

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE CONCRETO CON
GOMA XANTANA COMO SUPERPLASTIFICANTE NATURAL EXPUESTO A
ASPERSIÓN DE CLORUROS**

TÉSIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA:

Luis Manuel Silva Ramos

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Luis Daimir López León

CO-DIRECTOR:

Mtro. Juan Carlos Yee Armenta

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO.

ABRIL, 2026





Mineral de la Reforma, Hgo., a 21 de enero de 2026

Número de control: ICBI-D/086/2026

Asunto: Autorización de impresión.

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

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 al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Luis Manuel Silva Ramos**, quien presenta el trabajo de titulación **“Evaluación de la resistencia a la corrosión de concreto con goma xantana como superplastificante natural expuesto a aspersion de cloruros”**, 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. Iván Erick Castañeda Robles

Secretario: Mtro. Juan Carlos Yee Armenta

Vocal: Dr. Luis Daimir López León

Suplente: Dr. Francisco Javier Olgún 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

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184

Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001

direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



2025



uaeh.edu.mx

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	6
GLOSARIO DE TÉRMINOS:.....	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.2. ANTECEDENTES.....	15
1.2.1. Corrosión en concreto armado.....	15
1.2.2. Uso de superplastificantes en concreto.....	16
1.2.3. Alternativas sostenibles: uso de gomas naturales	17
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	18
1.4. OBJETIVO GENERAL.....	21
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
1.7. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	23
1.8. SUBPREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	23
1.9. HIPÓTESIS	23
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	24
2.1. EL CONCRETO COMO MATERIAL COMPUESTO	25
2.1.1. Composición y propiedades fundamentales del concreto	26
2.1.2. Función del acero de refuerzo	27
2.1.3. Problemas comunes en estructuras de concreto armado	28
2.2. DETERIORO DEL CONCRETO EN AMBIENTES AGRESIVOS.....	29

2.2.1. Tipos de agentes agresivos (físicos, químicos, biológicos)	31
2.2.2. Mecanismos de degradación del concreto	31
2.2.3. Daño estructural por ingreso de cloruros	32
2.3. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN CONCRETO.....	34
2.3.1. Principios de corrosión	34
2.3.2. Influencia de los cloruros en la despasivación	35
2.3.3. Efectos de la corrosión en el desempeño estructural.....	36
2.3.4. Factores que influyen en la velocidad de corrosión	37
2.4. MÉTODOS PARA MITIGAR LA CORROSIÓN EN CONCRETO ARMADO	39
2.4.1. Recubrimientos y barreras físicas.....	40
2.4.2. Uso de aditivos y materiales cementantes suplementarios.....	41
2.4.3. Diseño de mezclas con baja permeabilidad.....	42
2.5. SUPERPLASTIFICANTES EN EL CONCRETO	43
2.5.1. Definición y clasificación de aditivos plastificantes.....	44
2.5.2. Mecanismos de acción de los superplastificantes.....	45
2.5.3. Efecto de los superplastificantes en la trabajabilidad, resistencia y durabilidad	46
2.5.4. Impacto ambiental de los superplastificantes sintéticos	47
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	48
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	49
3.2. MATERIALES UTILIZADOS	50
3.3. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO	52
3.4. FABRICACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES	55
3.4.1 Especímenes para resistencia a la compresión.....	55
3.4.2 Especímenes para resistencia a la tracción indirecta	57
3.4.3 Especímenes para potenciales de media celda.....	57
3.4.4. Condiciones de curado.....	58
3.5. OBTENCIÓN DE LA GOMA XANTANA A PARTIR DE JARABE DE AGAVE.....	61

3.5.1. Preparación del sustrato de fermentación	61
3.5.2. Inoculación bacteriana con <i>Xanthomonas campestris</i>	61
3.5.3. Fermentación y monitoreo de condiciones.....	62
3.5.4. Recuperación y purificación de la goma xantana.....	62
3.5.5. Pulverización y almacenamiento	62
3.6. ENSAYOS REALIZADOS.....	63
3.6.1. Resistencia a la compresión.....	65
3.6.2. Resistencia a la tracción indirecta	67
3.6.3. Potenciales de media celda.....	69
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1. ENSAYOS DE COMPRESIÓN	72
4.1.1. Resistencia a la compresión de las muestras	73
4.1.2. Discusión de los Resultados ensayos de compresión	73
4.2. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA.....	76
4.2.1. Resistencia a la tracción indirecta de las muestras.....	77
4.2.2. Discusión de los resultados de tracción indirecta.....	78
4.3. Potencial de Media Celda.....	80
CONCLUSIONES.....	84
LIMITACIONES DEL ESTUDIO	86
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	87
REFERENCIAS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Daño por desprendimiento del concreto reforzado debido a corrosión del acero por cloruros. Fuente: Concrete Preservation Technologies Ltd. (2017).....	14
Fig. 2. Daño por desprendimiento (spalling) del concreto reforzado debido a corrosión del acero por cloruros. Fuente: Concrete Preservation Technologies Ltd. (2017).....	16
Fig. 3. Goma xantana como aditivo en mezclas de concreto para mejorar la densidad de la matriz, reducir porosidad y retardar la penetración de iones agresivos.....	20
Fig. 4. Concreto armado. Fuente: Neville, A. M. (2011). Properties of concrete (5th ed.). Longman.....	25
Fig. 5. Corrosión en concreto armado, Fuente: Kenny, A. (2008).	27
Fig. 6. Deterioro del concreto en ambientes agresivos. Fuente: Baricevic, A. et al. (2015).	30
Fig. 7. Daño estructural por ingreso de cloruros. Fuente: Baricevic, A., et al. (2015)....	33
Fig. 8. Mezcla de agregados secos con goma. Fuente: Elaboración propia.	54
Fig. 9. Cilindros para prueba de compresión, con 0.3% de Goma. Fuente: elaboración propia.	56
Fig. 10. Especímenes para pruebas de potenciales de media celda con el 0.5% de goma. Fuente: elaboración propia.....	58
Fig. 11. Tina de exposición a cloruros para acelerar la corrosión. Fuente: elaboración propia.	60
Fig. 12. Resultados de resistencia a la tracción indirecta (kg/cm ²). Fuente: Elaboración propia.	77
Fig. 13. Mediciones de prueba de media celda. Fuente: elaboración propia.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de resistencias a la compresión de los distintos sistemas. Fuente: elaboración propia.....	72
Tabla 2. Resultados de resistencia a la tracción indirecta (kg/cm ²). Fuente: elaboración propia.	76
Tabla 3. Potenciales de corrosión para los distintos sistemas con goma de Xantana. Fuente: elaboración propia.....	82

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resistencia a la compresión de los distintos sistemas de concreto con goma de Xantana. Fuente: elaboración propia.....	75
Gráfica 2. Variación de la resistencia a la tracción en función del porcentaje de goma xantana utilizada. Fuente: elaboración propia.	79
Gráfica 3. Potenciales de corrosión para los distintos sistemas con goma de Xantana. Fuente: elaboración propia.	80

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aditivo: Sustancia que se incorpora al concreto durante el mezclado para modificar propiedades específicas como trabajabilidad, fraguado o durabilidad.

ASTM: Siglas de American Society for Testing and Materials, organización que elabora normas técnicas para materiales como el concreto.

Cement / Cemento portland: Aglomerante hidráulico que reacciona con agua, formando compuestos como el C-S-H que dan resistencia al concreto.

Compactación: Proceso mediante el cual se elimina el aire atrapado en la mezcla de concreto para obtener mayor densidad y mejor resistencia.

Concreto: Material compuesto formado por agua, cemento, agregados y posiblemente aditivos, que endurece al hidratarse el cemento.

Concreto armado: Sistema constructivo donde el concreto trabaja conjuntamente con acero de refuerzo para resistir cargas de compresión y tracción.

Curado: Proceso de mantener condiciones favorables de humedad y temperatura para que el concreto desarrolle su resistencia.

Durabilidad: Capacidad que tiene el concreto para resistir el paso del tiempo, la penetración de agentes agresivos y mantener su funcionalidad sin deteriorarse.

Goma xantana: Polisacárido biodegradable producido por fermentación bacteriana, utilizado en esta investigación como superplastificante natural.

Microestructura: Estructura interna del material (pastas, geles hidratados, poros, agregados) que determina propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto.

Permeabilidad: Capacidad del concreto para permitir el paso de fluido o iones a través de sus poros conectados; menor permeabilidad suele indicar mejor durabilidad.

Potenciales de media celda: Medición del voltaje entre una armadura de acero embebida en el concreto y un electrodo de referencia, utilizada para estimar la probabilidad de corrosión del refuerzo (según norma ASTM C876).

Probabilidad de corrosión: Clasificación basada en los valores de potencial de media celda; típicamente: menos negativos = baja probabilidad; más negativos = alta probabilidad de corrosión.

Recubrimiento (concreto-refuerzo): Espesor de concreto que separa el acero de refuerzo de la superficie de la estructura, esencial para proteger frente a agentes agresivos.

Relación agua/cemento (a/c): Proporción entre la masa de agua y la masa de cemento en la mezcla; una menor relación tiende a una matriz más densa y resistente.

Resistencia a la compresión: Valor máximo de esfuerzo que un cilindro de concreto puede soportar antes de fallar bajo carga axial, medido típicamente a 28 días.

Resistencia a la tracción indirecta (ensayo brasileño): Método para estimar la resistencia del concreto a esfuerzos de tracción aplicando carga diametral en un cilindro.

Segregación: Separación de los componentes de la mezcla de concreto (por ejemplo, agregados gruesos que se hunden) que reduce la homogeneidad y afecta resistencia y durabilidad.

Superplastificante: Tipo de aditivo que permite disminuir la relación agua/cemento sin perder trabajabilidad, mejorando resistencia y durabilidad del concreto.

Trabajabilidad: Facilidad con que una mezcla de concreto puede ser manejada, colocada y compactada sin pérdida de homogeneidad ni segregación.

Vacíos capilares: Poros resultantes del exceso de agua no reactiva en la mezcla de concreto; reducen la resistencia y aumentan la permeabilidad.

Zona de probabilidad de corrosión: Rango (viendo valores de potencial de media celda) en el que se estima la ocurrencia de corrosión activa del refuerzo.

RESUMEN

Este trabajo presenta una evaluación del comportamiento mecánico y potencial de corrosión en sistemas de concreto modificados con diferentes concentraciones de goma xantana (0.3%, 0.5% y 0.7% respecto al peso del cemento), con el objetivo de determinar su influencia en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta y potenciales de corrosión en medios agresivos. La metodología incluyó la fabricación de especímenes cilíndricos bajo condiciones controladas conforme a la normativa ASTM vigente, el curado por inmersión durante 28 días, y la exposición a una cámara de aspersión de cloruros con una solución de NaCl al 3.5% durante 40 días para evaluar los potenciales de media celda. Los resultados mostraron que la adición de 0.5% de goma xantana mejoró tanto la resistencia a la compresión como a la tracción indirecta, mientras que la concentración de 0.7% redujo ambos parámetros. Asimismo, se observó una menor probabilidad de corrosión en los sistemas con 0.5% y 0.7% de aditivo, lo cual indica un efecto positivo en la protección del acero de refuerzo. Estos hallazgos sugieren que el uso de goma xantana puede contribuir al desarrollo de concretos más durables y sostenibles en ambientes agresivos.

ABSTRACT

This study presents an evaluation of the mechanical behavior and corrosion potential in concrete systems modified with different concentrations of xanthan gum (0.3%, 0.5%, and 0.7% by cement weight), aiming to determine its influence on compressive strength, indirect tensile strength, and corrosion potential in aggressive environments. The methodology included the fabrication of cylindrical specimens under controlled conditions according to current ASTM standards, 28-day water curing, and exposure to a chloride spray chamber using a 3.5% NaCl solution for 40 days to assess half-cell potentials. The results indicated that adding 0.5% xanthan gum enhanced both compressive and tensile strength, whereas a 0.7% concentration decreased both parameters. Furthermore, a lower corrosion probability was observed in systems with 0.5% and 0.7% of the additive, suggesting an improved protective effect on the reinforcing steel. These findings demonstrate that xanthan gum can contribute to the development of more durable and sustainable concretes under aggressive environmental conditions.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La integridad del concreto armado está profundamente comprometida cuando los iones cloruro penetran la matriz del concreto, afectando la pasivación del acero de refuerzo y acelerando los procesos de corrosión. Esto representa un riesgo grave para la durabilidad estructural, ya que conduce a la formación de grietas, expansión por corrosión, y eventualmente falla estructural (Masoumi, Farokhzad, & Ghasemi, 2023).

El concreto armado es un material fundamental en la infraestructura moderna, utilizado por su elevada resistencia a compresión, durabilidad y accesibilidad económica. No obstante, su durabilidad puede verse severamente comprometida cuando se expone a ambientes agresivos, particularmente aquellos con alta concentración de iones cloruro, como zonas costeras, sitios industriales o regiones donde se emplean sales para el deshielo. Uno de los principales desafíos en este contexto es la corrosión de las armaduras de acero embebidas, un fenómeno que inicia cuando los cloruros penetran a través de la red porosa del concreto y alcanzan el refuerzo, despasivando la capa protectora de óxido e iniciando un proceso de oxidación que produce expansión, fisuración del concreto y pérdida progresiva de la capacidad estructural.

Este fenómeno de corrosión inducida por cloruros no solo compromete la integridad estructural de las obras, sino que representa un costo económico considerable asociado a reparaciones, mantenimiento o sustitución de elementos dañados. La raíz del problema radica, en muchos casos, en la permeabilidad del concreto, es decir, su capacidad para permitir el paso de agua y agentes agresivos hacia el interior de la matriz cementicia. Por ello, se ha buscado reducir la permeabilidad mediante ajustes en el diseño de mezcla y la incorporación de aditivos químicos, siendo los superplastificantes una de las soluciones más utilizadas. Estos aditivos permiten disminuir la relación agua/cemento sin afectar la trabajabilidad del concreto, lo que se traduce en una matriz menos porosa y, por ende, más resistente a la penetración de cloruros.

En el contexto actual de construcción sostenible, se busca minimizar el uso de aditivos sintéticos por su impacto ambiental. Los superplastificantes convencionales, aunque eficaces, a menudo derivan de compuestos petroquímicos y conllevan altos costos en

términos de huella ecológica y emisiones de carbono (Boutouam et al., 2024). Este panorama ha impulsado la investigación en aditivos naturales, biodegradables y de bajo impacto medioambiental.

La goma xantana se perfila como un candidato prometedor. Se trata de un polisacárido extracelular producido por la bacteria *Xanthomonas campestris*, ampliamente utilizado en la industria alimentaria y farmacéutica por sus propiedades reológicas únicas, como alta viscosidad a bajas concentraciones y estabilidad térmica (Boutouam et al., 2024). En construcciones, su capacidad para modificar la reología y mejorar la trabajabilidad del concreto la posiciona como alternativa sostenible.

Masoumi et al. (2023) llevaron a cabo un estudio en concreto autocompactable (SCC), utilizando redes neuronales para examinar 43 diseños de mezcla. Encontraron que la goma xantana fue el aditivo más influyente (43 %) en parámetros durabilidad, como la profundidad de penetración de cloruros, resistencia eléctrica específica y resistencia a compresión, por encima de micro sílice y nanomateriales (Masoumi, Farokhzad, & Ghasemi, 2023). Esto indica su gran potencial para mejorar la densidad del concreto y reducir la entrada de agentes agresivos.

Además del ambiente cementoso, la goma xantana ha demostrado eficacia en aplicaciones geotécnicas. Baldovino et al. (2025) estudiaron su uso en la estabilización de suelos mixtos con RAP (pavimento asfáltico reciclado). Reportaron mejoras en rigidez y microestructura, lo que sugiere estructura de biofilm mejorada, fortaleciendo la cohesión entre partículas y reduciendo vacíos (Baldovino et al., 2025).

Otro trabajo relevante es el de Al-Jabobi y Bilsel (2025), que analizaron mezclas de arena–bentonita con adición de goma xantana (hasta 3 %). Encontraron que una concentración del 2 % triplicó la resistencia a compresión no confinada (UCS) respecto a suelos no tratados (Al-Jabobi & Bilsel, 2025). Estos resultados, aunque en suelos, reflejan mecanismos útiles para el concreto: la formación de redes fibrosas que cementan partículas y disminuyen la porosidad —mecanismo clave también en la protección frente a cloruros.

La adopción de goma xantana como superplastificante natural en concreto para mitigar la corrosión inducida por cloruros constituye una línea de investigación aún poco explorada, especialmente en el contexto de producción local y recursos sostenibles como el jarabe de agave.

