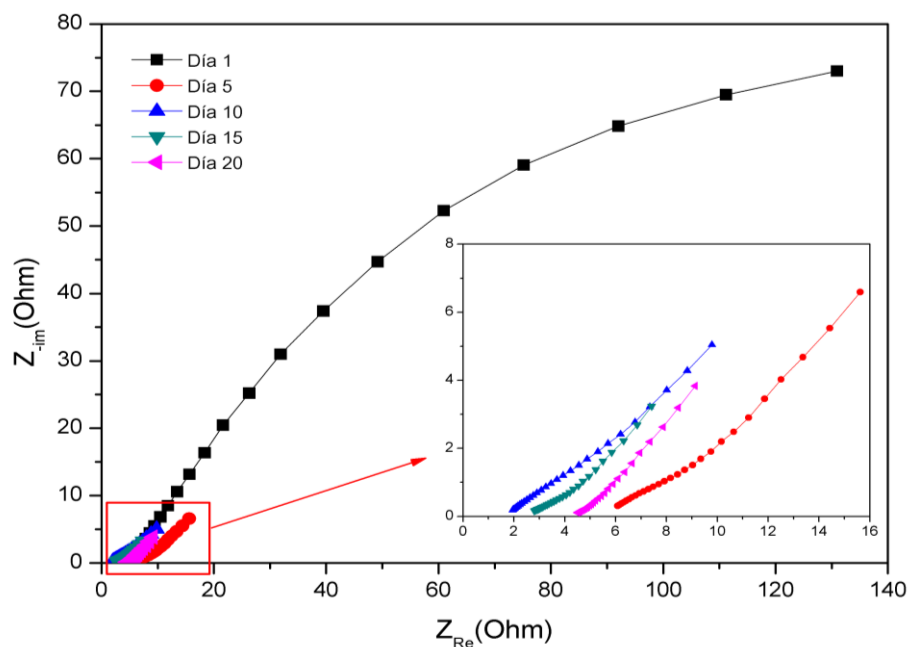


Figura 21. Evaluación de la impedancia electroquímica (diagrama de Nyquist) para varilla con recubrimiento REC2 en solución de NaCl al 3.5% p/p.

Los diagramas de Nyquist para el recubrimiento REC2 representados en la Figura 21 muestran al igual que en los otros sistemas, su mayor arco capacitivo el primer día, lo que representa una resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) elevada y una corrosión inicial mínima. No obstante, entre los días 5 y 20 se produce una reducción progresiva del diámetro de los arcos, reflejando una degradación de su capacidad protectora más acelerada que la del sistema REC1. A tiempos prolongados, los diagramas se abren, sugiriendo el inicio de procesos difusivos y la acumulación de productos de corrosión en la interfase. En conclusión, REC2 ofrece una protección inicial adecuada, pero su estabilidad a largo plazo es inferior a la de REC1.

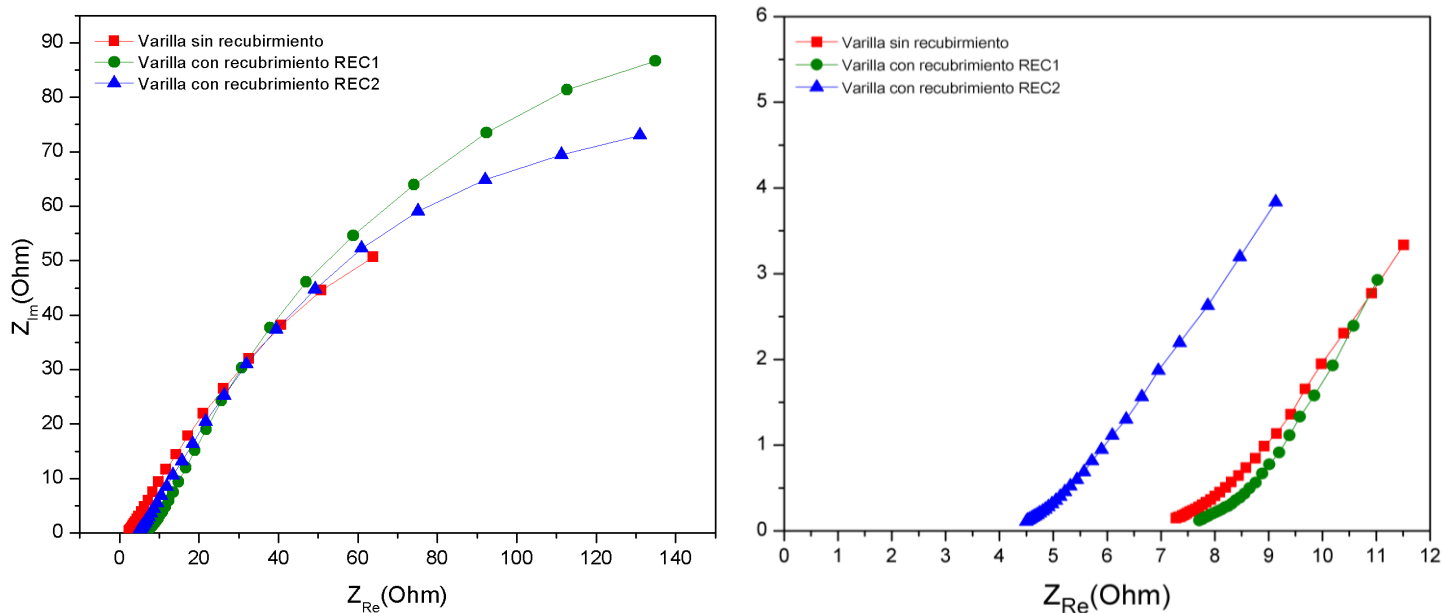


Figura 22. Comparación de los diagramas de Nyquist para las tres condiciones en solución de NaCl al 3.5% p/p. al día 1 (lado izquierdo) y día 20 (lado derecho) de exposición.

Los diagramas muestran una evolución diferenciada del comportamiento electroquímico de las tres condiciones entre el día 1 y el día 20 de exposición. En el día 1, las tres muestras presentan respuestas similares, aunque la varilla con recubrimiento REC1 alcanza los mayores valores de impedancia, indicando una mejor capacidad de protección frente a la corrosión. Para el día 20, se confirma que el sistema REC1 posee el arco capacitivo de mayor diámetro, es decir, una mejor resistencia a la transferencia de carga superior y, consecuentemente, una mejor resistencia a la corrosión. En contraste, REC2 exhibe menores valores de impedancia real y una curva abierta, indicando una degradación acelerada y la predominancia de procesos difusivos. Por su parte, la condición sin recubrimiento muestra un desempeño intermedio, siendo más estable que REC2 pero menos protectora que REC1. En conclusión, tras 20 días de exposición, el recubrimiento REC1 mantiene la mayor eficiencia, mientras que el sistema REC2 resulta ser el más susceptible al ataque corrosivo.