Se plantea evaluar concretos con incrementos de goma xantana producida en México, desde 0% hasta 0.7%, en términos de resistencia mecánica y comportamiento electroquímico frente a exposición de cloruros. La hipótesis es que una concentración intermedia (0.5%) logrará el mejor balance entre trabajabilidad, densificación del material y protección del acero, ofreciendo una alternativa ecológica y eficaz frente a los superplastificantes convencionales.



Fig. 1. Daño por desprendimiento del concreto reforzado debido a corrosión del acero por cloruros. Fuente: Concrete Preservation Technologies Ltd. (2017).

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. Corrosión en concreto armado

La corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto armado representa uno de los principales factores de degradación a largo plazo en la infraestructura civil. Este fenómeno electroquímico ocurre cuando agentes agresivos, especialmente iones cloruro, penetran el concreto y alcanzan las armaduras, interrumpiendo la capa pasiva de óxidos que normalmente las protege. La posterior reacción de oxidación provoca la expansión del acero, lo que induce fisuras y desprendimientos en el concreto circundante, comprometiendo la durabilidad y funcionalidad de la estructura (He, 2025; Akduman, 2025).

Diversas investigaciones han modelado el proceso de corrosión dividiéndolo en dos fases principales: la iniciación, relacionada con el tiempo que tarda el agente agresivo en alcanzar la armadura; y la propagación, vinculada a la velocidad con que el acero se corroe una vez iniciado el proceso (Zomorodian, 2023). Las técnicas electroquímicas como el potencial de media celda, la espectroscopía de impedancia (EIS) y la resistencia de polarización lineal (LPR) se han convertido en herramientas clave para evaluar el comportamiento de las armaduras frente a ambientes agresivos sin necesidad de dañar la estructura.

Además, se ha demostrado que la permeabilidad del concreto juega un papel crítico en el inicio del proceso corrosivo. Una microestructura más densa reduce significativamente la tasa de penetración de cloruros, prolongando la fase de iniciación. Por ello, existe un creciente interés por modificar la composición del concreto mediante el uso de aditivos o la optimización de su dosificación, con el fin de aumentar su durabilidad frente a ambientes marinos o urbanos contaminados.



Fig. 2. Daño por desprendimiento (spalling) del concreto reforzado debido a corrosión del acero por cloruros. Fuente: Concrete Preservation Technologies Ltd. (2017).

1.2.2. Uso de superplastificantes en concreto

Los superplastificantes han sido ampliamente utilizados en la industria del concreto para mejorar la trabajabilidad sin incrementar la relación agua/cemento, lo cual resulta fundamental para mantener o mejorar la resistencia mecánica y la durabilidad. Su efecto plastificante permite obtener mezclas más homogéneas, con menor porosidad y mejor consolidación, contribuyendo así a la reducción de la permeabilidad del concreto (Dvorkin, 2023; Judžentienė, 2024).

Entre los tipos más comunes se encuentran los basados en lignosulfonatos, melamina, naftaleno y policarboxilatos. Este último ha sido el más empleado en la última década debido a su alto poder dispersante y compatibilidad con diferentes tipos de cemento. Investigaciones recientes han mostrado que el uso de superplastificantes basados en policarboxilato permite una reducción significativa en el contenido de agua, así como

mejoras sustanciales en la resistencia a la compresión y el módulo elástico del concreto (Muthu et al., 2024).

Sin embargo, pese a sus ventajas técnicas, existe una creciente preocupación por el impacto ambiental asociado a la producción y disposición de los superplastificantes sintéticos. Muchos de estos compuestos provienen de derivados del petróleo, generando emisiones durante su síntesis y potenciales riesgos ecotoxicológicos en caso de lixiviación.

1.2.3. Alternativas sostenibles: uso de gomas naturales

Dado el contexto ambiental actual, se han explorado diferentes alternativas sostenibles a los aditivos químicos convencionales. Una de las líneas más prometedoras es el uso de biopolímeros y gomas naturales como aditivos modificadores de la reología en mezclas de concreto. Estos materiales de origen vegetal o microbiano presentan características interesantes como biodegradabilidad, baja toxicidad y disponibilidad regional (Boutouam et al., 2024).

Las gomas naturales como la goma guar, goma arábica y goma xantana han demostrado una buena compatibilidad con matrices cementicias, especialmente por su capacidad de retención de agua y modificación de la viscosidad. En aplicaciones en ingeniería civil, la goma xantana ha sido empleada para mejorar la cohesión de suelos, modificar la trabajabilidad del concreto y, recientemente, como posible inhibidor de corrosión (Guo et al., 2022; Palumbo et al., 2023).

Estudios electroquímicos han mostrado que algunos biopolímeros pueden actuar como barreras físicas o como agentes adsorbentes que retrasan la migración de cloruros hacia las armaduras. Por ejemplo, la adición de goma guar en mezclas de concreto redujo notablemente la velocidad de corrosión en barras de acero, efecto atribuido a la formación de una capa protectora sobre la superficie metálica (Palumbo et al., 2023).

En el caso específico de la goma xantana, además de sus propiedades reológicas, se ha demostrado que puede formar estructuras tipo gel que bloquean la porosidad capilar del

concreto, disminuyendo la tasa de ingreso de iones agresivos (Yang, 2024). Asimismo, en su aplicación en suelos estabilizados, la goma xantana mejoró la resistencia y redujo la permeabilidad, lo que sugiere un potencial similar al ser incorporada en matrices cementicias (Baldovino et al., 2025).

El desarrollo de goma xantana a partir de residuos agrícolas o azucareros, como el jarabe de agave, ofrece además un valor agregado desde la perspectiva de economía circular, ya que permite aprovechar subproductos agroindustriales para generar aditivos funcionales de bajo impacto ambiental.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El deterioro prematuro de estructuras de concreto reforzado debido a la corrosión del acero constituye una de las principales problemáticas de durabilidad en la infraestructura civil, particularmente en ambientes expuestos a cloruros como zonas costeras o donde se emplean sales descongelantes. Ante este desafío, se han investigado soluciones que reduzcan la permeabilidad del concreto y mejoren su resistencia a la penetración de agentes agresivos, con el fin de alargar la vida útil de las estructuras (Akduman, 2025; Zomorodian, 2023).

En este contexto, el uso de aditivos superplastificantes ha sido una estrategia efectiva para mejorar la trabajabilidad del concreto sin aumentar su relación agua/cemento, lo que reduce la porosidad capilar y, por ende, la migración de iones cloruro hacia las armaduras de acero (Dvorkin, 2023). Sin embargo, la mayoría de los superplastificantes comerciales son de origen sintético, con procesos de manufactura que implican altos costos, huellas ambientales importantes y una dependencia de recursos fósiles. Esto ha incentivado el desarrollo de alternativas más sostenibles, particularmente aquellas basadas en materiales de origen natural y renovable.

La goma xantana, un polisacárido extracelular producido por la fermentación bacteriana de carbohidratos, ha emergido como un aditivo viable en mezclas cementicias debido a su capacidad para modificar la viscosidad, mejorar la cohesión de la mezcla y controlar

la segregación y el sangrado (Boutouam et al., 2024; Judžentienė, 2024). Estas propiedades favorecen una microestructura del concreto más densa, reduciendo la permeabilidad y facilitando una mayor protección del acero frente a procesos de corrosión inducidos por cloruros.

Particularmente en México, existe un potencial significativo para la producción local de goma xantana a partir del jarabe de agave, un subproducto agrícola rico en azúcares fermentables. Su aprovechamiento no solo representa una estrategia para valorizar recursos agroindustriales regionales, sino que también puede generar impactos positivos en la economía local, reducir la dependencia de productos importados y disminuir la huella ambiental de los insumos utilizados en la construcción (Baldovino et al., 2025; Yang, 2024).

Además, algunos estudios recientes han demostrado que la adición de pequeñas proporciones de gomas naturales como guar, xantana o alginatos puede incrementar la resistencia a la compresión y reducir significativamente la permeabilidad del concreto, sin comprometer su desempeño mecánico a largo plazo (Palumbo et al., 2023; Muthu et al., 2024). Esta doble función—como modificador reológico y como barrera frente a la penetración de agentes agresivos—refuerza el interés por evaluar su impacto en la durabilidad del concreto en condiciones de exposición severa.

Por lo tanto, el presente estudio propone la formulación y evaluación de un superplastificante natural a base de goma xantana sintetizada a partir de jarabe de agave, con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas y electroquímicas de concretos expuestos a ambientes con presencia de cloruros. Se plantea una caracterización comparativa mediante ensayos de resistencia a la compresión, impedancia electroquímica y potenciales de media celda, a fin de analizar su efecto en la protección contra la corrosión del acero de refuerzo.

La implementación de este tipo de aditivos naturales en el diseño de mezclas de concreto con resistencia característica de 200 kg/cm² se alinea con los objetivos de sostenibilidad ambiental, innovación tecnológica y aprovechamiento de recursos locales en la industria de la construcción.

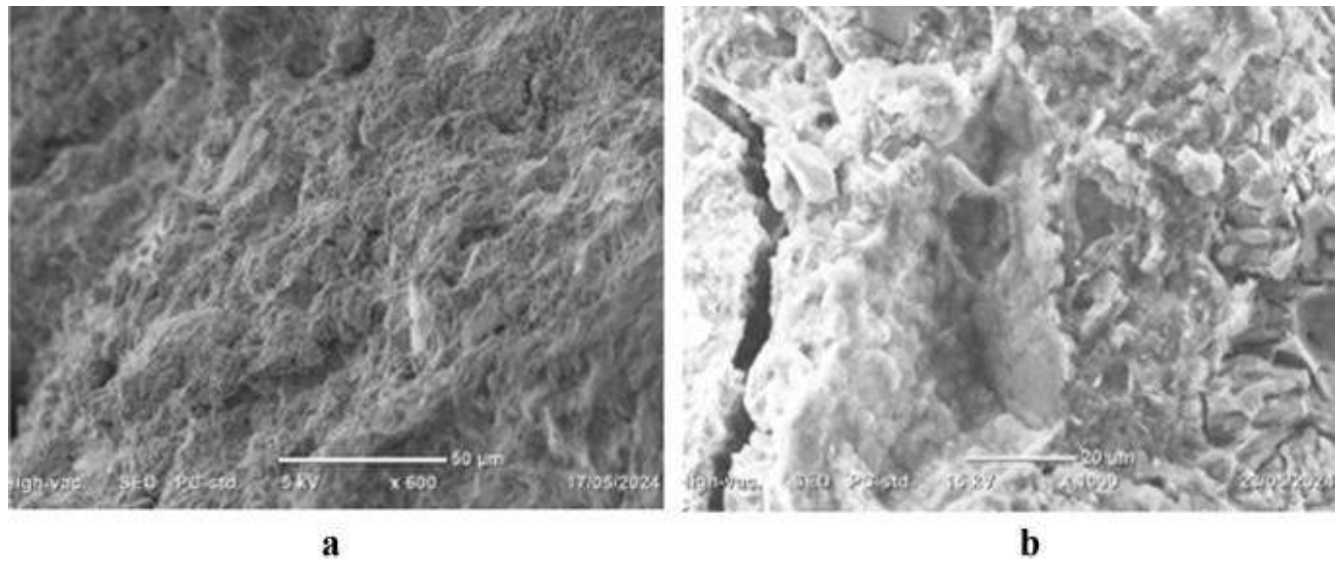


Fig. 3. Goma xantana como aditivo en mezclas de concreto para mejorar la densidad de la matriz, reducir porosidad y retardar la penetración de iones agresivos.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño del concreto adicionado con goma xantana en polvo, obtenida a partir de jarabe de agave mediante fermentación bacteriana, como superplastificante natural, con base en su comportamiento mecánico y su resistencia frente a la corrosión en ambientes con exposición a cloruros.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Producir goma xantana en polvo a partir de jarabe de agave, utilizando el proceso de fermentación bacteriana con *Xanthomonas campestris*.
- Diseñar mezclas de concreto con resistencia característica de 200 kg/cm², incorporando goma xantana en proporciones del 0%, 0.3%, 0.5% y 0.7% respecto al peso del cemento, con el objetivo de analizar su efecto en las propiedades del concreto.
- Evaluar las propiedades mecánicas del concreto diseñado mediante pruebas de compresión y tracción indirecta.
- Determinar la resistencia a la corrosión del acero embebido en el concreto mediante la medición de potenciales de media celda, conforme a ASTM C876, para evaluar el grado de protección ofrecido por el aditivo natural.
- Comparar los resultados obtenidos con el uso de goma xantana con los de concretos convencionales para establecer las ventajas del superplastificante natural en términos de resistencia a la corrosión.

1.6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de los superplastificantes comerciales disponibles en el mercado son de origen sintético, derivados de procesos petroquímicos que no solo elevan el costo del producto, sino que también generan impactos ambientales significativos en su producción, transporte y disposición final. Esta problemática ha impulsado una creciente búsqueda de alternativas sostenibles, biodegradables y de bajo impacto ambiental. En este contexto, la goma xantana se ha postulado como una opción prometedora. Se trata de un polisacárido extracelular producido mediante fermentación bacteriana, que ha demostrado capacidad para mejorar la viscosidad y estabilidad de mezclas líquidas, siendo ampliamente utilizado en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética.

Recientemente, algunos estudios han comenzado a explorar su potencial aplicación en la industria de la construcción, particularmente como superplastificante natural en concretos. La goma xantana puede reducir la cantidad de agua requerida, incrementar la cohesión de la mezcla y disminuir la segregación de materiales, lo que puede traducirse en concretos más densos y con menor permeabilidad (Chavarria et al., 2018). Además, al ser biodegradable y no tóxica, representa una alternativa más amigable con el medio ambiente frente a los aditivos sintéticos (Kumar & Kumar, 2019).

En el contexto mexicano, esta alternativa adquiere mayor relevancia debido a la disponibilidad local de recursos como el jarabe de agave, rico en azúcares que pueden servir como sustrato para la fermentación y producción de goma xantana. Esta sinergia entre disponibilidad agrícola y necesidad industrial plantea una oportunidad única para el desarrollo de materiales sustentables con valor agregado, aprovechando la cadena de producción existente en el país y reduciendo la dependencia de insumos importados.

A pesar del potencial técnico y ambiental de esta propuesta, persiste un vacío en la literatura científica respecto al comportamiento del concreto adicionado con goma xantana frente a procesos de corrosión, especialmente en condiciones de exposición a ambientes con cloruros. La mayoría de las investigaciones se han enfocado en evaluar su efecto en la trabajabilidad y propiedades mecánicas, sin considerar suficientemente su desempeño en términos de durabilidad y protección del acero de refuerzo. Asimismo,

no se ha explorado de manera sistemática la producción local del aditivo, ni su viabilidad técnica como superplastificante derivado de recursos mexicanos.

Frente a este panorama, surge la necesidad de desarrollar investigaciones que permitan no solo evaluar el desempeño mecánico del concreto con goma xantana, sino también analizar su capacidad de mitigación frente a la corrosión inducida por cloruros, mediante técnicas electroquímicas como la medición de potenciales de media celda y espectroscopía de impedancia. Este enfoque integral podría abrir nuevas posibilidades para la formulación de concretos más sostenibles y duraderos, adaptados a las condiciones climáticas y recursos disponibles en México.

1.7. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cómo influye la incorporación de goma xantana sintetizada a partir de jarabe de agave como superplastificante natural en la resistencia a la corrosión del concreto armado expuesto a ambientes con cloruros?

1.8. SUBPREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Qué efecto tiene la adición de diferentes proporciones de goma xantana (0%, 0.3%, 0.5% y 0.7%) en la trabajabilidad, compacidad y resistencia mecánica del concreto?
- ¿Cuál es el comportamiento del concreto con goma xantana frente a la corrosión del acero de refuerzo, evaluado mediante la técnica de potenciales de media celda bajo condiciones de aspersion de cloruros?

1.9. HIPÓTESIS

La incorporación de goma xantana, producida a partir de jarabe de agave, como superplastificante natural en la mezcla de concreto, mejorará la trabajabilidad y resistencia mecánica del concreto, y disminuirá la penetración de cloruros, resultando en una mayor resistencia a la corrosión del acero de refuerzo en comparación con los concretos convencionales.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. EL CONCRETO COMO MATERIAL COMPUESTO

El concreto es un material compuesto ampliamente utilizado en la ingeniería civil por su capacidad para resistir altas cargas de compresión, su disponibilidad global y su bajo costo. Se le considera un material compuesto porque resulta de la combinación de diferentes materiales con propiedades distintas que, al integrarse, generan un producto con características superiores a las de sus componentes individuales (Neville, 2011).