Diagramas de Bode

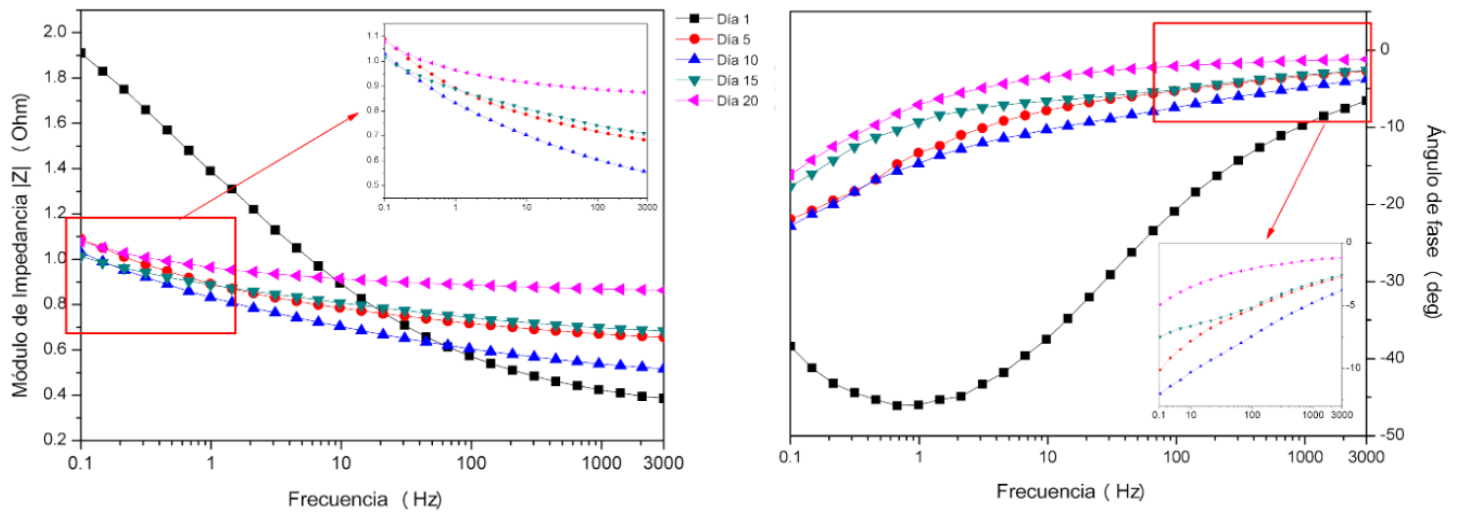


Figura 23. Diagramas de Bode (izquierda módulo de impedancia y derecha ángulo de fase VS frecuencia) de la varilla sin recubrimiento en solución de NaCl al 3.5% p/p.

Los diagramas de Bode para la varilla sin recubrimiento reflejan una degradación electroquímica constante. En el gráfico de módulo de impedancia ($|Z|$), los valores máximos se registran el día 1 en bajas frecuencias, lo que señala una mayor resistencia inicial que disminuye paulatinamente en todo el espectro, confirmando el aumento de la actividad corrosiva. Simultáneamente, el ángulo de fase muestra sus valores más negativos al inicio del ensayo, indicando un comportamiento predominantemente capacitivo de la superficie. Con el tiempo, este ángulo se desplaza hacia valores menos negativos, lo que evidencia la pérdida de las propiedades capacitivas y la transición hacia un régimen resistivo.

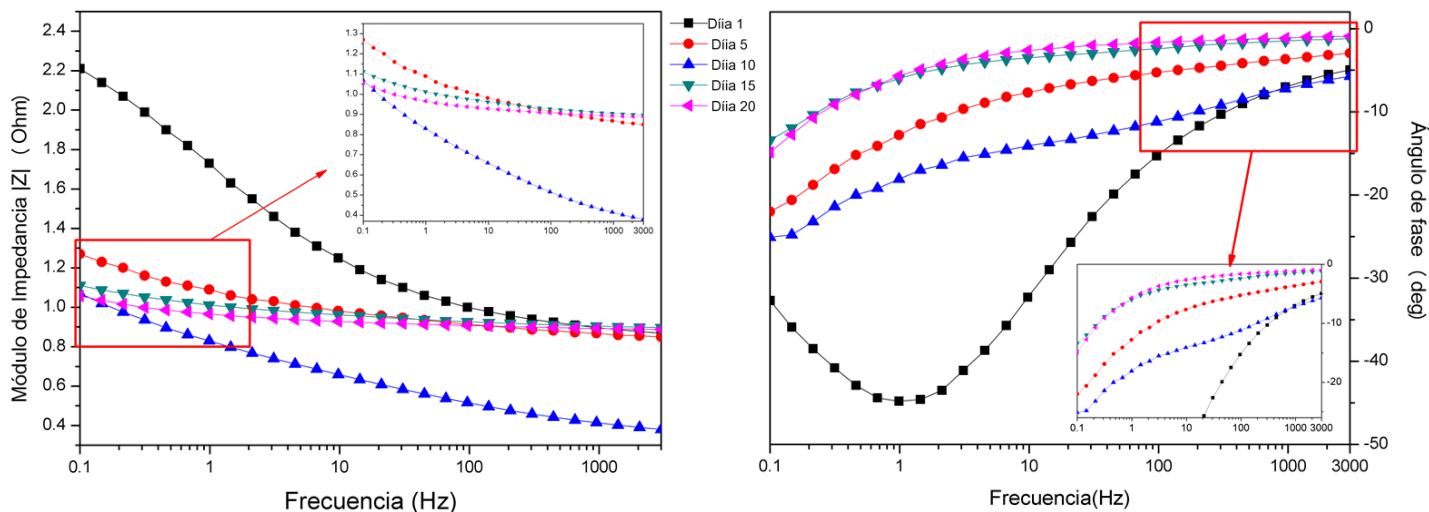


Figura 24. Diagramas de Bode (izquierda módulo de impedancia y derecha ángulo de fase VS frecuencia) de la varilla con recubrimiento REC1 en solución de NaCl al 3.5% p/p.

Para el recubrimiento REC1 (Figura 24), se describe un sistema con protección inicial que experimenta una degradación progresiva. El módulo de impedancia ($|Z|$) alcanza su máximo el día 1, particularmente en la región de bajas frecuencias, lo que denota una elevada resistencia a la corrosión. Sin embargo, se observa una reducción gradual de $|Z|$ entre los días 5 y 20, evidenciando el deterioro de la capacidad aislante del recubrimiento. Paralelamente, el ángulo de fase inicia con valores marcadamente negativos, propios de un comportamiento capacitivo protector, y se desplaza hacia valores menos negativos conforme aumenta la componente resistiva del sistema. A pesar de este deterioro, el sistema REC1 mantiene niveles de impedancia superiores y más estables que la varilla sin tratamiento, confirmando la persistencia de su efecto protector frente al medio agresivo.

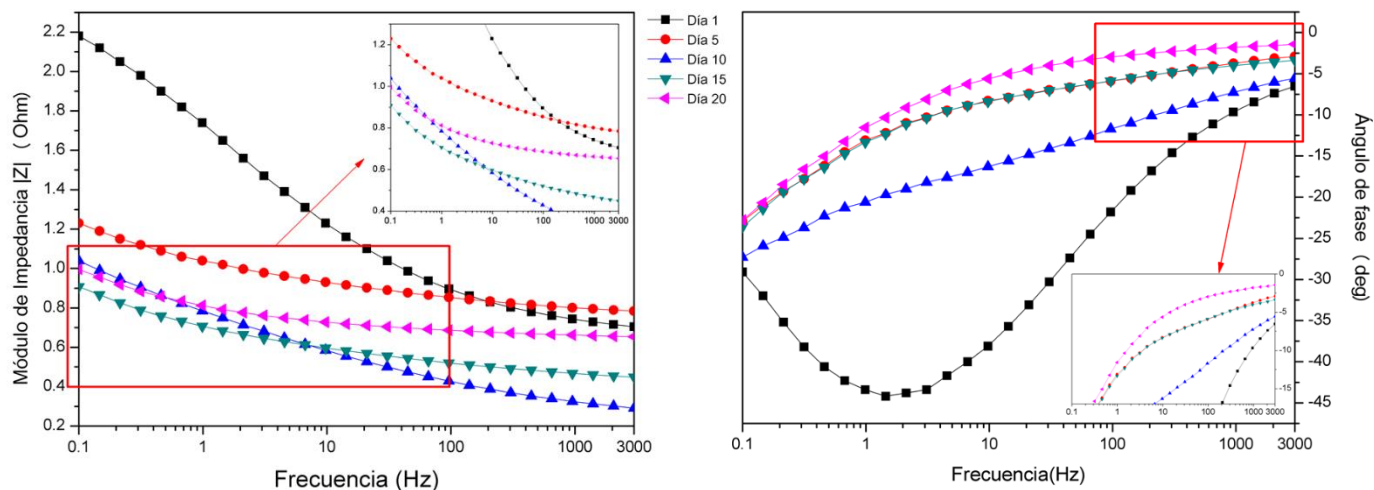


Figura 25. Diagramas de Bode (izquierda módulo de impedancia y derecha ángulo de fase VS frecuencia) de la varilla con recubrimiento REC2 en solución de NaCl al 3.5% p/p.

Los diagramas del recubrimiento REC2 reflejan un blindaje inicial seguido de una degradación electroquímica acentuada. El módulo de impedancia ($|Z|$) al igual que los otros sistemas exhibe sus valores máximos el día 1, denotando una resistencia a la corrosión temprana que disminuye de forma continua y más acelerada que en el sistema REC1 durante el periodo de exposición (días 5 a 20). Paralelamente, el ángulo de fase inicia con valores negativos vinculados a un comportamiento capacitivo protector; sin embargo, el desplazamiento de estos hacia cero con el transcurso del tiempo evidencia la pérdida de propiedades dieléctricas y la transición hacia un régimen resistivo. Estos resultados sugieren un deterioro estructural del recubrimiento y una mayor exposición del sustrato, confirmando que el sistema REC2 posee una estabilidad a largo plazo inferior a la de REC1.

Ajuste de Circuitos Equivalentes

Tabla 6. Resistencia total del sistema (R) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.

Espécimen	$R (\Omega * cm^2)$				
	Día 1	Día 5	Día 10	Día 15	Día 20
SR	10.10	11.63	22.37	35.16	52.88
REC1	14.63	13.98	17.88	57.42	56.17
REC2	12.58	41.66	14.44	19.07	32.70

Tabla 7. Resistencia del recubrimiento (R_{cp}) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.

Espécimen	$R_{cp} (\Omega * cm^2)$				
	Día 1	Día 5	Día 10	Día 15	Día 20
SR	171.22	20.20	74.80	37.40	18.70
REC1	89.76	37.40	48.62	18.70	14.96
REC2	97.24	59.84	59.84	42.41	17.95

Tabla 8. Resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.

Espécimen	$R_{ct} (\Omega * cm^2)$				
	Día 1	Día 5	Día 10	Día 15	Día 20
SR	1122	209.44	172.04	112.2	134.64
REC1	2094.4	374	179.52	136.884	139.876
REC2	2094.4	239.36	149.6	139.128	136.884

Tabla 9. Capacitancia del recubrimiento (C_{cp}) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.

Especimen	C_{cp} (F *cm ⁻²)				
	Día 1	Día 5	Día 10	Día 15	Día 20
SR	0.0178	0.063	0.10008	0.07617	0.1426
REC1	0.006108	0.04312	5.03E-02	7.14E-02	1.59E-01
REC2	0.00638	0.05852	0.0638	0.1639	0.1625

Tabla 10. Capacitancia del recubrimiento (C_{dl}) obtenida mediante ajuste de circuito equivalente en función del tiempo de exposición.

Especimen	C_{dl} (F *cm ⁻²)				
	Día 1	Día 5	Día 10	Día 15	Día 20
SR	0.0178	0.163	0.4146	0.4632	0.2974
REC1	6.11E-03	0.123	0.2493	0.2999	0.3664
REC2	6.38E-03	1.69E-01	3.05E-01	4.22E-01	2.47E-01

El análisis de la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) y la resistencia total permitió evaluar la cinética de corrosión de forma directa. Para la varilla sin recubrimiento (SR), se registró una caída drástica en la R_{ct} (de 1122 a ~134 $\Omega \cdot \text{cm}^2$), señalando una activación progresiva del proceso corrosivo. Aunque su resistencia total se incrementó, este fenómeno se vincula a la acumulación de productos de corrosión de baja porosidad y nula capacidad protectora. En contraste, el sistema REC1 (silicón blanco) mantuvo una R_{ct} más estable (~140 $\Omega \cdot \text{cm}^2$) y un aumento considerable en la resistencia total, lo que confirma el fortalecimiento de su efecto barrera a largo plazo. Por su parte, REC2 evidenció una caída de resistencia más pronunciada y errática (de ~2094 a ~137 $\Omega \cdot \text{cm}^2$), sugiriendo una degradación estructural más acelerada.

En cuanto a la integridad de los recubrimientos, la resistencia del recubrimiento (R_{cp}) en REC1 presentó una disminución progresiva que denota una degradación controlada. Sin embargo, REC2 mostró un comportamiento irregular en este parámetro, lo cual es indicativo de la formación de defectos estructurales y la penetración prematura del electrolito. Estos hallazgos se ven respaldados por la evolución de la capacitancia del recubrimiento (C_{cp}); mientras que REC1 exhibió un incremento gradual asociado a una absorción controlada de agua, REC2 registró aumentos más marcados, confirmando una mayor permeabilidad y deterioro de la película.

Finalmente, la capacitancia de la doble capa (C_{dl}), parámetro relacionado con el área activa del metal expuesta al medio agresivo, presentó incrementos significativos en la VSR y REC2, reflejando un avance descontrolado de la corrosión y una mayor exposición del sustrato. En comparación, REC1 presentó el incremento más moderado de C_{dl} , manteniendo una protección parcial efectiva durante todo el periodo de exposición.

Siendo así, el análisis de los parámetros capacitivos y resistivos demuestra que el recubrimiento REC1 ofrece el mejor desempeño global y estabilidad temporal. Mientras que la VSR muestra un comportamiento de corrosión activa típica, el sistema REC2 se posiciona como una opción intermedia pero vulnerable a fallas localizadas y degradación acelerada en ambientes salinos.

5.4 Polarización potenciodinámica cíclica (CPP) y pendientes de Tafel

Con el fin de complementar la evaluación del comportamiento electroquímico y analizar la susceptibilidad a la corrosión de las varillas durante el periodo de exposición, se realizaron ensayos de polarización potenciodinámica cíclica y el análisis de pendientes de Tafel. Los resultados se presentan mediante las curvas de polarización obtenidas para cada condición evaluada: varilla sin recubrimiento, REC1 y REC2, permitiendo identificar las variaciones en la respuesta anódica y catódica del sistema. Adicionalmente, se incluyen las tablas con los parámetros empleados para el

ajuste de las pendientes de Tafel, a partir de las cuales se determinaron variables asociadas al proceso corrosivo y al desempeño de los recubrimientos aplicados.

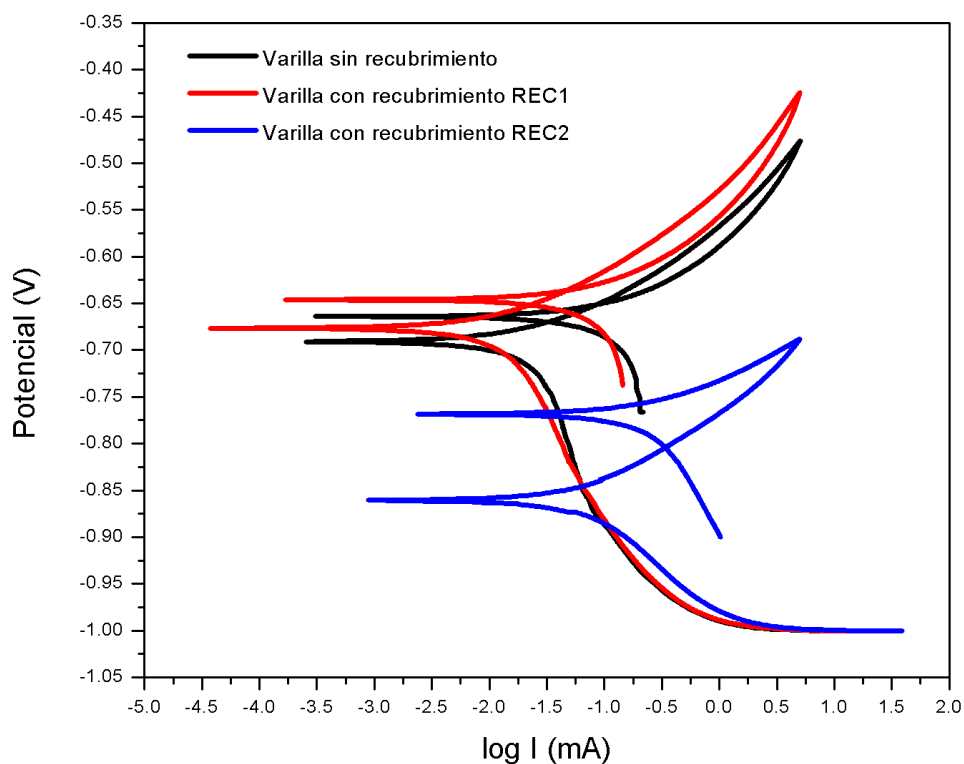


Figura 26. Curvas de polarización para varillas con diferentes sistemas de recubrimiento en solución de NaCl al 3.5% p/p.