Desde el punto de vista ingenieril, el concreto es una mezcla heterogénea de materiales pétreos (agregados finos y gruesos), agua, cemento y, opcionalmente, aditivos químicos y adiciones minerales. Esta combinación permite que el material sea moldeable en estado fresco y adquiera resistencia y durabilidad con el paso del tiempo, una vez que el cemento ha reaccionado con el agua (hidratación). Al integrarse con acero de refuerzo, el concreto forma un sistema compuesto aún más eficiente: el concreto armado, cuya resistencia a compresión y tracción se complementa para resistir las cargas estructurales.



Fig. 4. Concreto armado. Fuente: Neville, A. M. (2011). Properties of concrete (5th ed.). Longman.

2.1.1. Composición y propiedades fundamentales del concreto

El concreto está formado principalmente por los siguientes componentes:

- Cemento portland: es el aglutinante que, al hidratarse con el agua, forma compuestos cementantes como el silicato cálcico hidratado (C-S-H), responsable de la resistencia mecánica del concreto.
- Agua: participa en las reacciones químicas con el cemento y proporciona trabajabilidad a la mezcla. El contenido de agua debe ser controlado cuidadosamente mediante la relación agua/cemento (a/c), ya que una mayor cantidad de agua reduce la resistencia y durabilidad.
- Agregados: son materiales inertes, como arena (fino) y grava o piedra triturada (grueso). Representan entre el 60% y 75% del volumen del concreto y tienen un impacto significativo en su comportamiento mecánico y durabilidad.
- Aditivos químicos: se incorporan en pequeñas cantidades para modificar propiedades específicas del concreto, como el tiempo de fraguado, la trabajabilidad o la resistencia a agentes agresivos.

Las propiedades fundamentales del concreto que determinan su desempeño en obra son:

- Resistencia a compresión: es la propiedad mecánica más importante y se mide generalmente a los 28 días de curado.
- Durabilidad: es la capacidad del concreto para resistir el paso del tiempo y las acciones ambientales sin deteriorarse significativamente.
- Trabajabilidad: es la facilidad con la que la mezcla fresca puede ser colocada y compactada sin segregación.
- Permeabilidad: está relacionada con la porosidad de la matriz cementante; una baja permeabilidad mejora la durabilidad, especialmente frente a agentes agresivos como los cloruros.

Además, factores como la temperatura de curado, el tipo de cemento, la granulometría de los agregados y la inclusión de aditivos influyen directamente en el comportamiento final del concreto (Mindess et al., 2017).

2.1.2. Función del acero de refuerzo

El concreto, aunque posee una alta resistencia a compresión, es frágil frente a esfuerzos de tracción. Para resolver esta limitación, se incorpora acero de refuerzo, generalmente en forma de varillas corrugadas. Este material aporta la resistencia a tracción que el concreto por sí solo no puede proporcionar (Ghosh & Padgett, 2014).

El acero se adhiere a la matriz cementante gracias al contacto físico y a la adherencia química. Este sistema compuesto, conocido como concreto armado, permite el diseño de estructuras que resisten cargas complejas, como vigas, columnas y losas. Para que el acero conserve su integridad, el concreto debe proporcionar una protección adecuada frente a agentes agresivos, principalmente mediante el recubrimiento mínimo, una baja porosidad y una buena calidad del concreto.

Además, el concreto alcalino ($\text{pH} > 12$) forma una película pasivadora alrededor del acero, impidiendo su oxidación. Sin embargo, esta protección se ve afectada cuando iones cloruro o dióxido de carbono penetran la matriz y disminuyen el pH del entorno del acero, iniciando el proceso de corrosión (Neville, 2011).



Fig. 5. Corrosión en concreto armado, Fuente: Kenny, A. (2008).

2.1.3. Problemas comunes en estructuras de concreto armado

El concreto armado, a pesar de su eficiencia estructural, puede verse afectado por diversos procesos de deterioro, entre los que destacan:

- **Corrosión del acero de refuerzo:** Es uno de los mecanismos de daño más comunes y severos. Ocurre principalmente cuando iones cloruro, presentes en ambientes marinos o en sales de deshielo, alcanzan el acero y destruyen la capa pasiva que lo protege. Esto provoca oxidación, aumento de volumen, agrietamiento y desprendimiento del recubrimiento de concreto.
- **Fisuración:** Las fisuras pueden generarse por diversas causas como retracción plástica, retracción por secado, esfuerzos térmicos, asentamiento diferencial, sobrecargas o corrosión del refuerzo. Estas fisuras comprometen la durabilidad y permiten el ingreso de agua y contaminantes.
- **Carbonatación:** Se refiere a la reacción del dióxido de carbono (CO_2) del ambiente con el hidróxido de calcio del concreto. Esta reacción reduce el pH de la pasta de cemento, debilitando la capa pasiva del acero y facilitando la corrosión.
- **Ataque químico:** El concreto también puede sufrir daño por sulfatos, ácidos, o aguas con baja alcalinidad, que degradan sus componentes y generan expansión o pérdida de resistencia.
- **Permeabilidad excesiva:** Una alta porosidad o fisuración facilita la entrada de agentes agresivos al concreto, acelerando los mecanismos de deterioro antes descritos. Por esta razón, uno de los objetivos clave del diseño moderno del concreto es minimizar su permeabilidad (Zhao et al., 2021).

Estos problemas han motivado la búsqueda de soluciones que mejoren la durabilidad del concreto armado, incluyendo el uso de superplastificantes, adiciones minerales, recubrimientos protectores, curados optimizados y, más recientemente, el uso de aditivos naturales biodegradables como la goma xantana.

2.2. DETERIORO DEL CONCRETO EN AMBIENTES AGRESIVOS

En ambientes urbanos con distintos grados de agresividad, el deterioro del concreto está fuertemente condicionado por la combinación entre la composición de la atmósfera (contaminantes gaseosos y partículas) y las condiciones climáticas locales (humedad, lluvia, temperatura). Zonas costeras, industriales o con alto tránsito vehicular presentan, cada una, un perfil específico de agresores que acelera la degradación de la matriz cementicia y favorece el ingreso y acción de agentes químicos. (Correa et al., 2008)

Uno de los mecanismos más relevantes en ambientes agresivos es el ingreso y acumulación de cloruros, especialmente en áreas cercanas al mar o donde se aplican sales. Los cloruros penetran por difusión y capilaridad hasta el entorno de la armadura y, al superar un umbral crítico, destruyen la capa pasiva del acero, iniciando procesos electroquímicos de corrosión. La corrosión genera productos expansivos que fisuran y desplazan el recubrimiento, disminuyen la adherencia y comprometen la capacidad portante de los elementos estructurales. (Correa et al., 2008)

La carbonatación y el ataque por gases ácidos también son mecanismos importantes en ambientes urbanos. El dióxido de carbono atmosférico reduce el pH de la pasta de cemento al reaccionar con los hidróxidos del cemento, favoreciendo la desprotección del acero. En áreas con emisiones industriales y tráfico, compuestos como dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno contribuyen a la formación de lluvia ácida o a ambientes húmedos con especies acídicas que atacan y disuelven componentes de la pasta cementicia, incrementando la porosidad y la permeabilidad del material. (Correa et al., 2008)

Además, la deposición de partículas (polvo, hollín, cenizas) y sales solubles en conjunto con ciclos húmedo-seco generan condiciones para la cristalización de sales en los poros y la formación de eflorescencias y desprendimientos superficiales. Los ciclos repetidos de humedad y secado concentran sales en zonas superficiales y provocan tensiones internas por cristalización, lo que favorece el desconchado y la pérdida de capa protectora. En climas con variaciones térmicas, las tensiones térmicas y la fatiga por ciclos contribuyen también a la aparición y propagación de fisuras. (Correa et al., 2008)

Estos mecanismos suelen actuar de forma sinérgica: la subida de la porosidad por ataque químico facilita una mayor penetración de cloruros y otros agentes; las fisuras por esfuerzos térmicos o por cristalización de sales aceleran el acceso de oxígeno y humedad al acero; y la contaminación particulada modifica microambientes superficiales que favorecen reacciones locales agresivas. El resultado conjunto es una pérdida de durabilidad (mayor permeabilidad, menor resistencia residual, fisuración, desprendimiento) y un acortamiento de la vida útil diseñada de las estructuras si no se consideran medidas preventivas o de diseño específicas. (Correa et al., 2008)

En síntesis, Correa et al., (2008) muestran que el deterioro del concreto en ambientes urbanos agresivos depende tanto de la naturaleza de los contaminantes atmosféricos como de las condiciones climáticas y del comportamiento físico-químico conjunto del sistema concreto–armadura; por ello, la evaluación de la agresividad ambiental y la identificación de los mecanismos dominantes son imprescindibles para estimar la velocidad de deterioro y planear estrategias de protección y mantenimiento. (Correa et al., 2008)



Fig. 6. Deterioro del concreto en ambientes agresivos. Fuente: Baricevic, A. et al. (2015).

2.2.1. Tipos de agentes agresivos (físicos, químicos, biológicos)

El concreto, pese a su durabilidad, está expuesto a diferentes factores que pueden debilitar su estructura con el paso del tiempo. Los agentes físicos se relacionan principalmente con cambios de temperatura, ciclos de humedad y sequía, congelamiento y descongelamiento, o abrasión mecánica, los cuales provocan fisuras y pérdida de material. Los agentes químicos incluyen la acción de sulfatos, cloruros, dióxido de carbono, ácidos u otras sustancias presentes en el ambiente o en el agua, que generan reacciones con los componentes de la pasta de cemento, alterando su resistencia y estructura interna. Finalmente, los agentes biológicos, como bacterias, algas o raíces de plantas, influyen indirectamente al producir compuestos químicos corrosivos o al generar presión mecánica, contribuyendo también al deterioro progresivo del concreto (Barbudo & Borges, 2001).

2.2.2. Mecanismos de degradación del concreto

El concreto armado, aunque es considerado uno de los materiales de construcción más resistentes y duraderos, no es inmune a la acción de distintos procesos que a lo largo del tiempo provocan su deterioro. Según Posada Bustamante (1994), los mecanismos de degradación pueden clasificarse en físicos y químicos, y muchas veces actúan de manera conjunta.

En primer lugar, los mecanismos físicos están relacionados con fenómenos naturales y ambientales, como las variaciones térmicas que producen dilataciones y contracciones en la estructura, así como los ciclos de humedad-sequedad y congelamiento-descongelamiento. Estos procesos originan fisuras, desprendimiento de capas superficiales y pérdida de compacidad, lo cual facilita la penetración de agentes externos. También intervienen procesos de abrasión mecánica por el tránsito o la fricción, que desgastan progresivamente la superficie del material.

Por otro lado, los mecanismos químicos resultan de la interacción entre el concreto y sustancias agresivas presentes en el entorno. Entre ellos destacan la acción de los

cloruros, que aceleran la corrosión del acero de refuerzo; los sulfatos, que reaccionan con los compuestos hidratados del cemento generando expansiones y fisuración; y la carbonatación, producto del dióxido de carbono del aire, que reduce el pH de la matriz del concreto, perdiendo su capacidad de protección frente al acero. Asimismo, la presencia de ácidos y sales en suelos o aguas también contribuye al debilitamiento químico de la pasta cementicia.

Finalmente, Posada Bustamante (1994) subraya que la degradación del concreto armado no suele deberse a un único mecanismo, sino al efecto combinado de varios factores. La interacción de procesos físicos y químicos acelera la pérdida de resistencia mecánica y durabilidad, generando un mayor riesgo de corrosión en las armaduras, fisuración progresiva y, en consecuencia, la disminución de la vida útil de las estructuras.

2.2.3. Daño estructural por ingreso de cloruros

El ingreso de cloruros constituye uno de los principales factores de deterioro en las estructuras de concreto armado, ya que compromete tanto la durabilidad del material como la integridad de la armadura. De acuerdo con Bastidas Arteaga (2006), los cloruros pueden penetrar en el concreto principalmente a través de la difusión desde ambientes marinos o por contacto con sales empleadas en el deshielo de superficies. Una vez dentro, se acumulan progresivamente en la matriz porosa del material hasta alcanzar la superficie del acero de refuerzo.

Cuando la concentración crítica de cloruros en torno al acero se supera, se rompe la capa pasiva que normalmente lo protege. En consecuencia, se inicia un proceso de corrosión electroquímica, en el cual el acero se oxida y se forman productos expansivos de corrosión. Estos productos ejercen presiones internas sobre el concreto, provocando fisuración, desprendimiento del recubrimiento y pérdida de adherencia entre el acero y la matriz cementicia (Bastidas Arteaga, 2006).

Este fenómeno no solo reduce la capacidad de carga de la estructura, sino que también acelera el proceso de degradación, ya que las fisuras abiertas permiten un ingreso más

rápido de nuevos cloruros y oxígeno, generando un círculo de deterioro progresivo. Bastidas Arteaga (2006) subraya que el efecto acumulado de este proceso conlleva a una disminución significativa en la vida útil de las estructuras, afectando su confiabilidad y seguridad a largo plazo.

En síntesis, el ingreso de cloruros en el concreto es un mecanismo crítico de daño estructural, ya que actúa como detonante de la corrosión del acero y desencadena procesos que afectan tanto a la durabilidad como a la resistencia mecánica de la estructura (Bastidas Arteaga, 2006).



Fig. 7. Daño estructural por ingreso de cloruros. Fuente: Baricevic, A., et al. (2015).

2.3. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN CONCRETO

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto es uno de los principales factores de deterioro estructural, pues compromete la durabilidad y resistencia de las construcciones. Este proceso se desencadena cuando la capa pasiva que protege al acero se destruye, ya sea por la **carbonatación** que reduce el pH del concreto o por el **ingreso de cloruros** desde ambientes marinos o sales de deshielo. Una vez rota la pasivación, el acero se oxida, generando productos expansivos que provocan fisuración, desprendimiento del recubrimiento y pérdida de adherencia. (Torres Acosta et al., 2009)

La velocidad de corrosión depende tanto de factores ambientales (humedad, temperatura, concentración de cloruros y oxígeno) como de propiedades del concreto (relación agua/cemento, permeabilidad, profundidad del recubrimiento y presencia de fisuras). Estos elementos condicionan la rapidez con que se alcanza la concentración crítica de cloruros en la interfase acero–concreto, punto en el que inicia el deterioro. (Torres Acosta et al., 2009)

Las consecuencias incluyen pérdida de sección del acero, reducción de la capacidad estructural y aceleración del daño por la entrada adicional de agentes agresivos a través de las fisuras. Frente a este problema, Torres Acosta et al. (2009) destacan que además de medidas preventivas en el diseño, puede explorarse el uso de **inhibidores de corrosión** —como adiciones a base de cactus— que actúan formando películas protectoras o modificando el entorno químico, reduciendo así la progresión del fenómeno. (Torres Acosta et al., 2009)

2.3.1. Principios de corrosión

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto armado se produce principalmente por la interacción del metal con su entorno, especialmente cuando se rompe la pasivación natural que ofrece la matriz de cemento. En condiciones normales, el acero permanece protegido debido a un alto pH en el concreto, que genera una capa pasiva de óxido

estable sobre la superficie del metal. Sin embargo, esta protección puede perderse si el concreto se carbonata o si cloruros penetran hasta el acero, reduciendo la alcalinidad local y permitiendo que se inicie la corrosión (Duffó & Farina, 2016).

El proceso corrosivo comienza con la formación de sitios anódicos y catódicos sobre la superficie del refuerzo, donde el acero se oxida liberando iones Fe^{2+} , mientras que en las zonas catódicas se produce la reducción de oxígeno. La presencia de agua y oxígeno es crítica para que esta reacción electroquímica avance, ya que facilita la disolución del hierro y la formación de productos de corrosión como óxidos e hidróxidos de hierro, que incrementan el volumen y generan tensiones internas que pueden provocar fisuración y desprendimiento del recubrimiento de concreto (Duffó & Farina, 2016).

En resumen, la iniciación y propagación de la corrosión del acero en el concreto dependen de factores químicos (pH, cloruros, carbonatación), físicos (porosidad, humedad) y electroquímicos (formación de ánodos y cátodos), lo que hace que la comprensión de estos principios sea fundamental para diseñar estrategias de monitoreo y prevención efectivas (Duffó & Farina, 2016).