La Figura 26 presenta las curvas de polarización cíclica obtenidas para la varilla sin recubrimiento y para las muestras protegidas con los recubrimientos REC1 y REC2, formulados a base de silicón y thinner, después de su exposición a una solución de NaCl al 3.5%. De manera general, los resultados muestran que la aplicación de los recubrimientos modifica el comportamiento electroquímico del acero cuando se encuentra en un ambiente rico en cloruros.

La varilla sin recubrimiento exhibió un potencial de corrosión cercano a -0.68 V y un aumento progresivo de la corriente conforme avanzó el barrido anódico. Este comportamiento era esperado,

ya que la superficie metálica se encuentra en contacto directo con el medio agresivo, permitiendo que los iones cloruro interactúen libremente con el acero y favorezcan las reacciones de corrosión.

En contraste, las muestras protegidas con REC1 y REC2 mostraron una respuesta diferente. En ambos casos se observó una disminución de la actividad electroquímica y cambios en la forma de las curvas respecto a la muestra de referencia. Esto sugiere que los recubrimientos actúan como una barrera que dificulta el paso del agua, el oxígeno y los iones cloruro hacia la superficie metálica. Considerando la naturaleza hidrofóbica del silicón, este resultado indica que la película formada conserva cierta capacidad para aislar el acero del entorno salino.

Uno de los aspectos más interesantes de las curvas corresponde a la trayectoria del barrido de retorno. Tanto REC1 como REC2 presentan una rama inversa que se desplaza por delante de la curva de ida, generando una histéresis negativa. Este comportamiento suele asociarse con una baja tendencia al desarrollo de corrosión localizada, ya que durante el retorno la corriente disminuye en lugar de mantenerse o incrementarse. En otras palabras, aun después de someter al sistema a potenciales más elevados, no se observa evidencia de que se establezcan procesos de ataque localizado capaces de propagarse de forma estable sobre la superficie del acero.

La muestra REC2 destacó por presentar el desplazamiento más pronunciado hacia potenciales negativos y por mostrar una separación más evidente entre las ramas directa e inversa. Aunque a primera vista podría interpretarse como una condición menos favorable, este comportamiento puede estar relacionado con la naturaleza aislante del recubrimiento y con fenómenos de polarización propios de las películas orgánicas. Por esta razón, el análisis del potencial de corrosión por sí solo no es suficiente para establecer el nivel de protección alcanzado. Resulta necesario complementarlo con parámetros como la densidad de corriente de corrosión, la resistencia a la polarización y los resultados obtenidos mediante espectroscopia de impedancia electroquímica.

Tabla 11. Parámetros utilizados para el ajuste de las pendientes de Tafel para los diferentes recubrimientos.

Parámetro	Sin Recubrimiento	REC1	REC2
E_{corr} (mV)	-695.511	-685.676	-858.952
i_{corr} (mA/cm ²)	0.0263	0.0148	0.0700
β_c (mV/década)	395.876	243.826	114.592
β_a (mV/década)	76.305	81.865	78.806
$R_p(\Omega)$	1055.20	1799.30	289.60
Área (cm ²)	7.48	7.48	7.48
Velocidad de corrosión (mm/año)	0.0409	0.0230	0.1089

A partir de los parámetros obtenidos mediante el ajuste de las pendientes de Tafel, es posible observar diferencias claras en el comportamiento frente a la corrosión de las tres condiciones evaluadas. El recubrimiento REC1 presentó el mejor desempeño, ya que registró la menor densidad de corriente de corrosión ($i_{corr} = 0.0148$ mA/cm²), la mayor resistencia a la polarización ($R_p = 1799.3 \Omega$) y la menor velocidad de corrosión (0.023 mm/año). Estos resultados indican que el recubrimiento fue capaz de reducir de manera efectiva la actividad electroquímica sobre la superficie del acero, proporcionando una mayor protección frente al medio corrosivo.

La condición sin recubrimiento mostró un comportamiento intermedio. Aunque presentó valores de i_{corr} y velocidad de corrosión superiores a los de REC1, su desempeño fue considerablemente mejor que el de REC2. Esto se refleja en una resistencia a la polarización de 1055.2Ω y una velocidad de corrosión de 0.0409 mm/año, lo que sugiere una menor capacidad de protección, pero sin alcanzar los niveles de deterioro observados en el sistema REC2.

Por su parte, REC2 exhibió el comportamiento menos favorable. El valor más negativo de potencial de corrosión ($E_{corr} = -858.952 \text{ mV}$), junto con la mayor densidad de corriente de corrosión (0.0700 mA/cm^2) y la menor resistencia a la polarización (289.6Ω), indican que este sistema fue el más susceptible al ataque corrosivo. Además, la velocidad de corrosión obtenida (0.1089 mm/año) fue aproximadamente cinco veces mayor que la registrada para REC1, lo que evidencia una pérdida importante de su capacidad protectora.

En conjunto, los resultados muestran que REC1 fue el recubrimiento más eficiente para disminuir la corrosión del acero, mientras que REC2 presentó el menor nivel de protección, incluso por debajo de la condición sin recubrimiento.

5.5 Comparación del desempeño de recubrimientos

La integración de las técnicas de OCP, LPR, PEIS y curvas de polarización confirma una jerarquía clara en el desempeño de los sistemas evaluados. El recubrimiento REC1 se consolidó como la protección más eficiente, mostrando los potenciales más nobles, la mayor resistencia a la polarización (R_p) y a la transferencia de carga (R_{ct}), lo que se tradujo en una reducción de la velocidad de corrosión a 0.023 mm/año. Los diagramas de Nyquist y Bode ratifican este comportamiento mediante semicircunferencias de gran diámetro y una respuesta altamente capacitiva, indicando una barrera física íntegra y estable frente al electrolito.

En contraste, el recubrimiento REC2 exhibió un desempeño deficiente, superando incluso la tasa de degradación de la varilla sin protección con una velocidad de 0.109 mm/año. Sus potenciales significativamente más negativos, bajos valores de impedancia y un ajuste de circuito equivalente asociado a procesos de difusión y heterogeneidad, sugieren la presencia de defectos estructurales o falta de adherencia. Mientras que la varilla sin recubrimiento mantuvo un comportamiento intermedio típico de un material activo, los resultados concluyen que REC1 actúa como un inhibidor eficaz de los procesos electroquímicos, mientras que REC2 promueve un entorno que acelera la disolución del acero.

5.5.1 Influencia de los recubrimientos en la integridad del acero



Figura 27. Varilla de acero corrugado sin recubrimiento antes de la exposición.

En la Figura 27 se observa el estado inicial de la varilla de acero corrugado sin recubrimiento. La superficie presenta una coloración grisácea uniforme característica del proceso de laminado, sin indicios visibles de corrosión atmosférica severa ni pérdida de sección transversal, sirviendo como muestra de control para el ensayo. Se aprecian las corrugaciones transversales limpias y la ausencia de capas protectoras, permitiendo observar la textura rugosa primaria del metal antes de ser sometido a los agentes corrosivos.

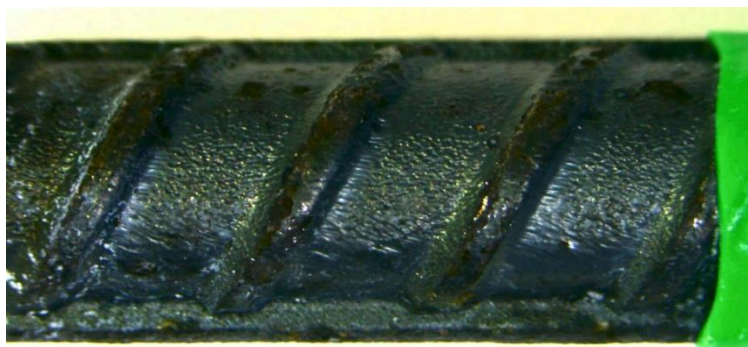


Figura 28. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC1 antes de la exposición.