2.3.2. Influencia de los cloruros en la despasivación

La presencia de cloruros en el concreto representa uno de los factores más críticos en la despasivación localizada del acero de refuerzo. Normalmente, el acero se encuentra protegido por una capa pasiva debido al alto pH del concreto, que forma un óxido estable sobre la superficie del metal. Sin embargo, cuando los cloruros penetran el recubrimiento de concreto y alcanzan la superficie del acero, esta capa protectora se rompe, permitiendo que se inicie la corrosión (Villagrán Zaccardi, 2012).

El mecanismo se produce de manera localizada: los cloruros tienden a concentrarse en zonas específicas de la armadura, generando sitios anódicos donde el hierro se oxida, mientras que las áreas circundantes actúan como cátodos, favoreciendo la formación de células electroquímicas. La corrosión localizada resultante es particularmente peligrosa,

ya que puede progresar rápidamente incluso sin signos visibles de deterioro en la superficie del concreto (Villagrán Zaccardi, 2012).

La velocidad y la extensión de la despasivación dependen de varios factores, incluyendo la concentración de cloruros, la porosidad del concreto, su grado de saturación de humedad y las condiciones ambientales. Por ejemplo, estructuras expuestas a ambientes marinos o a sales de deshielo presentan una mayor probabilidad de ingreso de cloruros y, por ende, de despasivación precoz del acero. Por esta razón, estimar el ingreso de cloruros y comprender su distribución en el concreto es fundamental para prever la vida útil de la estructura y diseñar estrategias de mitigación eficaces (Villagrán Zaccardi, 2012).

En resumen, la influencia de los cloruros en el concreto armado no solo determina la iniciación de la corrosión, sino que también condiciona su desarrollo y propagación. Un adecuado conocimiento de este fenómeno permite establecer criterios para el diseño del recubrimiento, la selección de aditivos inhibidores y la implementación de técnicas de monitoreo que prolonguen la durabilidad de las estructuras expuestas a ambientes agresivos (Villagrán Zaccardi, 2012).

2.3.3. Efectos de la corrosión en el desempeño estructural

La corrosión del acero de refuerzo tiene un impacto significativo en el desempeño estructural de las construcciones de concreto armado. Cuando el acero comienza a corroerse, se producen óxidos de hierro que ocupan un volumen mayor que el metal original, lo que genera tensiones internas en el concreto circundante. Estas tensiones pueden causar fisuración, desprendimiento del recubrimiento y, en casos avanzados, fragmentación de la sección de concreto, comprometiendo la integridad estructural de la obra (Alas Rojas, 2019).

Además, la pérdida de sección transversal del acero debido a la corrosión reduce directamente la capacidad portante de los elementos estructurales, disminuyendo su resistencia a cargas de compresión, flexión y cortante. Esto puede conducir a un aumento

de las deformaciones y desplazamientos en la estructura, afectando tanto su seguridad como su funcionalidad. Las grietas y fisuras también facilitan la entrada de agentes agresivos, acelerando el proceso corrosivo y creando un ciclo de deterioro progresivo (Alas Rojas, 2019).

La corrosión localizada, en particular, es especialmente peligrosa, ya que puede afectar zonas críticas de los refuerzos, como los puntos de máxima flexión o los anclajes, donde la pérdida de capacidad es más crítica para el desempeño estructural. Por ello, la evaluación del estado de los refuerzos y el monitoreo de la corrosión se vuelven herramientas esenciales para garantizar la durabilidad y seguridad de la estructura (Alas Rojas, 2019).

la corrosión del acero no solo afecta la apariencia superficial del concreto, sino que compromete su resistencia mecánica, su rigidez y su estabilidad a largo plazo. La comprensión de estos efectos permite planificar medidas de prevención y mantenimiento, diseñar estrategias de reparación y prolongar la vida útil de las estructuras de concreto armado expuestas a ambientes agresivos (Alas Rojas, 2019).

2.3.4. Factores que influyen en la velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión de los materiales metálicos, especialmente del acero en estructuras de concreto, está determinada por una combinación de factores químicos, físicos y ambientales. Entre los factores químicos, la composición del material y la presencia de iones agresivos, como cloruros o sulfatos, juega un papel crucial, ya que estos compuestos pueden romper las capas protectoras del metal y acelerar su oxidación (Salazar-Jiménez, 2015).

En cuanto a los factores físicos, la porosidad, la microestructura y la densidad del material influyen directamente en la penetración de agentes corrosivos y en la facilidad con que se desarrollan reacciones electroquímicas en la superficie del metal. Materiales más

porosos permiten una mayor difusión de oxígeno, agua y iones, aumentando así la velocidad de corrosión (Salazar-Jiménez, 2015).

El ambiente también es determinante: la temperatura, la humedad relativa, la concentración de oxígeno y la exposición a ambientes marinos o industriales con altos niveles de contaminantes aceleran las reacciones corrosivas. Por ejemplo, un aumento de la temperatura generalmente incrementa la movilidad de los iones y la actividad química, promoviendo una corrosión más rápida. Asimismo, la presencia de humedad facilita la formación de soluciones electrolíticas sobre la superficie metálica, lo que es esencial para la continuidad del proceso electroquímico (Salazar-Jiménez, 2015).

Otros factores relevantes incluyen el estado de tensión del material y la existencia de defectos superficiales, que pueden concentrar corrientes de corrosión y generar daños localizados. La interacción de todos estos factores determina no solo la iniciación, sino también la velocidad y la extensión del fenómeno corrosivo, siendo fundamental para el diseño de estrategias de protección, mantenimiento y durabilidad de las estructuras metálicas (Salazar-Jiménez, 2015).

2.4. MÉTODOS PARA MITIGAR LA CORROSIÓN EN CONCRETO ARMADO

Para reducir la corrosión del acero en estructuras de concreto armado, una de las estrategias más efectivas consiste en la incorporación de materiales cementantes suplementarios (MCS) en la mezcla de concreto. Estos aditivos, como cenizas volantes, escorias de alto horno y sílices activadas, mejoran la densidad y la impermeabilidad del concreto, limitando la penetración de agentes agresivos como cloruros y dióxido de carbono, principales causantes de la despasivación del acero (Landa Gómez et al., 2022).

Otra medida preventiva es el aumento del recubrimiento de concreto sobre las armaduras, lo que proporciona una barrera física adicional que retrasa la llegada de sustancias corrosivas al acero. Además, el uso de aditivos inhibidores de corrosión químicos puede formar una capa protectora sobre la superficie del acero, reduciendo la velocidad de oxidación incluso cuando el concreto ha sido comprometido por agentes externos.

El control del agua y la relación agua/cemento durante la elaboración de la mezcla también es fundamental, ya que un concreto más compacto y con menor porosidad disminuye significativamente la velocidad de penetración de iones agresivos. Asimismo, técnicas de curado adecuado y mantenimiento periódico ayudan a preservar la integridad del recubrimiento y a prolongar la vida útil de la estructura (Landa Gómez et al., 2022).

En conjunto, la combinación de MCS, recubrimientos adecuados, aditivos inhibidores y buenas prácticas de diseño y construcción constituye un enfoque integral para mitigar la corrosión del acero en concreto armado, asegurando tanto la durabilidad como el desempeño estructural de las obras expuestas a ambientes agresivos (Landa Gómez et al., 2022).

2.4.1. Recubrimientos y barreras físicas

El uso de recubrimientos superficiales constituye una de las estrategias más efectivas para proteger el concreto armado frente a la acción de cloruros, especialmente en estructuras expuestas a ambientes marinos. Estos recubrimientos funcionan como barreras físicas que limitan la penetración de iones agresivos y la entrada de agua, factores determinantes en la despasivación del acero de refuerzo (Gómez Echevarría & Medina Novoa, 2023).

Entre los tipos de recubrimientos utilizados se incluyen selladores, membranas impermeabilizantes y tratamientos hidrofóbicos, los cuales pueden aplicarse directamente sobre la superficie del concreto para mejorar su densidad y reducir la conectividad de los poros. De esta manera, se retrasa significativamente la llegada de cloruros a la armadura, prolongando la vida útil de la estructura y reduciendo la necesidad de intervenciones de reparación.

La eficacia de estos recubrimientos depende de su correcta aplicación y del mantenimiento periódico, ya que defectos como fisuras o despegues pueden comprometer la barrera protectora y permitir la entrada localizada de agentes agresivos. Además, la combinación de recubrimientos con un adecuado recubrimiento de concreto sobre el acero refuerzo aumenta la protección, creando un doble sistema de defensa que mejora la durabilidad frente a ambientes marinos altamente agresivos (Gómez Echevarría & Medina Novoa, 2023).

En síntesis, la implementación de recubrimientos y barreras físicas sobre el concreto armado representa una medida preventiva clave frente a la corrosión inducida por cloruros, contribuyendo no solo a preservar la integridad estructural, sino también a optimizar la vida útil de las obras civiles en zonas costeras (Gómez Echevarría & Medina Novoa, 2023).

2.4.2. Uso de aditivos y materiales cementantes suplementarios

El empleo de aditivos y materiales cementantes suplementarios (MCS) en los concretos de ultra altas prestaciones (UHPC) tiene un papel fundamental tanto en las propiedades mecánicas como en la durabilidad de estos materiales. Los MCS, como cenizas volantes, microsilíce y escorias de alto horno, mejoran la microestructura del concreto, aumentando su densidad y reduciendo la porosidad, lo que limita la penetración de agentes agresivos como cloruros y dióxido de carbono, principales responsables de la corrosión del acero de refuerzo (Jaramillo Murcia, 2020).

Además, los aditivos químicos, incluidos los plastificantes y superplastificantes, permiten reducir la relación agua/cemento sin comprometer la trabajabilidad de la mezcla, logrando un concreto más compacto y resistente. Esto no solo incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión, sino que también mejora la durabilidad frente a fenómenos degradativos, incluyendo la abrasión y la acción de ambientes agresivos (Jaramillo Murcia, 2020).

La combinación de MCS y aditivos químicos en UHPC permite optimizar la interacción entre las partículas de cemento y los agregados finos, promoviendo la formación de una matriz más homogénea y densa. Como resultado, se obtiene un concreto con menor permeabilidad, mayor resistencia mecánica y mayor capacidad de proteger el acero de refuerzo frente a la corrosión, lo que lo convierte en una alternativa idónea para estructuras expuestas a condiciones severas (Jaramillo Murcia, 2020).

En conclusión, la incorporación de aditivos y materiales cementantes suplementarios representa una estrategia efectiva para mejorar tanto la durabilidad como el desempeño estructural de los concretos de ultra altas prestaciones, asegurando su resistencia a largo plazo frente a agresiones químicas y mecánicas (Jaramillo Murcia, 2020).

2.4.3. Diseño de mezclas con baja permeabilidad

El diseño de mezclas de concreto con baja permeabilidad es un aspecto clave para mejorar la durabilidad de las estructuras, ya que un concreto menos permeable disminuye la penetración de agua y de agentes agresivos como cloruros y dióxido de carbono, que pueden inducir la corrosión del acero de refuerzo (Arrieta & Carro, 2011). Para lograr esto, es fundamental controlar la relación agua/cemento, ya que valores bajos reducen la cantidad de vacíos capilares y promueven una matriz más densa y compacta.

Además, la selección de agregados de granulometría adecuada y la incorporación de materiales cementantes suplementarios, como cenizas volantes o microsílice, contribuyen a llenar los espacios intersticiales y mejorar la homogeneidad de la mezcla, incrementando la resistencia a la penetración de líquidos. El uso de aditivos plastificantes también facilita la reducción de la relación agua/cemento sin comprometer la trabajabilidad, lo que permite obtener concretos densos y uniformes que presentan menor permeabilidad (Arrieta & Carro, 2011).

Por otro lado, la adecuada dosificación y el correcto procedimiento de mezclado y compactación son esenciales para evitar la formación de vacíos y microfisuras, que pueden actuar como vías de ingreso de agentes agresivos. Cuando se combinan estos factores—relación agua/cemento controlada, materiales suplementarios y aditivos químicos—se obtiene un concreto con propiedades mejoradas de durabilidad y resistencia, lo que asegura un desempeño estructural más confiable a largo plazo, incluso en ambientes agresivos (Arrieta & Carro, 2011).

En resumen, el diseño de mezclas con baja permeabilidad requiere una combinación de control de proporciones, selección de materiales y técnicas de mezclado y compactación, con el fin de minimizar la entrada de agua y agentes corrosivos, garantizando la integridad y la durabilidad de las estructuras de concreto armado (Arrieta & Carro, 2011).

2.5. SUPERPLASTIFICANTES EN EL CONCRETO

El uso de aditivos superplastificantes en el concreto ha demostrado ser una estrategia eficaz para optimizar sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido. Fernández, Morales y Soto (2016) destacan que estos aditivos permiten una mayor trabajabilidad de las mezclas, reduciendo la cantidad de agua necesaria sin comprometer la consistencia. Esta mejora en la relación agua/cemento se traduce en un incremento en la resistencia mecánica, especialmente en edades posteriores a los 28 días, lo que los convierte en un recurso clave en proyectos que requieren concretos de altas prestaciones.

Además, los autores explican que la incorporación del superplastificante PSP NLS genera una estructura interna más compacta, disminuyendo la porosidad del concreto y favoreciendo su durabilidad frente a agentes externos. De esta forma, los superplastificantes no solo influyen en la resistencia a compresión, sino también en la calidad a largo plazo del material (Fernández et al., 2016).

En términos prácticos, la aplicación de superplastificantes facilita la colocación del concreto en obra, minimiza problemas de segregación y exudación, y asegura un desempeño superior en elementos estructurales exigentes. Por ello, el estudio confirma que estos aditivos son esenciales en el diseño de mezclas modernas, donde se busca alcanzar altas resistencias con menor consumo de agua y un mejor comportamiento frente al tiempo (Fernández et al., 2016).

2.5.1. Definición y clasificación de aditivos plastificantes

Los aditivos plastificantes se definen como compuestos químicos incorporados al hormigón, mortero o pasta con el objetivo de mejorar su trabajabilidad sin necesidad de incrementar la cantidad de agua. Su función principal consiste en dispersar las partículas de cemento, reduciendo la fricción interna y favoreciendo una mezcla más homogénea y fluida. De esta manera, los plastificantes permiten obtener mezclas más manejables, con menor relación agua/cemento, lo que repercute directamente en un aumento de la resistencia y de la compacidad del material (Gaspar-Tébar, 1985).

En cuanto a su clasificación, el autor señala que los aditivos plastificantes se dividen principalmente en dos grandes grupos: los plastificantes normales y los superplastificantes. Los primeros están orientados a mejorar moderadamente la consistencia y la facilidad de colocación del concreto, siendo útiles en aplicaciones convencionales donde se busca una mejora práctica en la trabajabilidad. Por otro lado, los superplastificantes ejercen un efecto mucho más intenso, reduciendo de manera significativa el contenido de agua en la mezcla y permitiendo alcanzar concretos de alta resistencia o con propiedades especiales, como el autocompactante.

Gaspar-Tébar (1985) también enfatiza que la acción de estos aditivos no se limita al estado fresco, sino que incide en el desempeño final de los elementos endurecidos, ya que al optimizar la distribución de partículas, se obtiene una estructura interna más densa y menos permeable. Por esta razón, los aditivos plastificantes constituyen una herramienta fundamental tanto en la producción de concretos convencionales como en el desarrollo de mezclas de alto rendimiento.

2.5.2. Mecanismos de acción de los superplastificantes

Los superplastificantes, especialmente los de base policarboxilato, actúan a través de mecanismos físico-químicos que modifican la interacción entre las partículas de cemento y el agua en la mezcla. Borralleras, Segura y Aguado (2018) señalan que su acción principal se fundamenta en dos efectos complementarios: la dispersión electrostática y la repulsión estérica.

En primer lugar, la dispersión electrostática ocurre cuando los grupos funcionales de los superplastificantes se adsorben en la superficie de las partículas de cemento, generando cargas que se repelen entre sí. Este fenómeno evita la floculación de las partículas y promueve una mejor distribución en el medio acuoso, lo que se traduce en una mezcla más fluida y con mayor trabajabilidad sin necesidad de incrementar la cantidad de agua.

Por otra parte, la repulsión estérica está asociada a la estructura molecular de las cadenas laterales del policarboxilato. Dichas cadenas generan un efecto de barrera física entre las partículas de cemento, dificultando su reagrupamiento y manteniendo la dispersión en el tiempo. Este mecanismo resulta clave para conservar la consistencia de la pasta y reducir la pérdida de fluidez, especialmente en sistemas donde podrían existir interacciones negativas con componentes como las arcillas (Borralleras et al., 2018).

En conjunto, ambos mecanismos explican la eficacia de los superplastificantes en el diseño de pastas y concretos de alto desempeño. No solo mejoran la colocación y compactación del material, sino que también inciden en la microestructura final al favorecer una hidratación más homogénea y una menor porosidad. Así, los superplastificantes se consolidan como aditivos fundamentales en mezclas modernas que requieren altas resistencias, durabilidad y estabilidad reológica (Borralleras et al., 2018).

2.5.3. Efecto de los superplastificantes en la trabajabilidad, resistencia y durabilidad

El empleo de aditivos superplastificantes en el concreto tiene un impacto significativo en tres aspectos fundamentales de su desempeño: la trabajabilidad, la resistencia mecánica y la durabilidad. En cuanto a la trabajabilidad, Sánchez Cabrera (2023) explica que estos aditivos mejoran la fluidez de la mezcla al reducir la fricción entre las partículas de cemento, lo que permite mantener una consistencia adecuada sin necesidad de incrementar el contenido de agua. Gracias a ello, se facilita la colocación y compactación del concreto, reduciendo riesgos de segregación y exudación, y garantizando una mejor homogeneidad en obra.

Respecto a la resistencia, el superplastificante contribuye a disminuir la relación agua/cemento, lo que favorece una estructura más compacta y de mayor densidad. Esta característica se traduce en un incremento de la resistencia a compresión, incluso cuando el concreto está sometido a condiciones exigentes, como elevadas temperaturas internas durante el proceso de fraguado. De esta manera, el aditivo asegura que la resistencia no se vea comprometida por la reducción de agua, sino que, al contrario, se vea fortalecida (Sánchez Cabrera, 2023).

En lo relativo a la durabilidad, los superplastificantes inciden de manera positiva al generar concretos menos porosos y, por tanto, con menor permeabilidad a agentes agresivos externos. Esto significa una mayor protección frente a procesos de deterioro como la carbonatación, la penetración de cloruros o la corrosión del acero de refuerzo. Según Sánchez Cabrera (2023), este efecto convierte a los superplastificantes en una herramienta clave para alargar la vida útil de las estructuras y garantizar un mejor desempeño frente a condiciones ambientales adversas.

En síntesis, los superplastificantes no solo actúan como aditivos que mejoran la facilidad de uso del concreto en estado fresco, sino que también potencian su resistencia estructural y aseguran su durabilidad a largo plazo, lo que los posiciona como insumos esenciales en la producción de concretos modernos de alto rendimiento (Sánchez Cabrera, 2023).

2.5.4. Impacto ambiental de los superplastificantes sintéticos

El uso de superplastificantes sintéticos en la industria de la construcción, si bien aporta beneficios técnicos en términos de trabajabilidad y resistencia del concreto, también plantea interrogantes sobre su impacto ambiental. Vergara, Villacorta, Cano y González (2025) explican que estos aditivos son derivados de procesos químicos industriales que implican un consumo significativo de energía y materias primas, lo que incrementa la huella de carbono asociada a su producción. Además, al ser compuestos sintéticos, su biodegradabilidad es limitada, lo que genera riesgos de acumulación en el ambiente cuando no se gestionan adecuadamente los residuos de las obras.

Otro aspecto señalado es que, en el ciclo de vida del concreto, la presencia de superplastificantes sintéticos puede influir en la gestión de residuos de demolición. Estos aditivos, al modificar las propiedades físico-químicas de la matriz cementicia, pueden dificultar la reutilización y el reciclaje completo de los materiales, lo que supone un reto frente a los principios de la economía circular. Asimismo, existe la preocupación de que algunos de sus componentes, en contacto con el agua o el suelo, liberen sustancias que alteren los ecosistemas, aunque en concentraciones bajas (Vergara et al., 2025).

No obstante, los autores también subrayan que los impactos negativos pueden mitigarse si se implementan estrategias de uso responsable y se avanza en la investigación de alternativas más sostenibles, como los aditivos de base natural o biotecnológica. En este sentido, el reto actual consiste en equilibrar las ventajas técnicas de los superplastificantes sintéticos con un enfoque de sostenibilidad ambiental que considere no solo la eficiencia estructural del concreto, sino también los efectos a largo plazo en el entorno y la calidad de vida (Vergara et al., 2025).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que se presenta es de enfoque cuantitativo, ya que se basa en la medición numérica de las variables involucradas, como la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción indirecta y el potencial de corrosión del acero embebido en concreto. A través de la recopilación y el análisis de datos objetivos, se busca determinar el efecto que produce la goma xantana, utilizada como superplastificante natural, sobre el comportamiento del concreto expuesto a cloruros.

El estudio se clasifica como experimental debido a que se manipuló intencionalmente una variable independiente, que en este caso corresponde al porcentaje de goma xantana incorporado en la mezcla de concreto. Esta variable se evaluó en cuatro niveles: 0 %, 0.3 %, 0.5 % y 0.7 % respecto al peso de cemento. A partir de esta modificación, se examinaron los efectos sobre variables dependientes como las propiedades mecánicas y la protección frente a la corrosión. Para cada sistema de mezcla se elaboraron tres especímenes de concreto, los cuales fueron curados bajo condiciones controladas hasta los 28 días, edad en la que se realizaron las pruebas correspondientes.

Este proyecto tiene un enfoque aplicado, ya que pretende ofrecer soluciones reales a una problemática práctica en el ámbito de la ingeniería civil: la durabilidad del concreto en ambientes agresivos. Al aprovechar un residuo agrícola como el jarabe de agave para la producción de un aditivo funcional, se promueve el desarrollo de materiales sostenibles que pueden integrarse en la industria de la construcción con menor impacto ambiental.

Desde la perspectiva del alcance, la investigación es explicativa, ya que no solo se limita a describir el comportamiento del concreto con aditivos naturales, sino que busca comprender las causas y mecanismos que explican dicho comportamiento. Se parte de la hipótesis de que la goma xantana actúa como modificador de la microestructura del concreto, contribuyendo a reducir su permeabilidad y, por lo tanto, a disminuir la tasa de penetración de cloruros, lo cual se traduce en una menor probabilidad de corrosión del acero de refuerzo.

La investigación se desarrolló en condiciones de laboratorio, lo que permitió tener un control preciso sobre las variables experimentales y garantizar la repetibilidad de los

resultados. Asimismo, el diseño es de tipo transversal, ya que las propiedades se evaluaron en un único momento, a los 28 días de edad del concreto.

3.2. MATERIALES UTILIZADOS

En este estudio se emplearon los materiales típicos del concreto armado (cemento, agregados, agua, refuerzo de acero) junto con el aditivo especial: goma xantana producida a partir de jarabe de agave. A continuación, se describe de manera detallada cada uno de los materiales utilizados, su origen, condiciones de uso y papel en la investigación.

- **Cemento**

Se utilizó cemento Portland tipo CPC 30R (o su equivalente según norma mexicana), como aglomerante hidráulico principal de la mezcla. El cemento es responsable de iniciar las reacciones de hidratación al mezclarse con agua, generando compuestos como el silicato cálcico hidratado (C-S-H) que confieren resistencia y cohesión al concreto. La calidad del cemento afecta directamente los tiempos de fraguado, resistencia mecánica y durabilidad del concreto. Estudios recientes señalan que no sólo la composición química del cemento sino también su finura, adiciones y compatibilidad con aditivos modifican la microestructura del concreto y su permeabilidad (Huang, Xu, & Xu, 2024).

- **Agregados (fino y grueso)**

Se emplearon agregados naturales: arena como agregado fino y grava triturada 1/2" como agregado grueso. Los agregados representan entre 60 % y 75 % del volumen total del concreto y su tamaño, forma, textura, absorción y distribución granulométrica influyen decisivamente en el comportamiento del concreto tanto en fresco como endurecido. Una correcta selección ayuda a minimizar vacíos, mejorar la compactación y controlar la demanda de agua de la mezcla. Los estudios sobre mezclas avanzadas señalan que una microestructura más densa de la matriz hormigonada reduce la penetración de iones agresivos y mejora la durabilidad (Masoumi, Farokhzad, & Ghasemi, 2023).

- **Agua**

Se utilizó agua potable libre de impurezas conforme a la norma correspondiente, pues la presencia de sólidos disueltos, sulfatos u otros contaminantes puede alterar las reacciones de hidratación y favorecer procesos perjudiciales como ataques químicos o expansión interna. La relación agua/cemento (a/c) fue controlada cuidadosamente.

- **Acero de refuerzo**

Para representar la armadura del concreto armado se utilizaron varillas corrugadas de diámetro estándar (3/8”), de acero conformes a la norma local. El acero cumple la función de resistir esfuerzos de tracción, compensando una limitación intrínseca del concreto. La calidad del acero, su adherencia al concreto, el recubrimiento adecuado y la integridad del acero frente a agentes agresivos son cruciales para el desempeño de la estructura. En este estudio, la evaluación mediante potenciales de media celda se realizó sobre este tipo de acero embebido en las probetas de concreto.

- **Goma xantana en polvo**

El componente distintivo de esta investigación es la goma xantana, un biopolímero natural producido por fermentación bacteriana a partir de subproductos azucarados como jarabe de agave. Esta goma xantana se secó, pulverizó y se incorporó en la mezcla de concreto como superplastificante natural en diferentes proporciones (0 %, 0.3 %, 0.5 % y 0.7 % del peso del cemento). La goma xantana modifica la reología de la mezcla, mejora la cohesión, reduce la segregación y favorece una matriz más densa con menor porosidad y permeabilidad.

3.3. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO

El diseño de mezcla constituye una etapa crucial en la elaboración de concretos con características específicas, pues permite establecer las proporciones óptimas de cada uno de los componentes (cemento, agua, agregados fino y grueso) con el fin de cumplir una resistencia requerida y condiciones de trabajabilidad, durabilidad y economía (Neville, 2012). En este proyecto se utilizó el método por peso en unidades del Sistema Internacional (SI) para concretos sin aire, apoyándose en la herramienta de código abierto Concrete Mix Design de Union College, que facilita el cálculo de proporciones a partir de parámetros establecidos por normas ACI.

Parámetros iniciales del diseño

El concreto fue diseñado para alcanzar una resistencia a la compresión de 200 kg/cm² (\approx 19.6 MPa) a los 28 días, cumpliendo con criterios comunes en elementos estructurales de baja y media sollicitación. Los valores base utilizados para el diseño de mezcla fueron los siguientes, conforme a los resultados del archivo cargado:

- Tipo de cemento: Portland CPC 30R conforme a NMX-C-414-ONNCCE.
- Tamaño máximo nominal del agregado grueso: 12.5 mm.
- Revenimiento requerido: 7.5 cm (slump intermedio, adecuada trabajabilidad sin pérdida de cohesión).
- Relación agua/cemento (a/c): 0.69, estimada para garantizar una buena relación entre resistencia y trabajabilidad.

Todos los valores fueron ingresados a DM Concrete, el cual calcula automáticamente los pesos por metro cúbico de cada componente.

Proporciones obtenidas

El diseño arrojó las siguientes proporciones por metro cúbico de concreto:

- Cemento: 336.07 kg/m³
- Agua: 184.84 kg/m³
- Agregado fino (arena): 699.51 kg/m³

-
- Agregado grueso (tezontle o grava): 1088.39 kg/m³
 - Relación agua/cemento: 0.69

Estas proporciones se mantuvieron constantes para las cuatro mezclas experimentales, que incorporaron goma xantana como superplastificante natural en proporciones de 0.0 %, 0.3 %, 0.5 % y 0.7 % respecto al peso del cemento, respectivamente.

Incorporación del aditivo natural

La goma xantana fue añadida en forma de polvo fino seco, previamente sintetizado y deshidratado, en las siguientes proporciones:

- Mezcla 1: 0 % (mezcla de control, sin aditivo).
- Mezcla 2: 0.3 % del peso del cemento → 1.01 kg/m³.
- Mezcla 3: 0.5 % del peso del cemento → 1.68 kg/m³.
- Mezcla 4: 0.7 % del peso del cemento → 2.35 kg/m³.

Cada mezcla fue preparada en el laboratorio de tecnología de materiales de la UAEH, cuidando los tiempos de mezclado, incorporación seca del aditivo y las condiciones de curado. La goma xantana no se disolvió previamente en agua para evitar alterar la relación agua/cemento, sino que fue incorporada directamente a los materiales secos antes del mezclado húmedo.



Fig. 8. Mezcla de agregados secos con goma. Fuente: Elaboración propia.

3.4. FABRICACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES

La etapa de fabricación de especímenes es fundamental para garantizar la validez y reproducibilidad de los ensayos mecánicos y de durabilidad del concreto. En este estudio se elaboraron diferentes tipos de cilindros de concreto con y sin la adición de goma xantana, siguiendo los lineamientos normativos pertinentes y asegurando condiciones controladas de curado. A continuación, se describen las características, procedimientos y finalidad de cada tipo de espécimen elaborado.

3.4.1 Especímenes para resistencia a la compresión

Para la evaluación de la resistencia a la compresión a los 28 días, se elaboraron tres especímenes por sistema de mezcla, es decir, para cada dosificación con 0 %, 0.3 %, 0.5 % y 0.7 % de goma xantana (respecto al peso del cemento). Cada uno de estos especímenes fue cilíndrico, con un diámetro de 10 cm y una altura de 20 cm, dimensiones estándar conforme a la norma ASTM C192/C192M-22, que regula la fabricación y curado de especímenes de concreto en condiciones de laboratorio.

La mezcla de concreto se vertió en moldes metálicos previamente lubricados, distribuyéndola en tres capas de igual altura. Cada capa fue compactada mediante vibrado manual con una varilla de acero de 16 mm de diámetro, aplicando 25 golpes uniformemente distribuidos. Posteriormente, se aplicaron 15 golpes con un mazo de goma sobre las paredes externas del molde, a fin de facilitar la liberación de burbujas de aire atrapadas y mejorar la compactación del concreto, conforme a las recomendaciones prácticas de la norma ASTM C192/C192M-22. Posteriormente, las superficies fueron alisadas y los moldes cubiertos con plástico para evitar la pérdida de humedad durante las primeras horas. A las 24 horas, los especímenes fueron desmoldados y transferidos a un tanque de curado con agua a temperatura ambiente, donde permanecieron totalmente sumergidos durante 28 días, periodo considerado suficiente para el desarrollo de la resistencia mecánica máxima del concreto ordinario.



Fig. 9. Cilindros para prueba de compresión, con 0.3% de Goma. Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Especímenes para resistencia a la tracción indirecta

Con el fin de evaluar el comportamiento a tracción indirecta, también conocida como resistencia a la tracción por compresión diametral o ensayo brasileño, se elaboraron especímenes cilíndricos de mayor tamaño, específicamente de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, por triplicado para cada sistema. Esta geometría se seleccionó conforme a los requerimientos de la norma ASTM C496/C496M-17, la cual regula el ensayo de tracción indirecta para concreto.

El procedimiento de moldeo fue similar al utilizado en los especímenes de compresión, asegurando un buen acomodo del concreto, compactación adecuada y un acabado superficial uniforme. Posterior al desmoldeo, estos especímenes también fueron curados en agua durante 28 días. Este ensayo permite obtener una estimación indirecta de la resistencia a la tracción del concreto, propiedad esencial para la predicción de agrietamientos y diseño estructural.

3.4.3 Especímenes para potenciales de media celda

Además de los ensayos mecánicos, se incorporó una evaluación del potencial de corrosión del acero embebido mediante el método de potenciales de media celda, conforme a la norma ASTM C876-22. Para ello, se diseñaron especímenes específicos que permitieran el embebido de una varilla de refuerzo y facilitaran la lectura eléctrica posterior.

Cada uno de estos especímenes consistió en un cilindro de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura, en cuyo centro se colocó una varilla corrugada de acero de refuerzo de 3/8" de diámetro (≈ 9.5 mm) y 18 cm de longitud. La varilla fue parcialmente embebida en el concreto, dejando expuesto uno de sus extremos para permitir la conexión al multímetro o al electrodo de referencia durante las lecturas de potencial. El concreto se vertió cuidadosamente alrededor de la varilla, utilizando espaciadores para asegurar su centrado y evitando contactos con las paredes del molde que pudieran interferir en la medición.



Fig. 10. Especímenes para pruebas de potenciales de media celda con el 0.5% de goma. Fuente: elaboración propia.

3.4.4. Condiciones de curado

El proceso de curado desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, ya que asegura la hidratación continua del cemento durante los primeros días después del colado. En este estudio, se adoptó el método de curado por inmersión en agua, reconocido por ser uno de los más eficaces para mantener una humedad constante y temperatura estable en los especímenes.