La Figura 28 muestra la varilla de acero corrugado recubierta con el sistema REC1, en el cual se observa una capa de protección continua y brillante, indicativa de una aplicación uniforme. El recubrimiento altera la textura superficial original, proporcionando una barrera física contra agentes corrosivos previa al inicio de las pruebas.

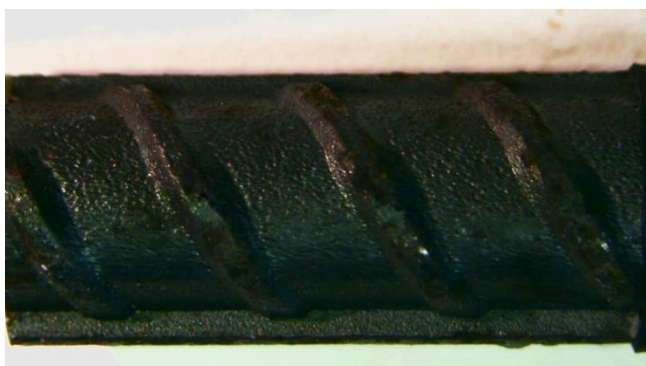


Figura 29. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC2 antes de la exposición.

La Figura 29 muestra el estado inicial de la varilla de acero corrugado con REC2. Se observa una película continua y brillante que rellena la porosidad del acero, estableciendo la línea base de contraste para futuras evaluaciones comparativas frente al proceso de oxidación y/o degradación del polímero en días subsecuentes.



Figura 30. Varilla de acero corrugado sin recubrimiento en el día 7 de exposición.

En la Figura 30 se puede observar el estado del espécimen testigo tras siete días de sometimiento al ambiente corrosivo. Se observa una degradación avanzada en la superficie del metal, caracterizada por la formación generalizada de óxidos de hierro (herrumbre) de coloración rojiza-anaranjada. La acumulación de productos de corrosión es heterogénea, concentrándose principalmente en las crestas de las corrugaciones.

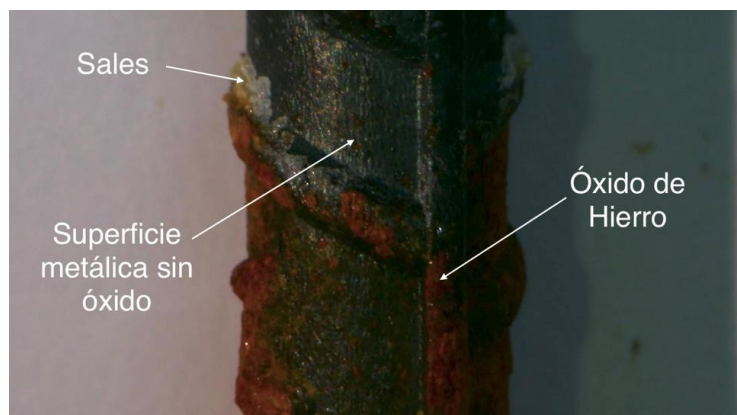


Figura 31. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC1 en el día 7 de exposición.

La Figura 31 presenta el inicio de la degradación del sistema de protección REC1; aunque se mantiene gran parte de la integridad del recubrimiento original en la varilla, se identifican productos de corrosión de coloración rojiza que emergen desde la interfaz metal-recubrimiento, así como una acumulación de sales en las crestas de la varilla. La presencia de herrumbre sugiere una pérdida de adherencia o la existencia de microporosidades en la capa REC1, factores que permitieron el contacto directo del agente corrosivo con el sustrato metálico.

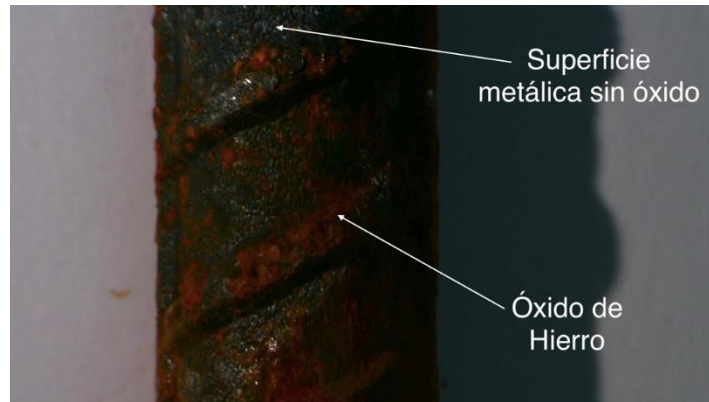


Figura 32. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC2 en el día 7 de exposición.

Por otro lado, la Figura 32 muestra el avance del deterioro del espécimen con recubrimiento REC2 tras siete días de ensayo. Se identifica una formación de óxidos superficiales que cubren tanto las crestas como los valles de la varilla; la textura visual indica una pérdida de la continuidad del recubrimiento original, manifestando una baja resistencia ante el avance de la corrosión. A diferencia de la muestra REC1, el sistema REC2 presenta una falla más generalizada, lo que sugiere que el recubrimiento ha permitido una mayor permeación de agentes agresivos hacia el acero base.



Figura 33. Varilla de acero corrugado sin recubrimiento en el día 20 de exposición.

Al finalizar el periodo de ensayo, la Figura 33 muestra que el espécimen testigo presenta una corrosión generalizada y severa. Se observa una capa densa y pulverulenta de óxidos de hierro que recubre la totalidad de la superficie, ocultando la textura original del metal. Así mismo, se aprecia que las corrugaciones han perdido definición debido a la formación de una costra de óxido, lo que representa el nivel máximo de deterioro observado en el estudio comparativo.



Figura 34. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC1 en el día 20 de exposición.

En la Figura 34 se observa que para el día 20 de exposición para la varilla con recubrimiento REC1 hay una degradación avanzada del sistema de protección. La superficie presenta una distribución irregular de óxidos de hierro que cubren gran parte del cuerpo de la varilla, especialmente en las crestas. A pesar del deterioro, el recubrimiento REC1 muestra una mayor persistencia en comparación con la muestra sin protección, aunque la presencia de sales acumuladas y herrumbre confirma la saturación de la barrera frente al medio corrosivo.



Figura 35. Varilla de acero corrugado con recubrimiento REC2 en el día 20 de exposición.

Finalmente, la Figura 35 documenta el deterioro máximo del sistema REC2. La formación generalizada de óxido y la coloración rojiza uniforme, donde se identifican apenas pequeñas áreas con remanentes del material original, demuestran que el recubrimiento no logró contener el avance de la corrosión. Este estado final es comparable al nivel de degradación observado en la muestra con recubrimiento REC1 (Figura 38), permitiendo concluir que el sistema REC2 ofrece una menor eficacia protectora para periodos prolongados de exposición.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

6.1 Análisis del comportamiento anticorrosivo en ambiente marino

Los resultados obtenidos mediante técnicas electroquímicas (potencial a circuito abierto, LPR, EIS y curvas de polarización) permitieron establecer una evaluación integral del comportamiento anticorrosivo de las varillas estudiadas en un ambiente simulado marino.

El análisis de potencial a circuito abierto mostró que la muestra con recubrimiento REC1 presenta valores más nobles en comparación con la varilla sin recubrimiento (VSR), lo que indica una menor tendencia termodinámica a la corrosión. En contraste, la muestra REC2 exhibió potenciales más negativos, evidenciando una mayor susceptibilidad a procesos corrosivos.

Los resultados de resistencia a la polarización (LPR) y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) confirmaron esta tendencia. La muestra REC1 presentó mayores valores de resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}), lo que sugiere una mayor oposición al flujo de corriente corrosiva y, por ende, una mejor protección del sustrato metálico. Por el contrario, la muestra REC2 mostró valores menores de R_{ct} , asociados a una menor eficiencia del recubrimiento.

En las curvas de polarización potenciodinámica, la muestra REC1 evidenció una disminución significativa en la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), así como un desplazamiento hacia potenciales más positivos. En cambio, REC2 presentó la mayor I_{corr} y un comportamiento más activo, incluso superior al de la varilla sin recubrimiento.

En conjunto, estos resultados indican que el desempeño anticorrosivo sigue la tendencia:

$$\text{REC1} > \text{VSR} > \text{REC2}$$

lo que confirma que la efectividad del recubrimiento depende de su capacidad para actuar como barrera física y modificar la cinética electroquímica del sistema.