Una vez transcurridas las primeras 24 horas desde la fabricación de las probetas, estas fueron cuidadosamente desmoldadas y trasladadas a un tanque de curado con agua potable a temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). Este tanque fue ubicado en un espacio protegido, libre de incidencia directa de rayos solares o corrientes de aire, lo que permitió mantener condiciones ambientales estables durante todo el periodo de curado.

Los especímenes permanecieron totalmente sumergidos durante 28 días, lapso establecido por la normativa técnica (ASTM C192/C192M-22) como el periodo estándar para asegurar el desarrollo óptimo de la resistencia a la compresión del concreto convencional. Este tiempo permite que las reacciones de hidratación del cemento se desarrollen en condiciones ideales, promoviendo una adecuada ganancia de resistencia y una estructura de pasta más densa y menos porosa, lo que mejora tanto el comportamiento mecánico como la durabilidad del concreto a largo plazo.

Es importante destacar que durante el curado no se observaron pérdidas de agua significativas ni fluctuaciones de temperatura que pudieran afectar la uniformidad del proceso. Además, se evitó cualquier manipulación de los especímenes que pudiera comprometer su integridad física antes de las fechas programadas para los ensayos.

La elección del método de inmersión fue particularmente importante debido a la presencia de un aditivo natural como la goma xantana, cuya acción sobre la microestructura del concreto podría verse influenciada por la disponibilidad continua de agua durante el proceso de hidratación. A través de este régimen de curado, se buscó estandarizar las condiciones para todas las dosificaciones ensayadas y minimizar variables externas que pudieran incidir en los resultados comparativos de las distintas mezclas evaluadas.



Fig. 11. Tina de exposición a cloruros para acelerar la corrosión. Fuente: elaboración propia.

3.5. OBTENCIÓN DE LA GOMA XANTANA A PARTIR DE JARABE DE AGAVE

3.5.1. Preparación del sustrato de fermentación

El primer paso consistió en la elaboración de una solución nutritiva a base de jarabe de agave, el cual constituye una fuente rica en azúcares fermentables, especialmente fructosa y glucosa. Se disolvió el jarabe de agave en agua destilada hasta alcanzar una concentración final de aproximadamente 15 % en azúcares totales, valor seleccionado conforme a reportes previos que indican su eficacia en la producción de biopolímeros por vía bacteriana (García-Ochoa et al., 2000; Vazquez-Armenta et al., 2021).

La mezcla fue homogeneizada bajo agitación constante y controlada, asegurando así una distribución uniforme del sustrato para optimizar el entorno de desarrollo bacteriano previo a la inoculación.

3.5.2. Inoculación bacteriana con *Xanthomonas campestris*

Se utilizó la cepa *Xanthomonas campestris*, reconocida por su alta eficiencia en la síntesis de goma xantana a partir de distintos azúcares. Las bacterias fueron previamente cultivadas en medio sólido de agar nutriente y luego transferidas a un medio líquido para su activación. La incubación se realizó a temperaturas entre 28 y 32 °C durante 24 horas, bajo agitación ligera (100–150 rpm), condiciones que favorecen la fase logarítmica de crecimiento celular (Rosalam & England, 2006).

Posteriormente, se inoculó el sustrato de jarabe de agave con una concentración estimada de 10^6 a 10^7 células/mL, iniciando así el proceso de fermentación aeróbica.

3.5.3. Fermentación y monitoreo de condiciones

La fermentación se llevó a cabo en frascos tipo Erlenmeyer de 1 L con tapa permeable, bajo agitación constante en agitador orbital a 150 rpm, manteniendo una temperatura entre 30 y 35 °C y un pH controlado entre 6.0 y 7.0, mediante la adición puntual de soluciones tampón. Este proceso se prolongó durante 3 a 5 días, periodo durante el cual la bacteria metabolizó los azúcares presentes, secretando goma xantana al medio de cultivo (Kumar et al., 2017).

Durante la fermentación, se monitorearon parámetros fisicoquímicos como viscosidad, pH y temperatura, a fin de garantizar una producción eficiente del biopolímero.

3.5.4. Recuperación y purificación de la goma xantana

Una vez completada la fermentación, el medio fue sometido a un proceso de separación de fases para recuperar el biopolímero. Se adicionó etanol absoluto en proporción 2:1 (etanol:medio fermentado), provocando la precipitación de la goma xantana como un sólido viscoso y fibroso.

La mezcla fue sometida a centrifugación a 4500 rpm durante 10 minutos, repitiendo este proceso en tres ciclos consecutivos con lavados intermedios en etanol para remover impurezas y restos celulares. El precipitado obtenido fue secado en horno de convección a 45 °C durante 24 horas, siguiendo las recomendaciones de secado lento para evitar degradación térmica del polisacárido.

3.5.5. Pulverización y almacenamiento

Una vez seco, el producto fue pulverizado mediante un molino de baja velocidad hasta obtener una granulometría fina y homogénea, adecuada para su posterior dispersión en la mezcla de concreto. El polvo final de goma xantana fue almacenado en frascos de vidrio ámbar, herméticamente cerrados, y conservado en un ambiente seco y fresco para evitar su degradación por humedad.

3.6. ENSAYOS REALIZADOS

Con el propósito de evaluar de manera integral el comportamiento del concreto modificado con goma xantana como aditivo superplastificante natural, se realizaron una serie de ensayos físicos, mecánicos y electroquímicos no destructivos. Estos ensayos permitieron caracterizar el desempeño del concreto en términos de su resistencia mecánica, su capacidad para resistir procesos de tracción y su comportamiento frente a la corrosión del acero de refuerzo.

La selección de los ensayos se fundamentó en normativas internacionales vigentes (ASTM), en buenas prácticas de laboratorio, y en experiencias previas documentadas en investigaciones relacionadas con concretos modificados con aditivos naturales o polímeros sustentables (Huang et al., 2021; Santos et al., 2023). Se buscó establecer un protocolo experimental que permitiera generar resultados confiables, comparables y repetibles, además de cuantificar el impacto del uso de goma xantana producida a partir de jarabe de agave.

Los ensayos se realizaron exclusivamente a los 28 días de curado, bajo condiciones de inmersión en agua a temperatura ambiente, lo cual representa un punto de referencia ampliamente aceptado para evaluar la resistencia mecánica final del concreto convencional (Neville, 2011). Esta edad de prueba coincide con el punto en que el concreto alcanza entre el 90 % y 100 % de su resistencia potencial en condiciones normales de curado.

A continuación, se listan y describen los ensayos seleccionados para esta investigación, los cuales fueron aplicados a los diferentes sistemas de mezcla con proporciones de goma xantana de 0 %, 0.3 %, 0.5 % y 0.7 % respecto al peso del cemento:

- Ensayo de resistencia a la compresión: permite evaluar la capacidad del concreto para soportar cargas axiales. Es uno de los parámetros más importantes en la ingeniería estructural y se realizó conforme a ASTM C39/C39M-23.
- Ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño): este método permite estimar la resistencia del concreto a los esfuerzos de tracción, que son críticos para evaluar la aparición de fisuración. Se aplicó conforme a la norma ASTM C496/C496M-17.

-
- Monitoreo de potenciales de media celda: se utilizó para estimar de forma indirecta la probabilidad de corrosión del acero embebido. Este procedimiento no destructivo fue implementado conforme a ASTM C876-22, utilizando un electrodo de referencia Cu/CuSO₄ y un multímetro de alta impedancia.

Cada uno de estos ensayos fue aplicado a un mínimo de tres especímenes por sistema, de acuerdo con los principios estadísticos mínimos de repetibilidad y reproducibilidad. El objetivo fue asegurar que los resultados fueran representativos del comportamiento del material frente a las variables evaluadas.

Este conjunto de ensayos permitió establecer una correlación entre el porcentaje de goma xantana utilizada y el desempeño del concreto tanto en sus propiedades mecánicas como en su durabilidad frente a entornos agresivos. Asimismo, permitió valorar la viabilidad de su uso como alternativa sustentable a los aditivos superplastificantes convencionales, tal como lo han propuesto otros estudios en los últimos años (Ahmad et al., 2022; Cheng et al., 2021; Rojek et al., 2023).

3.6.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto es una de las propiedades más relevantes y representativas para evaluar su desempeño estructural. Esta propiedad indica la capacidad del concreto para soportar cargas axiales sin fallar y es el parámetro principal utilizado para el diseño de estructuras de concreto reforzado (Neville, 2011). En esta investigación, se evaluó la resistencia a la compresión de concretos elaborados con distintas proporciones de goma xantana como superplastificante natural, a fin de determinar el efecto de este aditivo sobre las características mecánicas del material.

Normativa aplicada

La prueba fue realizada conforme a lo establecido por la norma ASTM C39/C39M-23 “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, la cual especifica los procedimientos para la preparación, alineación y carga de especímenes cilíndricos de concreto. Esta norma es ampliamente utilizada a nivel internacional como estándar de referencia para caracterizar el comportamiento compresivo del concreto endurecido.

Dimensiones y preparación de especímenes

Para cada uno de los sistemas de mezcla evaluados (con 0 %, 0.3 %, 0.5 % y 0.7 % de goma xantana respecto al peso del cemento), se elaboraron tres especímenes cilíndricos por sistema con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, tal como lo establece la normativa mencionada. Los especímenes fueron moldeados en capas, compactadas por varillado manual y curados por inmersión durante 28 días a temperatura ambiente, asegurando con ello el desarrollo óptimo de la resistencia mecánica.

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron utilizando una prensa hidráulica de accionamiento semiautomático marca Controls, modelo 50-C43C04, diseñada específicamente para pruebas de materiales cementantes. Esta máquina cuenta con un cabezal superior fijo y un plato inferior móvil, montado sobre un pistón accionado hidráulicamente. El equipo se programó, manteniendo una velocidad constante de aplicación de carga de 0.25 MPa/s (equivalente a 2.5 kg/cm²/s).

Procedimiento de ensayo

Previo al ensayo, los especímenes fueron retirados del tanque de curado, limpiados y secados superficialmente. Se verificó su alineación vertical en la máquina de ensayo para evitar concentraciones de esfuerzos no deseadas. Posteriormente, se aplicó una carga axial creciente hasta la falla del espécimen, registrándose la carga máxima alcanzada, la cual se utilizó para calcular la resistencia a la compresión mediante la fórmula:

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

donde:

f'_c es la resistencia a la compresión (MPa),

P es la carga máxima (N),

A es el área de la sección transversal del espécimen (mm²).

Objetivo de este ensayo en el contexto del estudio

El objetivo de esta prueba fue determinar si la adición de goma xantana, en sus diferentes proporciones, genera un efecto positivo, negativo o neutro sobre la resistencia mecánica del concreto.

Además, se busca identificar si existe un umbral óptimo de contenido de goma xantana que favorezca el desarrollo de la resistencia, sin comprometer la integridad estructural del material, tal como lo han señalado estudios previos que utilizaron polisacáridos naturales como aditivos sostenibles en concretos (Huang et al., 2021).

3.6.2. Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta del concreto, también conocida como ensayo brasileño, es un parámetro fundamental que complementa la caracterización mecánica del material. Aunque el concreto presenta una elevada resistencia a la compresión, su resistencia a la tracción es significativamente menor, lo que lo hace susceptible a agrietamientos y fisuras bajo esfuerzos de tracción, particularmente en zonas de flexión, corte o torsión en elementos estructurales (Neville, 2011). Este ensayo permite estimar de forma indirecta la capacidad del concreto para resistir tensiones de tracción sin la necesidad de aplicar una carga axial directa, lo cual sería complejo dada la naturaleza frágil del material.

Normativa aplicada y dimensiones de los especímenes

Para la ejecución del ensayo, se siguieron los lineamientos de la norma ASTM C496/C496M-17, la cual establece el procedimiento para determinar la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de concreto. Se emplearon especímenes cilíndricos con dimensiones de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, elaborados por triplicado para cada sistema de mezcla, incluyendo el concreto de referencia y los modificados con 0.3 %, 0.5 % y 0.7 % de goma xantana.

Los especímenes fueron fabricados en laboratorio según la norma ASTM C192/C192M-22, curados por inmersión en agua a temperatura ambiente durante 28 días, y almacenados hasta el momento del ensayo en condiciones adecuadas de humedad y temperatura.

Para los ensayos de resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral (ensayo brasileño), se utilizó el mismo equipo de compresión adaptado con una celda brasileña especialmente diseñada para este tipo de prueba, permitiendo aplicar la carga de forma tangencial a lo largo del diámetro de los especímenes cilíndricos. La configuración siguió lo estipulado en la norma NMX-C-191-ONNCCE-1998, y la aplicación de la carga se realizó con la misma velocidad constante de 0.25 MPa/s, lo cual aseguró condiciones homogéneas entre ambas pruebas y facilitó la comparación entre los resultados de compresión y tracción indirecta.

Procedimiento del ensayo

El procedimiento consiste en aplicar una carga compresiva a lo largo del diámetro del cilindro, generando un estado de esfuerzos de tracción en la dirección perpendicular a la línea de carga. El concreto tiende a fracturarse por tracción a lo largo del eje vertical del espécimen.

La resistencia a la tracción indirecta se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f_t = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D}$$

donde:

f_t es la resistencia a la tracción indirecta (MPa),

P es la carga máxima aplicada (N),

L es la altura del cilindro (mm),

D es el diámetro del cilindro (mm).

Durante el ensayo, se registró la carga máxima soportada por cada espécimen antes de la fractura. Posteriormente, se evaluaron las líneas de fisura y la forma de ruptura para identificar comportamientos anómalos o indicadores de baja adherencia entre matriz y agregados.

Importancia del ensayo en esta investigación

La incorporación de aditivos como la goma xantana puede modificar la microestructura de la matriz cementicia, afectando la formación de poros, la distribución de las fases hidratadas y la adherencia entre la pasta y los agregados (Cheng et al., 2021). Estos cambios tienen un impacto directo en la resistencia a la tracción del concreto, especialmente en mezclas donde se busca mejorar la trabajabilidad o reducir el contenido de agua.

Por ello, este ensayo resulta fundamental para determinar si el uso de goma xantana no solo mantiene o mejora la resistencia a compresión, sino que también contribuye al

control de la fisuración y a la durabilidad del material frente a cargas estructurales variables. Investigaciones recientes han demostrado que ciertos polisacáridos naturales pueden mejorar la cohesión interna del concreto y contribuir al incremento de la resistencia a tracción hasta en un 5-10 % en comparación con mezclas sin aditivos (Huang et al., 2021; Santos et al., 2023).

3.6.3. Potenciales de media celda

El monitoreo del estado de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto se realizó mediante la técnica de medición de potenciales de media celda, la cual se fundamenta en el principio electroquímico de establecer la diferencia de potencial entre el acero y un electrodo de referencia en contacto con la superficie del concreto. Esta técnica es ampliamente reconocida por su simplicidad, bajo costo y efectividad para detectar la actividad corrosiva en estructuras de concreto armado, particularmente en estudios comparativos de desempeño frente a agentes agresivos como los cloruros (ASTM C876-22; Andrade & Alonso, 2001).

Preparación de especímenes

Para este ensayo, se fabricaron especímenes cilíndricos de concreto con dimensiones de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura, diseñados específicamente para la inserción de una varilla corrugada de acero de refuerzo de 3/8" (diámetro nominal de 9.5 mm) y longitud de 18 cm (figura 10). La varilla se colocó centrada longitudinalmente en el molde, garantizando un recubrimiento mínimo de concreto en todos los lados, con el fin de simular condiciones reales de una estructura expuesta. Los moldes utilizados fueron de plástico rígido, y previo al vaciado del concreto, se aplicó desmoldante para facilitar la extracción de los especímenes.

Tras la elaboración de las probetas, estas se curaron durante 28 días en agua a temperatura ambiente, en condiciones controladas de laboratorio, con el propósito de asegurar el desarrollo completo de la resistencia del concreto antes de su exposición a ambientes agresivos.

Exposición a ambiente clorado y monitoreo

Una vez transcurrido el periodo de curado, los especímenes fueron colocados en una cámara de aspersion de cloruros (figura 11), diseñada para simular un ambiente marino o industrial, donde el principal agente agresivo es el ion cloruro (Cl^-). La solución utilizada fue NaCl al 3.5 % en peso, la cual se aplicó de manera uniforme sobre los especímenes mediante un sistema de aspersion controlado que mantenía las superficies húmedas constantemente, favoreciendo la difusion de cloruros hacia el interior del concreto.

La exposicion se prolongó durante 40 días, con un seguimiento periódico del potencial de media celda, medido en intervalos específicos (días 1, 4, 8, 12, 15, 19, 21, 25, 27, 30, 33, 36 y 40), empleando un electrodo de referencia de cobre/cobre sulfato (Cu/CuSO_4). Las mediciones se realizaron conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM C876-22, garantizando el contacto eléctrico adecuado y la saturación del electrodo (figura 19).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en los diferentes sistemas de concreto con distintas concentraciones de goma xantana, y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.1. Los valores de resistencia a la compresión para los sistemas con goma xantana fueron medidos en tres especímenes por cada concentración, y los resultados promedian las mediciones realizadas en cada uno de ellos.

Tabla 1. Resultados de resistencias a la compresión de los distintos sistemas. Fuente: elaboración propia.

Especimen	Resistencia (kg/cm²)
0%_ 1	203.11
0%_ 2	198.59
0%_ 3	204.38
0.3%_ 1	208.23
0.3%_ 2	210.2
0.3%_ 3	205.72
0.5%_ 1	212.71
0.5%_ 2	214.68
0.5%_ 3	208.86
0.7%_ 1	200.59
0.7%_ 2	197.37
0.7%_ 3	194.16

4.1.1. Resistencia a la compresión de las muestras

La resistencia a la compresión de los sistemas de concreto con goma xantana varió dependiendo de la concentración de este aditivo. Los resultados obtenidos para las concentraciones de 0%, 0.3%, 0.5%, y 0.7% de goma xantana son los siguientes:

- Para el sistema sin goma xantana (0%), las muestras presentaron resistencias promedio a la compresión de 203.11 kg/cm², 198.59 kg/cm², y 204.38 kg/cm² para los tres especímenes ensayados, con un promedio general de aproximadamente 202.02 kg/cm².
- En el sistema con 0.3% de goma xantana, las resistencias a la compresión fueron 208.23 kg/cm², 210.2 kg/cm², y 205.72 kg/cm², con un promedio general de 208.72 kg/cm².
- Para el sistema con 0.5% de goma xantana, los valores de resistencia fueron más elevados, con mediciones de 214.68 kg/cm², 208.86 kg/cm², y 212.71 kg/cm², resultando en un promedio de 212.08 kg/cm².
- Finalmente, para el sistema con 0.7% de goma xantana, se observó una disminución en la resistencia a la compresión en comparación con las concentraciones menores, con valores de 197.37 kg/cm², 200.59 kg/cm², y 194.16 kg/cm², con un promedio general de 197.04 kg/cm².

4.1.2. Discusión de los Resultados ensayos de compresión

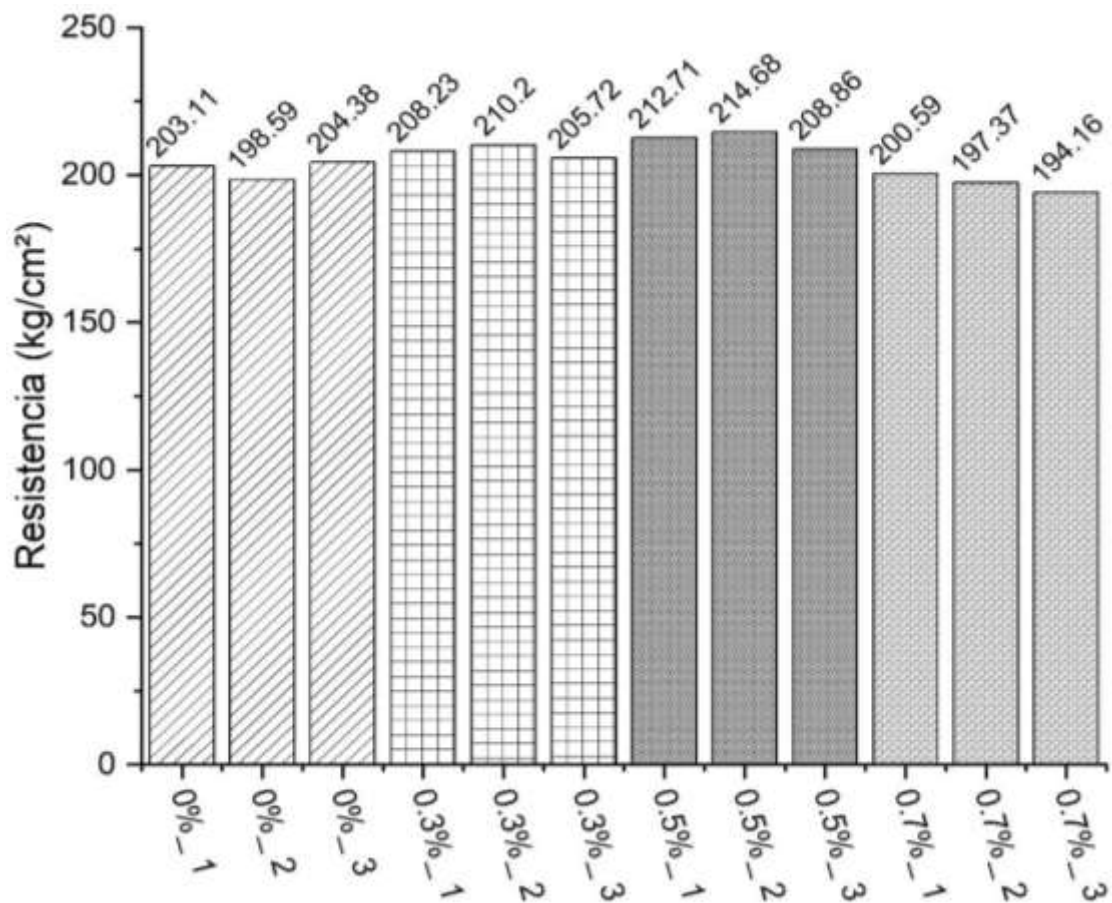
A partir de los resultados obtenidos, se observa que la adición de goma xantana al concreto inicialmente incrementó la resistencia a la compresión hasta una concentración de 0.5%. Las muestras con 0.5% de goma xantana mostraron el valor más alto de resistencia a la compresión, lo que sugiere que en concentraciones moderadas, la goma xantana podría estar optimizando la estructura interna del concreto, mejorando su compactación y contribuyendo a un aumento en la dureza y rigidez del material.

Por otro lado, la concentración de 0.7% mostró una disminución en la resistencia a la compresión en comparación con las concentraciones más bajas. Esto podría estar

relacionado con el hecho de que la goma xantana en altas concentraciones puede alterar las propiedades reológicas de la mezcla de concreto, haciendo que se vuelva demasiado plástica y afectando la formación de la microestructura del material. Este fenómeno es consistente con investigaciones previas que han reportado que concentraciones elevadas de superplastificantes pueden reducir la resistencia mecánica del concreto debido a la modificación de la estructura porosa y la distribución del agua (Huang et al., 2018; Kumar & Kumar, 2019).

El comportamiento observado (figura 4.1) en la resistencia a la compresión podría estar relacionado con la capacidad de la goma xantana para mejorar la trabajabilidad del concreto, lo cual facilita la mezcla y la colocación del concreto en el molde, permitiendo una mejor compactación, pero al mismo tiempo, en concentraciones más altas, puede interferir con el proceso de hidratación del cemento, lo que lleva a una menor resistencia (Pérez et al., 2020).

Dado que la goma xantana actúa como un agente reductor de agua y modificador de la reología de la mezcla (Cheng et al., 2021; Santos et al., 2023), se espera que influya tanto en la hidratación del cemento como en la densificación de la matriz del concreto, factores directamente relacionados con su resistencia a la compresión.



Gráfica 1. Resistencia a la compresión de los distintos sistemas de concreto con goma de Xantana. Fuente: elaboración propia.

4.2. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA

Se realizaron ensayos de resistencia a la tracción indirecta mediante el método brasileño (ASTM C496/C496M-17) en los diferentes sistemas de concreto con distintas concentraciones de goma xantana, y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.2. Los valores de resistencia fueron determinados a partir del promedio de tres especímenes por cada sistema, siguiendo condiciones homogéneas de curado y carga aplicada, con el objetivo de evaluar el efecto del aditivo sobre el comportamiento a tracción del concreto.

Tabla 2. Resultados de resistencia a la tracción indirecta (kg/cm²). Fuente: elaboración propia.

Sistema con goma xantana	Especímen 1	Especímen 2	Especímen 3	Promedio (kg/cm²)
0 % (control)	18.35	17.89	18.12	18.12
0.3 %	18.96	19.13	18.71	18.93
0.5 %	20.24	20.51	19.94	20.23
0.7 %	17.92	17.48	17.61	17.67



Fig. 12. Resultados de resistencia a la tracción indirecta (kg/cm^2). Fuente: Elaboración propia.

4.2.1. Resistencia a la tracción indirecta de las muestras

La resistencia a la tracción indirecta mostró un comportamiento similar al observado en los ensayos de compresión, presentando una tendencia al incremento con la incorporación de goma xantana hasta una concentración óptima. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Para el sistema sin goma xantana (0 %), los valores obtenidos fueron de 18.35, 17.89 y 18.12 kg/cm^2 , con un promedio general de 18.12 kg/cm^2 .
- En el sistema con 0.3 % de goma xantana, los especímenes alcanzaron resistencias de 18.96, 19.13 y 18.71 kg/cm^2 , promediando 18.93 kg/cm^2 .

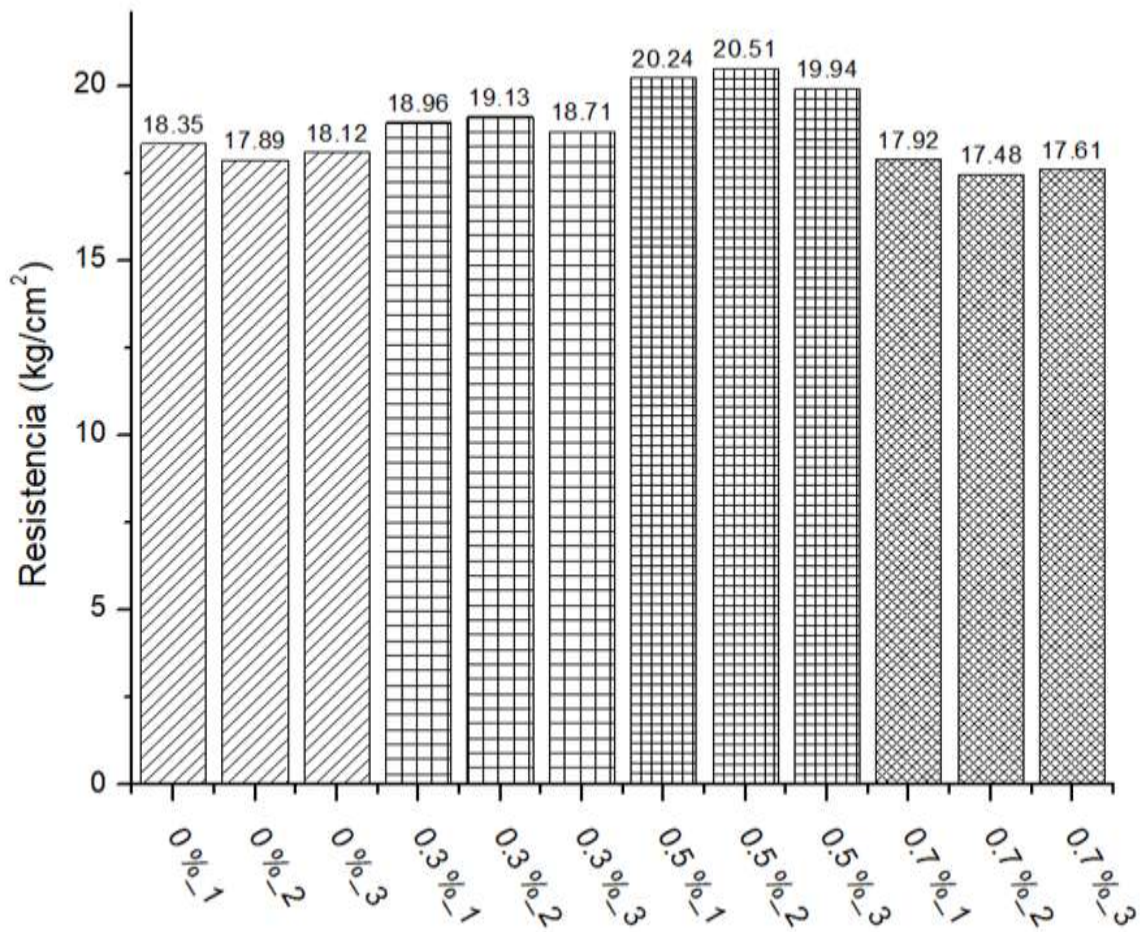
-
- Para el sistema con 0.5 % de goma xantana, se obtuvo el mejor desempeño mecánico, con valores de 20.24, 20.51 y 19.94 kg/cm², y un promedio de 20.23 kg/cm².
 - Finalmente, al emplear una concentración de 0.7 % de goma xantana, los valores de resistencia disminuyeron, registrándose 17.92, 17.48 y 17.61 kg/cm², con un promedio de 17.67 kg/cm².

4.2.2. Discusión de los resultados de tracción indirecta

Los resultados indican que la adición de goma xantana en bajas y medias concentraciones favorece la resistencia a la tracción indirecta del concreto (figura 4.2). Específicamente, el sistema con 0.5 % presentó un aumento de aproximadamente 11.6 % respecto al sistema control. Este comportamiento puede atribuirse a una mejor distribución de partículas, aumento en la cohesión de la mezcla fresca, y a una matriz más homogénea, lo que mejora la transferencia de esfuerzos en la zona interfacial agregado-pasta (Zhou et al., 2020; Huang et al., 2021).

La disminución observada a una concentración de 0.7 % puede estar asociada a un exceso de aditivo que podría generar efectos negativos como la segregación, incremento de la porosidad o afectación de la hidratación del cemento, lo cual se ha reportado en estudios donde concentraciones elevadas de aditivos viscosos pueden provocar pérdida de desempeño mecánico (Santos et al., 2023; Kumar & Kumar, 2019).

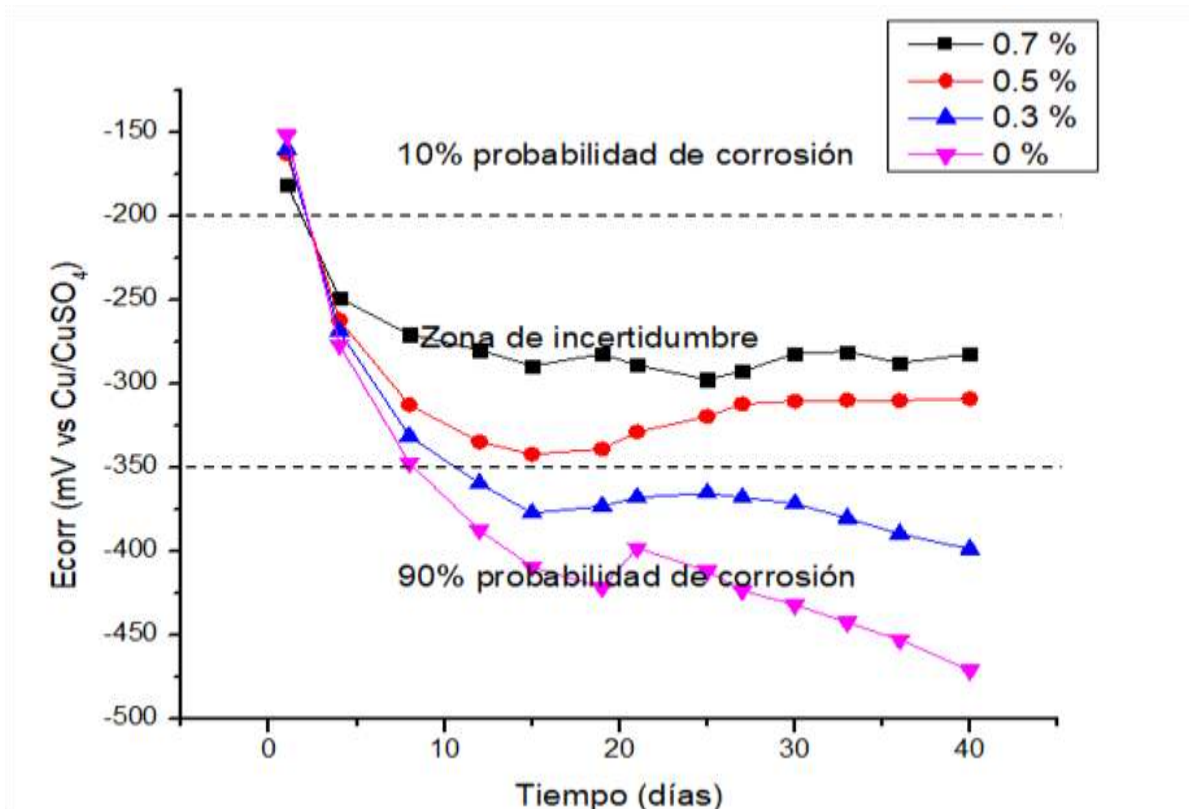
Además, es importante destacar que los valores obtenidos están dentro del rango esperado para concretos convencionales, ya que típicamente la resistencia a la tracción indirecta representa entre el 8 % y el 12 % de la resistencia a la compresión del mismo sistema (Neville & Brooks, 2010; Li & Kwan, 2022). En este caso, los sistemas evaluados mantienen esa proporcionalidad, validando la consistencia del comportamiento observado.