6.2 Relación entre desempeño electroquímico y durabilidad

Los resultados obtenidos muestran una clara correlación entre estos parámetros. La muestra REC1, que presentó los valores más bajos de I_{corr} y los mayores valores de R_{ct} , también mostró la menor velocidad de corrosión, lo que implica una mayor vida útil del material. Este comportamiento sugiere que el recubrimiento actúa eficientemente como barrera protectora, limitando tanto la difusión de especies agresivas como la transferencia de carga en la interfaz metal-electrolito.

Por otro lado, la muestra REC2 presentó una alta densidad de corriente de corrosión y bajos valores de resistencia electroquímica, lo que se traduce en una mayor velocidad de degradación y, por ende, una menor durabilidad. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de defectos, porosidad o baja adherencia del recubrimiento.

La varilla sin recubrimiento, sin embargo, mostró un comportamiento intermedio, caracterizado por una corrosión activa sin mecanismos de protección.

Estos resultados confirman que los parámetros electroquímicos obtenidos mediante técnicas como EIS y CPP son indicadores confiables del desempeño a largo plazo de los materiales en ambientes agresivos.

6.3 Discusión ambiental del uso de thinner y silicón

El uso de thinner y silicón como parte del sistema de recubrimiento plantea consideraciones relevantes desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, en el presente estudio destaca el aprovechamiento de thinner residual, lo que representa una alternativa favorable dentro de los

principios de economía circular y gestión sostenible de residuos. La reutilización de este solvente permite reducir la generación de desechos peligrosos y disminuir la demanda de thinner nuevo, contribuyendo al aprovechamiento de recursos que de otra manera requerirían tratamientos especiales para su disposición final.

Si bien el thinner contiene compuestos orgánicos volátiles (VOC) que pueden generar emisiones durante su aplicación, su reutilización ayuda a maximizar el aprovechamiento del material ya existente, reduciendo el consumo de materias primas y el impacto ambiental asociado a su producción y transporte. Asimismo, un manejo adecuado durante su almacenamiento y aplicación permite minimizar los riesgos potenciales para la salud y el medio ambiente.

Por otra parte, el silicón presenta características que pueden considerarse ambientalmente favorables debido a su elevada estabilidad química, resistencia a la humedad y capacidad para formar barreras protectoras duraderas. Estas propiedades contribuyen a prolongar la vida útil de los recubrimientos y de los elementos metálicos protegidos, reduciendo la necesidad de mantenimiento frecuente, reparaciones o reemplazos prematuros. Como consecuencia, se disminuye el consumo de materiales, energía y recursos asociados a las actividades de conservación y rehabilitación de las estructuras.

Desde una perspectiva de ciclo de vida, la mayor durabilidad proporcionada por el silicón y el aprovechamiento de thinner reutilizado pueden generar beneficios ambientales indirectos al reducir tanto la generación de residuos como el consumo de insumos a largo plazo. En este sentido, un sistema de recubrimiento con mejor desempeño anticorrosivo, como el observado en REC1, no solo ofrece ventajas técnicas, sino que también puede contribuir a una gestión más eficiente de los recursos al extender la vida útil del acero y disminuir la frecuencia de intervención y mantenimiento.

6.4 Implicaciones para la ingeniería civil costera

Los resultados obtenidos tienen implicaciones relevantes para el diseño y mantenimiento de infraestructura en ambientes marinos, donde la corrosión del acero de refuerzo es uno de los principales mecanismos de deterioro.

La evidencia experimental demuestra que la selección adecuada de recubrimientos puede mejorar significativamente la resistencia a la corrosión del acero, prolongando la vida útil de estructuras como puentes, muelles y edificaciones costeras.

El desempeño deficiente observado en REC2 resalta la importancia de evaluar no solo la presencia de un recubrimiento, sino su calidad, adherencia y comportamiento electroquímico. Un recubrimiento inadecuado puede incluso acelerar el proceso corrosivo, generando riesgos estructurales.

Por lo tanto, la implementación de técnicas electroquímicas como herramientas de evaluación permite una mejor selección de materiales y estrategias de protección, contribuyendo a una mayor seguridad y sostenibilidad en la ingeniería civil costera.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones generales

El empleo de técnicas electroquímicas complementarias (OCP, LPR, EIS y CPP) permitió una caracterización integral y precisa del comportamiento frente a la corrosión de las varillas de acero corrugado bajo estudio. Los resultados determinan que el recubrimiento REC1 obtuvo el desempeño anticorrosivo más eficiente, fundamentado en un potencial de corrosión más noble, una reducida

densidad de corriente y la mayor resistencia a la transferencia de carga entre todas las muestras evaluadas.

Por el contrario, la muestra REC2 exhibió el comportamiento más deficiente, registrando altas velocidades de corrosión y parámetros electroquímicos que evidencian una capacidad protectora insuficiente frente al medio agresivo. Resulta notable que la varilla sin recubrimiento (VSR) presentó un desempeño intermedio con procesos de corrosión activa, superando en resistencia al sistema REC2. Este orden jerárquico confirma que, bajo las condiciones experimentales dadas, el sistema REC1 actúa como una barrera efectiva, mientras que el sistema REC2 no solo falla en su función protectora, sino que acelera los procesos de degradación en comparación con el acero desnudo.

7.2 Conclusiones ambientales

El análisis del impacto ambiental derivado de los procesos de protección superficial subraya la importancia de implementar estrategias de economía circular en el laboratorio e industria. Se concluye que, si bien el uso de thinner implica riesgos inherentes debido a la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), la implementación de protocolos para su reutilización se presenta como una solución crítica. Al recuperar y reutilizar este solvente, se reduce significativamente el volumen de residuos químicos peligrosos generados y se minimiza la demanda de fabricación de producto virgen, mitigando así la huella ecológica del ensayo.

Por otro lado, el silicón ofrece ventajas notables en cuanto a estabilidad y durabilidad del recubrimiento; sin embargo, debido a los retos que presenta su degradación natural en el ambiente, su uso debe ser estrictamente controlado. Es aquí donde la recuperación del thinner cobra mayor relevancia, pues permite una limpieza y mantenimiento de los sistemas de aplicación sin incrementar el impacto ambiental negativo.

En definitiva, la selección de recubrimientos debe considerar tanto su eficiencia anticorrosiva como su sostenibilidad. Se determina que la reutilización sistemática de solventes es una vía viable para equilibrar la necesidad de protección técnica del acero con la responsabilidad ambiental, transformando un residuo potencialmente contaminante en un recurso operativo valioso.

7.3 Recomendaciones técnicas para infraestructura en ambientes marinos

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda priorizar el uso de recubrimientos que hayan demostrado una eficiencia electroquímica comprobada, como fue el caso de REC1, debido a su mejor desempeño como barrera frente al medio agresivo. Asimismo, se sugiere evitar la aplicación de recubrimientos que no hayan sido previamente evaluados mediante técnicas electroquímicas, ya que esto podría comprometer la durabilidad de la infraestructura y aumentar su susceptibilidad al deterioro prematuro. De igual forma, es conveniente implementar programas de monitoreo periódico mediante técnicas como la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y la resistencia a la polarización lineal (LPR), con el fin de evaluar el estado del acero durante su servicio y detectar oportunamente posibles procesos de corrosión. Finalmente, debe considerarse la calidad de aplicación del recubrimiento como un factor determinante en su desempeño, pues una preparación o aplicación deficiente puede afectar de manera significativa su capacidad protectora.

7.4 Recomendaciones para trabajos futuros

Para complementar y ampliar los hallazgos de esta investigación, se recomienda evaluar el comportamiento de los recubrimientos a largo plazo mediante ensayos de exposición acelerada, que permitan reproducir de forma más extensa las condiciones de servicio. También sería conveniente analizar la influencia de variables ambientales como la temperatura, la salinidad y el pH, con el propósito de determinar su efecto sobre el desempeño electroquímico de los recubrimientos. Además, se sugiere complementar los estudios con técnicas microestructurales, como microscopía

electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS), a fin de identificar con mayor precisión los mecanismos de degradación. Por último, resulta pertinente desarrollar formulaciones de recubrimientos más amigables con el medio ambiente, particularmente con menor contenido de compuestos orgánicos volátiles (VOC), sin comprometer su capacidad de protección anticorrosiva.

REFERENCIAS

- Aboagye, E. A., Chea, J. D., & Yenkie, K. M. (2021). Systems level roadmap for solvent recovery and reuse in industries. *iScience*, 24(10), 103114.
- ACI Committee 222. (2019). Protection of metals in concrete against corrosion (ACI 222R-19). American Concrete Institute. http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/222r_01.pdf
- ACI Committee 224. (2001). Control of cracking in concrete structures (ACI 224R-01). American Concrete Institute. https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/224R_01Ch3.pdf
- ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19). American Concrete Institute. <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/318buildingcodeportal.aspx>
- Ahmad, Z. (2006). Principles of corrosion engineering and corrosion control. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- American Concrete Institute. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08) and commentary American Concrete Institute. https://www.academia.edu/10778655/ACI_318_08_Espa%C3%B1ol
- Almazán Corona, L. E. (2017). Evaluación de la inhibición de corrosión en aceros industriales con moléculas orgánicas de nopal [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMex.
- Andriot, M., DeGroot, J. V., Meeks, R., Gerlach, E., et al. (2009). Silicones in industrial applications. En R. De Jaeger & M. Gleria (Eds.), *Inorganic polymers*. Nova Science Publishers.
- Arzola, S. (2001). Técnicas electroquímicas aplicadas al estudio de la corrosión de un acero al carbono: Influencia de la concentración de Na₂SO₄ [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- ASTM International. (2022). ASTM A615/A615M-22: Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement. <https://www.scribd.com/document/742509030/ASTM-A615-A615M-2022-Standard-Specification-for-Deformed-and-Plain-Carbon-Steel-Bars-for-Concrete-Reinforcement>
- ASTM International. (2024). ASTM A615/A615M-24: Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement. https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_or/20240621/ASTM/A%20615%20-%20A%20615M%20-%202024.pdf
- ASTM International. (2016). ASTM A767/A767M-16: Standard specification for zinc-coated (galvanized) steel bars for concrete reinforcement. <https://es.scribd.com/document/979815395/ASTM-A767-A767M-2016>
- ASTM International. (2017). ASTM A775/A775M-17: Standard specification for epoxy-coated reinforcing steel bars. <https://es.scribd.com/document/811186610/ASTM-A775-A775M>
- ASTM International. (2020). ASTM C920-20: Standard specification for elastomeric joint sealants.

- ASTM International. (2018). *ASTM G44-99(2018): Standard practice for exposure of metals and alloys by alternate immersion in neutral 3.5% sodium chloride solution*. ASTM International.
<https://es.scribd.com/document/356747559/ASTM-G44>
- BenchChem Technical Support Team. (2026). Application notes and protocols: Calomel in electrochemistry. BenchChem.
https://www.benchchem.com/pdf/Application_Notes_and_Protocols_Calomel_in_Electrochemistry.pdf
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2004). Corrosion of steel in concrete. Wiley-VCH.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. (2013). Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair (2.^a ed.). Wiley.
- BioLogic. (2024). SP-150e potentiostat. BioLogic Science Instruments. <https://www.biologic.net/products/sp-150e-potentiostat/>
- BioLogic. (2025). What is electrochemical impedance spectroscopy (EIS). BioLogic Science Instruments. <https://www.biologic.net/topics/what-is-eis/>
- Broomfield, J. P. (2007). Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair (2.^a ed.). Taylor & Francis.
- Calvo Valdés, A., Medeiros, M. H. F., & Macioski, G. (2021). Sensor de corrosión para monitorear estructuras de hormigón armado: Ensayos en especímenes de hormigón armado. *Revista ALCONPAT*, 11(3), 64–87.
- Cabrera Salvatierra, J. E., & Aguilar Marín, P. (2024). Evaluación del comportamiento de recubrimientos orgánicos anticorrosivos aplicados a superficies de acero de bajo carbono expuestas en atmósfera marina. *Revista de Investigación Científica Tayacaja*, 7(2), 23.
<https://doi.org/10.46908/tayacaja.v7i2.234>
- CANACERO. (2018). NMX-B-457-CANACERO-2018: Industria siderúrgica—Varilla corrugada de acero proveniente de lingote o palanquilla para refuerzo de concreto—Especificaciones y métodos de prueba.
- Carbajal-De la Torre, G., Espinosa-Medina, M. A., Pacheco-Ibarra, J. J., Ibarra-Bracamontes, L. A., Galván, S. R., & Espitia Cabrera, M. I. (2011). Resistencia a la corrosión de películas cerámicas delgadas. *Superficies y Vacío*, 24(4), 121–125.
- Castro Borges, P. (1995). Difusión y corrosión por iones cloruro en el concreto reforzado [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Contreras Cruz, J. (2013). Correlación de parámetros electroquímicos de aleaciones de ánodos de magnesio mediante técnicas de resistencia a la polarización lineal, espectroscopía de impedancia electroquímica y ruido electroquímico [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos].
- Croll, S. G. (2021). The formulation of coatings and paints: Physics and chemistry of film formation. Elsevier.

- Delimi, A., Ferkous, H., Alam, M., Djellali, S., Sedik, A., Abdesalem, K., Boulechfar, C., Belakhdar, A., Yadav, K. K., Cabral-Pinto, M. M. S., Jeon, B.-H., & Benguerba, Y. (2022). Corrosion protection performance of silicon-based coatings on carbon steel in NaCl solution: A theoretical and experimental assessment of the effect of plasma-enhanced chemical vapor deposition pretreatment. *RSC Advances*, 12, 15601–15612. <https://doi.org/10.1039/D1RA08848C>
- Donadio, M., Capacho, J., & Santander, L. (2023). Gestión integral de la corrosión. *Análisis documental. Revista ALCONPAT*, 13(2), 235–253.
- Dow. (2017). Silicone sealants technical manual. Dow Construction Chemicals.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/4384c08da576329c/original/Towards-a-circular-economy-Business-rationale-for-an-accelerated-transition.pdf>
- Environmental Protection Agency. (2005). Managing your environmental responsibilities: A planning guide for construction and development. Office of Enforcement and Compliance Assurance. <https://www.epa.gov/npdes/managing-your-environmental-responsibilities-planning-guide-construction-and-development>
- Euclid Chemical Toxement. (2020). Prevención de la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto con productos Euclid Chemical Toxement. https://www.eucomex.com.mx/media/3168/corrosio-n_del_acero_en_el_concreto.pdf
- Fernández Prada, M. Á. (1998). El ambiente marino y sus procesos de degradación sobre el hormigón. En *Consideraciones de diseño del hormigón en estructuras offshore* (Cap. 2). Universitat Politècnica de Catalunya.
- fib. (2010). Model code 2010. Fédération Internationale du Béton. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9783433604090.fmatter>
- Fontana, M. G. (1986). *Corrosion engineering* (3.^a ed.). McGraw-Hill.
- GalvInfo Center. (2007). Cómo protege el zinc al acero (GalvInfoNote 3.1, Rev. 0). GalvInfo.
- Garcés, P., Climent, M. A., Carmona, J., & Sánchez de Rojas, M. J. (2021). Alargamiento de la vida útil de estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos mediante la aplicación de técnicas electroquímicas. *Revista ALCONPAT*, 11(1), 48–60.
- García-García, A. A., Martínez-Salinas, L. G., & Sánchez-Salinas, R. (2023). Gestión de residuos peligrosos en talleres mecánicos: Un estudio de caso. *Acta Universitaria*, 33, e3652.
- Gómez Echevarría, C. R., & Medina Novoa, J. H. (2023). Importancia de la protección de los elementos de concreto armado mediante recubrimientos superficiales frente al ataque de cloruros en ambientes marinos, Trujillo 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte].
- González Fernández, J. A. (1989). Control de la corrosión: Estudio y medida por técnicas electroquímicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Graiver, D., Farminer, K. W., & Narayan, R. (2003). A review of the fate and effects of silicones in the environment. *Journal of Polymers and the Environment*, 11(4), 129–136.