Gráfica 2. Variación de la resistencia a la tracción en función del porcentaje de goma xantana utilizada. Fuente: elaboración propia.

4.3. Potencial de Media Celda

Después de 40 días de exposición a la solución salina al 3.5% de cloruro de sodio (NaCl), los resultados de los potenciales de corrosión (E_{corr}) para las distintas concentraciones de goma xantana en el concreto se detallan en la Figura 4.3. Se observó una disminución generalizada del potencial de corrosión durante los primeros días para todas las muestras, alcanzando valores más negativos entre -150 mV y -200 mV. Durante los primeros días de exposición, las muestras mostraron un comportamiento inicial estable, pero posteriormente, la disminución en el potencial de corrosión, especialmente en los sistemas con 0.5% y 0.7% de goma xantana, alcanzando valores de -200 mV a -350 mV al final del periodo experimental. Este descenso indica una zona de incertidumbre, lo que sugiere una probabilidad baja a moderada de corrosión de las muestras (Pérez et al., 2020).



Gráfica 3. Potenciales de corrosión para los distintos sistemas con goma de Xantana.
Fuente: elaboración propia.

El uso de goma xantana como aditivo en las mezclas de concreto parece tener un efecto en la resistencia a la corrosión. El aumento gradual de la concentración de goma xantana en el concreto fue responsable de un descenso más negativo en los valores de potencial de corrosión, particularmente en las muestras con 0.5% y 0.7%, donde los valores de potencial fueron consistentemente más bajos durante el período de exposición.

Se ha demostrado que la goma xantana, al ser un superplastificante natural, podría actuar como una barrera que mejora la permeabilidad del concreto, facilitando el paso de iones cloruro hacia las zonas del acero de refuerzo. Esto implica que la goma xantana puede modificar las propiedades eléctricas del concreto y, por lo tanto, influir en la resistividad del material (Huang et al., 2018; Kumar & Kumar, 2019). Este fenómeno es especialmente relevante en las zonas de alta corrosión, donde la resistividad eléctrica del concreto se ve disminuida debido a la presencia de goma xantana, lo que facilita la difusión de los iones cloruro hacia el acero de refuerzo.

A medida que avanzaba la exposición (tabla 4.3), todas las muestras con goma xantana fueron mostrando un descenso continuo hacia los valores de potencial más negativos, ingresando progresivamente en la zona de probabilidad de corrosión (más del 90% de probabilidad). Entre los días 18 y 39, se observó que las muestras con mayor concentración de goma xantana (0.5% y 0.7%) llegaron a valores de potencial de corrosión constantes, que se mantuvieron entre -250 mV y -350 mV, lo que indica la probable formación de capas de óxido no protector en el acero de refuerzo (Bertolini et al., 2020).

En particular, la muestra 0%, que no contenía goma xantana, presentó los valores de potencial más negativos, alcanzando hasta -500 mV hacia el final del periodo de exposición. Esto sugiere que el comportamiento de la corrosión en las muestras sin goma xantana es más pronunciado, probablemente debido a la falta de barrera química que ofreció la goma xantana en las demás muestras.

Al finalizar el experimento, las muestras con 0% y 0.3% de goma xantana se ubicaron en la zona de 90% de probabilidad de corrosión, lo que confirma que la adición de goma

xantana, mejora la trabajabilidad del concreto y previene la corrosión en ambientes expuestos a cloruros.

Tabla 3. Potenciales de corrosión para los distintos sistemas con goma de Xantana.
Fuente: elaboración propia.

Días	Sistema de concreto con goma Xantana			
	0.7 %	0.5 %	0.3 %	0 %
1	-180.5	-162.4	-159.7	-151.3
4	-248.7	-261.9	-268.4	-276.6
8	-270.3	-312.5	-331.2	-347.1
12	-279.6	-334.6	-359.5	-387.4
15	-289.2	-342.1	-377.3	-409.3
19	-282.1	-338.9	-373	-421.8
21	-288.8	-328.7	-367.9	-398.2
25	-297.3	-319.4	-365.2	-411.7
27	-292.4	-312	-368	-423.6
30	-281.9	-310.3	-371.4	-432.1
33	-280.7	-309.7	-380.2	-442.5
36	-287.5	-310	-389.6	-453
40	-282.2	-308.8	-398.7	-471.2



Fig. 13. Mediciones de prueba de media celda. Fuente: elaboración propia.

Si bien no se realiza un seguimiento a largo plazo, los resultados obtenidos permiten establecer tendencias y comparaciones significativas respecto al desempeño inicial del material.

Esta investigación representa una aportación relevante al campo de la tecnología del concreto, al explorar el uso de aditivos naturales en sustitución de los superplastificantes sintéticos. Además, promueve el aprovechamiento de recursos locales, impulsa la innovación en el diseño de mezclas y fomenta una perspectiva de sostenibilidad en la selección de materiales para la construcción de estructuras expuestas a condiciones agresivas.

En mezclas modificadas con aditivos, se constató que una menor relación a/c contribuye a una mayor densidad de la matriz del concreto y a menor permeabilidad, lo cual favorece la durabilidad (Huang et al., 2024).

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el desempeño mecánico y la durabilidad frente a ambientes agresivos de mezclas de concreto modificadas con goma xantana, utilizada como un aditivo natural con propiedades reológicas beneficiosas. Los resultados obtenidos demostraron que este biopolímero, en concentraciones adecuadas, puede mejorar significativamente la resistencia del concreto, así como reducir la probabilidad de corrosión en el refuerzo embebido.

En lo relativo a la resistencia a la compresión y tracción indirecta, se observó que el sistema con una concentración de 0.5 por ciento de goma xantana presentó el mejor desempeño mecánico, seguido del sistema con 0.3 por ciento. Esto sugiere que la adición moderada del aditivo favorece una mejor compactación y homogeneidad de la mezcla, posiblemente por una optimización en la retención de agua y en la distribución de los finos durante el mezclado y curado. Por el contrario, la concentración de 0.7 por ciento mostró una ligera disminución en la resistencia mecánica, lo cual podría asociarse a una sobredosificación que afecta negativamente la trabajabilidad y la microestructura del concreto.

En cuanto a la evaluación de la durabilidad, los resultados de potenciales de media celda bajo exposición a una solución salina de 3.5 por ciento de cloruro de sodio durante 40 días, indicaron que los sistemas con 0.5 y 0.7 por ciento de goma xantana presentaron los valores menos negativos, lo que se interpreta como una menor probabilidad de corrosión activa en el acero de refuerzo. Por el contrario, el sistema sin aditivo (control) mostró potenciales más negativos que el umbral crítico de -350 milivoltios, indicando una alta probabilidad de corrosión. Este comportamiento sugiere que el aditivo, además de mejorar las propiedades mecánicas, también puede generar un efecto barrera al ingreso de agentes agresivos, posiblemente por una microestructura más densa o una reducción en la conectividad de los poros capilares.

Desde una perspectiva ambiental, la utilización de goma xantana obtenida a partir de jarabe de agave representa una alternativa sostenible al uso de aditivos sintéticos, alineándose con los principios de economía circular y aprovechamiento de subproductos

agrícolas. Este aspecto es especialmente relevante en contextos donde se busca reducir la huella ambiental de la construcción sin comprometer el desempeño estructural.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Una de las principales limitaciones de este trabajo es que los ensayos de durabilidad mediante potenciales de media celda se realizaron durante un periodo relativamente corto de 40 días bajo exposición acelerada, por lo que no pueden predecir con certeza el comportamiento del sistema a largo plazo en condiciones reales. Asimismo, no se consideraron otras variables que pueden incidir en la durabilidad, como la profundidad de penetración de cloruros, el contenido de humedad interna o el grado de carbonatación.

Otra limitación fue el uso de un solo diseño de mezcla con resistencia nominal de $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$, lo cual restringe la extrapolación de resultados a concretos con diferentes resistencias, tipos de cemento o características de los agregados. Tampoco se evaluaron propiedades adicionales como la retracción, la fluencia o el módulo de elasticidad, que también son importantes para aplicaciones estructurales.

La goma xantana utilizada fue obtenida a nivel experimental, por lo que su grado de pureza y comportamiento puede variar respecto a productos comerciales o de diferente origen, afectando la reproducibilidad de los resultados en otros entornos.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Para fortalecer la comprensión del efecto de la goma xantana en el concreto, se recomienda ampliar el periodo de monitoreo de los potenciales de media celda a noventa días o más, y complementar con otras técnicas que permitan caracterizar con mayor profundidad el nivel de corrosión, como la medición de perfiles de cloruros, la espectroscopía de impedancia electroquímica o el análisis de pérdida de masa del refuerzo.

También se sugiere explorar la influencia de este aditivo en concretos con diferentes tipos de cemento, relaciones agua-cemento, agregados reciclados y condiciones de curado, así como evaluar su impacto sobre otras propiedades como la retracción por secado, el sangrado, la permeabilidad y el comportamiento ante ciclos de congelamiento y deshielo.

Por último, sería conveniente realizar estudios de aplicación en condiciones reales de obra, donde se evalúe el comportamiento del concreto con goma xantana en elementos estructurales sometidos a ambientes marinos, urbanos o industriales, con monitoreo prolongado del desempeño mecánico y de la durabilidad frente a agentes agresivos.

REFERENCIAS

ACI Committee 222. (2010). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-01). American Concrete Institute.

Akduman, M. M., & Ünal, M. (2025). Effect of chloride ingress and environmental conditions on the corrosion of reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 421, 141893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.141893>

Akduman, S. (2025). A parametric study on determining the corrosion initiation and propagation in reinforced concrete structures. *Buildings*, 15(5), 666. <https://doi.org/10.3390/buildings15050666>

Andrade, C., & Alonso, C. (2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37(273), 623–643.

Baldovino, J. A., García-Ruiz, D. M., Iatridis, D. K., Pando, M. A., & Baena, M. (2025). Sustainable stabilization of soil–RAP mixtures using xanthan gum. *Sustainability*, 17(10), 4601. <https://doi.org/10.3390/su17104601>

Baldovino, L. G., Arévalo, M. T., & Fajardo, F. (2025). Valorization of agro-industrial waste for biopolymer production: A circular approach. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140942. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140942>

Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2020). Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30147-4>

Boutouam, F., Amziane, S., & Damidot, D. (2024). Use of biopolymers in construction: A review of applications in concrete and cement-based composites. *Journal of Building Engineering*, 83, 107092. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107092>

Boutouam, Y., Hayek, M., Bouarab, K., & Yahia, A. (2024). A comprehensive review of plant-based biopolymers as viscosity-modifying admixtures. *Applied Sciences*, 14(10), 4307. <https://doi.org/10.3390/app14104307>

-
- Chavarría, E., Durán-Herrera, A., & Juárez, C. A. (2018). Influence of xanthan gum on the mechanical properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.068>
- Chavarría, I., López, R., & Rodríguez, L. (2018). Use of natural superplasticizers for improving workability and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 167, 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.068>
- Dvorkin, L. (2023). Influence of polymer superplasticizers on concrete properties. *Materials*, 16(5), 2075. <https://doi.org/10.3390/ma16052075>
- Dvorkin, L., Bordiuzhenko, O., & Marchuk, V. (2023). Influence of superplasticizer type and content on the durability of high-performance concrete. *Materials Science Forum*, 1065, 95-100. <https://doi.org/10.4028/p-zt4dqq>
- Ghosh, J., & Padgett, J. E. (2014). Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility curves for bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(12), 1435-1449. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.833944>
- Guo, R., Zhang, Q., Wang, Z., Tayebi, M., & Hamawandi, B. (2022). The effect of eco-friendly inhibitors on the corrosion properties of steel reinforcement. *Materials*, 15(14), 4746. <https://doi.org/10.3390/ma15144746>
- He, D. (2025). Review of corrosion evaluation methods for steel reinforcement. *Journal of Composites Science*, 6(3), 37. <https://doi.org/10.3390/jcs6030037>
- Huang, H., Li, Z., & Zhang, Z. (2018). Effect of guar gum on the properties of fresh and hardened concrete. *Construction and Building Materials*, 159, 601–608. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.135>
- Judžentienė, A. (2024). Evaluation of physico-chemical characteristics of cementitious materials with various admixtures. *Materials*, 17(9), 1940. <https://doi.org/10.3390/ma17091940>

Judžentienė, A., & Zubrickaitė, I. (2024). Natural polysaccharides in the production of sustainable construction materials: A comparative study. *Journal of Natural Fibers*, 21(3), 515–530. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2232214>

Khatri, A., Prasad, S., & Rao, S. (2021). Natural admixtures for enhancing the corrosion resistance of reinforced concrete structures. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00650. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00650>

Kumar, R., & Kumar, S. (2019). Guar gum as a superplasticizer for concrete mixtures: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(33), 48055. <https://doi.org/10.1002/app.48055>

Li, C., & Li, Y. (2020). Corrosion of reinforcement in concrete: Causes, mechanisms, and control. *Construction and Building Materials*, 252, 119034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119034>

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2017). *Concrete* (2nd ed.). Pearson.

Muthu, M., Ganesan, K., & Ramachandran, T. (2024). Impact of guar and xanthan gum on rheological and mechanical properties of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 86, 258-265. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.012>

Muthu, M., Muthu, T., & Arockia, A. (2024). Impact of superplasticizers in low-grade limestone cement mixes. *Materials*, 17(11), 2500. <https://doi.org/10.3390/ma17112500>

Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology* (2nd ed.). Prentice Hall.

Palumbo, G., Święch, D., & Górny, M. (2023). Guar gum as eco-friendly corrosion inhibitor for steel in aggressive environments. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15), 12269. <https://doi.org/10.3390/ijms241512269>

Palumbo, M., Blanco, A., & Navarro, R. (2023). Influence of biopolymers on durability performance of cementitious materials in aggressive environments. *Cement and Concrete Composites*, 144, 105585. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105585>

Pérez, R., Sánchez, A., & Martínez, J. (2020). Electrochemical techniques for assessing corrosion resistance of concrete: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 261, 120037. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120037>

Silva, A. R., Sáez, A., & de Brito, J. (2021). Biopolymers as sustainable additives for concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 276, 122166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122166>

Wang, P., & Li, L. (2022). Development of green concrete incorporating natural gums: Influence on fresh and hardened properties. *Journal of Building Engineering*, 45, 103524. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103524>

Yang, L. (2024). Cumulative strain and improvement mechanisms of soil stabilized with xanthan gum. *Polymers*, 16(24), 3500. <https://doi.org/10.3390/polym16243500>

Yang, Y., Wang, X., & Li, Y. (2024). Application of agro-waste-derived xanthan gum as eco-friendly concrete additive. *Sustainable Materials and Technologies*, 35, e00708. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00708>

Zhang, Q., Liu, Y., & Wu, W. (2019). Production of xanthan gum using alternative substrates: A review. *Biotechnology Advances*, 37(8), 107449. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107449>

Zhang, Y., Li, Z., & Zhang, Y. (2019). Durability and performance of concrete incorporating natural superplasticizers: A study under chloride-induced corrosion. *Journal of Cleaner Production*, 227, 834–845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.046>

Zhao, Z., Shi, C., Li, C., & Wang, D. (2021). Effect of pore structure on chloride ion transport in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 272, 121942. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121942>

Zomorodian, A. (2023). Long-term corrosion monitoring of reinforced concrete: A review of electrochemical methods. *Corrosion Science*, 210, 110908. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110908>

Zomorodian, A. (2023). Review of corrosion inhibitors in reinforced concrete exposed to chloride environment. *Buildings*, 13(5), 1170. <https://doi.org/10.3390/buildings13051170>