- Granada Aguirre, L. F., Vallejo Morán, L. A., Moreno Ortega, S. P., & Toro Perea, E. F. (2015). Modelo de gestión integral para el manejo de residuos sólidos peligrosos: Caso taller de mantenimiento de buses para transporte masivo [Tesis de pregrado]. Universidad de San Buenaventura Cali.
- Guía ISTAS. (2007). Sustitución de disolventes orgánicos en la industria. Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud. <https://istas.net/descargas/guia%20disolventes.pdf>
- Gómez Figueroa, A. (2017). Evaluación de la protección a la corrosión en el acero de refuerzo implementando recubrimientos a base de nanotubos de carbono adicionado con zinc NTC-Zn como protección catódica [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Chetumal, Tecnológico Nacional de México].
- González Guzmán, J. A. (2010). Protección frente a la corrosión metálica con recubrimientos poliméricos: estudio electroquímico y microelectroquímico (Tesis doctoral). Universidad de La Laguna, España. ISBN: 978-84-15287-03-2. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=37811>
- González Mendoza, J. C. (2017). Gestión de la recuperación de disolventes en una empresa farmoquímica [Trabajo terminal de grado de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Harb, S. V., Trentin, A., Torrico, R. F. O., Pulcinelli, S. H., Santilli, C. V., & Hammer, P. (2017). Organic-inorganic hybrid coatings for corrosion protection of metallic surfaces. En M. Aliofkhazraei (Ed.), *New technologies in protective coatings*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/67909>
- Hernández-Castañeda, O., & Mendoza-Escobedo, C. J. (2009). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 10(3), 335-342.
- Herrera, et al. (2020). Electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Huang, X., Huang, Z., Luan, Y., Wang, T., Bai, Y., Dao, V., Liao, P., Zhou, Y., Youssef, A., & Ekaputri, J. J. (2025). Life cycle environmental impact of flexural steel reinforced concrete beams under the coupled degradation of crack development and steel corrosion attack using a stochastic approach. *Construction and Building Materials*, 497, 143827.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2012). NTE INEN 2163:2012. Solventes. Diluyentes (Thinner). Requisitos (Primera revisión).
- International Organization for Standardization. (2015). Environmental management systems — Requirements with guidance for use (ISO Standard No. 14001:2015).
- ISO. (2017). ISO 12944-1: Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 1: General introduction.
- Jones, F. N., Nichols, M. E., & Pappas, S. P. (2017). *Organic Coatings: Science and Technology* (4.^a ed.). Wiley.
- Klosowski, J. M. (2007). *Sealants in construction* (2.^a ed.). CRC Press.
- Koleske, J. V. (Ed.). (2018). *Paint and coating testing manual: Fifteenth edition of the Gardner-Sward handbook* (15.^a ed.). ASTM International.

- Llallire Pariona, A. B., Pacheco Uribe, E. T., Pineda Miranda, C. A., Rivera Benavides, J. A., & Salinas Bernuy, F. (2020). Ensayos y recomendaciones para el concreto en estructuras cercanas al mar [Tesis de bachiller, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- López Caamaño, M. (2015). Galvanización en caliente: el método más efectivo de protección contra la corrosión del acero. *Técnica Industrial*, 311, 68–69.
- López Celvera, S. A. (2018). Cinética de corrosión de un acero X80 inmerso en agua de mar bajo condiciones de flujo turbulento [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana].
- López Guiot, J. L. (2023). Influencia de la adición de líquidos iónicos derivados de amonio cuaternario en sistemas corrosivos de acero API X52 en medio ácido [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla].
- Martínez González, G. M. (2022, 6 de abril). Geopolímeros y sus aplicaciones. Tecnológico Nacional de México en Celaya. <https://celaya.tecnm.mx/geopolimeros-y-sus-aplicaciones/>
- Marulanda A., J. L., Zapata Meneses, A., & Isaza Velásquez, E. (2007). Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico. *Scientia et Technica*, Año XIII(34), 237.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Metrohm. (2023, noviembre). Determinación de la velocidad de corrosión con INTELLO (AN-COR-019). https://www.metrohm.com/es_mx/applications/application-notes/autolab-applikationen-anautolab/an-cor-019.html
- Metrohm. (2023). Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). (2012). Directrices para el manejo y la eliminación seguros de los productos químicos industriales. Naciones Unidas.
- ONNCCE. (2017). NMX-C-155-ONNCCE-2017. Industria de la construcción—Concreto hidráulico—Especificaciones.
- Osornio Saldaña, D. B. (2000). Evaluación y diagnóstico de estructuras de concreto reforzado en ambiente marino [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pachón, A. (2017). Durabilidad de las armaduras corrugadas de acero inoxidable en estructuras de hormigón armado en ambientes marinos [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid]. Repositorio Dialnet.
- PalmSens. (2024). Electrochemical impedance spectroscopy (EIS).
- Pedron, J. M. (2005). Metodología para evaluar la calidad del hormigón frente al ingreso de agentes agresivos [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata].
- Peña Caravaca, J. P., Nelson Edelstein, P. F., Díaz Sánchez, Á., Arganis Juárez, C. R., Desdín García, L. F., & Antuch Cubillas, M. (2023). Mediciones de espectroscopía de impedancia electroquímica en estructuras de concreto reforzado. *Memorias del Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana*.

- Pérez Villacís, C. A. (2012). Evaluación mediante técnicas electroquímicas del comportamiento de recubrimientos alquídicos utilizados en la protección anticorrosiva del acero [Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional].
- Piratoba, V., Olaya, J., & Mariño, A. (2009). Aspectos básicos en la interpretación de diagramas de impedancia electroquímica. *Revista ION*, 22(1).
- Razo, N. (2025). Manejo de disolventes en la industria y sus mecanismos toxicológicos [Proyecto de integración, Universidad Autónoma Metropolitana]. Repositorio Zaloamati UAM-A.
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering* (4.^a ed.). Wiley-Interscience.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). *Informe del Medio Ambiente: Gestión de Residuos Peligrosos en México*. Gobierno de México.
- Sosa Baz, M. R. (2003). Deterioro de estructuras de concreto armado en ambiente marino: Efecto del medio de exposición [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].
- SSPC. (2012). *Protective coatings systems and corrosion prevention*. SSPC: The Society for Protective Coatings.
- Stockwell, C. E., Coggon, M. M., Gkatzelis, G. I., Ortega, J., McDonald, B. C., Peischl, J. & Warneke, C. (2021). Volatile organic compound emissions from solvent- and water-borne coatings – compositional differences and tracer compound identifications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 6005–6021.
- Torobeo, L. S., & Tenorio, M. G. (2021). Estudio de la efectividad de tres tipos de inhibidores de corrosión para la protección de estructuras de concreto armado [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Torres Acosta, A. A., Pérez Quiroz, J. T., Ramírez Rentería, A. J., & Martínez Madrid, M. (2006). Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales (Publicación Técnica No. 287). Instituto Mexicano del Transporte.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Ucci Galasso, M. S. (2025). Películas protectoras ricas en iones silicato para mitigar la corrosión del acero de construcción [Trabajo final de grado, Universidad Nacional de Mar del Plata]. Repositorio Institucional de la UNMDP.
<https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/1114/MUcciGalasso-TFG-IM-2025.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Universidad Complutense de Madrid. (2022). Experimento 1: Potenciales de corrosión (Proyecto Innova-Docencia No. 250, 2021–2022).
- Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV). (s. f.). Ficha técnica de seguridad: Thinner. Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas.

- Vásquez Q., C., Aguirre R., L. O., & García, J. (2016). Corrosión en armaduras de hormigón reforzado que contienen cloruros de calcio. *Revista ION*, 29(1), 17-26.
- Villalobos Orozco, F. J. (1988). Métodos electroquímicos para determinar la velocidad de corrosión de la hojalata [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Villao Vera, R. A. (2021). Actualidad de las técnicas de análisis de corrosión en estructuras de concreto reforzado. *E-IDEA Journal of Engineering Science*, 3(8), 1–10.
- Wacker Chemie AG. (2016). Silicones: Sustainability and life cycle performance.
- Zhang, Y., Li, X., Wang, H., Liu, J., & Chen, Z. (2024). Preparation of silicone coating and its anti-ice and anti-corrosion properties. *Coatings*, 14(6), 699.