



## Reinforced Concrete Under Threat: A Review of Structural Pathologies and Advanced Intervention Methods

Concreto reforzado bajo ataque: revisión de patologías estructurales y métodos de intervención avanzada

Dayana Josefa Ortiz-Campo<sup>1</sup>, Jarol Derley Ramón-Valencia<sup>2</sup>, Carlos Alexis Bonilla-Granados<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Esp. en Sistemas Integrados de Gestión, [dayana.ortiz@unipamplona.edu.co](mailto:dayana.ortiz@unipamplona.edu.co), <https://orcid.org/0009-0002-6668-0996>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

<sup>2</sup>PhD. en Ingeniería ambiental, [jarol.ramon@unipamplona.edu.co](mailto:jarol.ramon@unipamplona.edu.co), <https://orcid.org/0000-0002-2030-4904>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

<sup>3</sup>MSc. en Tecnologías para el manejo de aguas y residuos, [carlos.bonilla@unipamplona.edu.co](mailto:carlos.bonilla@unipamplona.edu.co), <https://orcid.org/0000-0002-4558-4615>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

**Cómo citar:** D. J. Ortiz-Campo, J. D. Ramón-Valencia, y C. A. Bonilla-Granados, "Concreto reforzado bajo ataque: revisión de patologías estructurales y métodos de intervención avanzada", *Respuestas*, vol. 30, n.º 2, pp. 6-22, abr. 2025. <https://doi.org/10.22463/0122820X.5093>

Received on February 05, 2025 - Approved on April 21, 2025.

### ABSTRACT

#### Keywords:

Concrete pathologies, Steel corrosion, Structural diagnosis, Structural rehabilitation, Advanced materials

Reinforced concrete structures, essential to modern infrastructure, are subject to progressive deterioration caused by various pathologies that compromise their structural integrity, functionality, and service life. These alterations—driven by physical, chemical, and biological processes—include chloride ingress, concrete carbonation and subsequent steel corrosion, alkali-aggregate reactions, thermal effects, and bacterial-induced degradation. This article presents a comprehensive review of current scientific and technical knowledge aimed at understanding the most critical damage mechanisms and exploring tools for early-stage diagnosis and characterization. Drawing from specialized databases and peer-reviewed international journals, recent developments are highlighted, including predictive computational simulations and the design of materials with self-diagnostic and self-healing capabilities. Finally, current intervention methods are addressed, including protective coatings, chemical inhibitors, and bioconcrete rehabilitation techniques. These innovative approaches aim to extend the lifespan of existing structures and ensure their safety. Accurate identification of pathologies and the appropriate selection of treatment techniques are essential for establishing efficient and sustainable strategies for preserving built infrastructure.

### RESUMEN

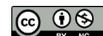
#### Palabras clave:

Patologías del concreto, Corrosión del acero, Diagnóstico estructural, Rehabilitación de estructuras, Materiales avanzados.

Las estructuras de concreto reforzado, fundamentales en la infraestructura moderna, enfrentan un deterioro progresivo provocado por diversas patologías que comprometen su integridad estructural, funcionalidad y vida útil. Estas alteraciones, derivadas de procesos fisicoquímicos y biológicos, incluyen la penetración de cloruros, la carbonatación del concreto y la consecuente corrosión del acero, la reacción álcali-agregado, los efectos térmicos y el biodeterioro bacteriano. Este artículo presenta una revisión del conocimiento técnico y científico disponible, con el fin de comprender los mecanismos de daño más relevantes y explorar herramientas de diagnóstico y caracterización en etapas tempranas del deterioro. A partir del análisis de literatura especializada y artículos indexados de alcance internacional, se identificaron avances recientes en la predicción de fallas estructurales mediante simulaciones computacionales, así como en el desarrollo de materiales con capacidades autodiagnósticas y de autorreparación. Finalmente, se discuten métodos actuales de intervención, como recubrimientos protectores, inhibidores químicos y técnicas con bioconcreto. Estas soluciones innovadoras buscan prolongar la vida útil de las estructuras existentes y asegurar su seguridad. La identificación precisa de patologías y la selección adecuada de métodos de tratamiento permiten establecer estrategias sostenibles y eficientes para la conservación del patrimonio construido.

\*Corresponding author.

E-mail Address: [carlos.bonilla@unipamplona.edu.co](mailto:carlos.bonilla@unipamplona.edu.co) (Carlos Alexis Bonilla-Granados)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.  
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

## Introducción

Las estructuras de concreto reforzado a menudo están expuestas a patógenos que reducen su capacidad mecánica y su durabilidad. La seguridad de una estructura se pone en riesgo, dado que pueden presentar defectos o daños por patologías congénitas, contraídas o accidentales. El proceso patológico se compone de tres etapas, como lo son el origen, la evolución y la parte final [1]. Algunos de los factores identificados que se involucran en el origen de las patologías son los agentes atmosféricos, mecánicos, químicos, elección de material, la falta de mantenimiento, entre otros [2].

Las patologías estructurales pueden originarse durante la construcción, como por ejemplo el caso de una piscina no impermeabilizada, donde el concreto puede experimentar una reacción álcali debido al alto contenido de humedad provocado por la infiltración del agua en el material. El concreto de una piscina no impermeabilizada que exhibe una reacción álcali, combinado con el hipoclorito de sodio (NaCl) presente en el agua, puede acelerar la formación de una reacción álcali-sílice (ASR) [3].

La presencia de manchas, cambios de color, fisuras y pérdida de masa en el material son algunos de los síntomas más comunes de las patologías del concreto [4]. La detección temprana de las patologías en el concreto puede permitir que se mitiguen y, a su vez, prevengan mayores pérdidas económicas asociadas a reparaciones y reconstrucciones [5]. El continuo crecimiento del sector de la construcción demanda materiales con mayor resistencia, por lo cual se han desarrollado nuevos materiales cementantes para mejorar las propiedades del concreto [6].

El presente artículo tiene como objetivo revisar el estado de conocimiento de las patologías en el concreto reforzado, para identificar las posibles causas de alteración, así como los métodos y técnicas de diagnóstico. Se sintetizan las diferentes metodologías o tratamientos de prevención y rehabilitación, con un enfoque en las patologías ocasionadas por entrada de cloruros, corrosión del acero debido a la carbonatación del concreto, degradación del concreto por acción bacteriana, reacción álcali-agregado en el concreto reforzado, así como, por cambios físicos y mecánicos por efecto de temperatura.

## Materiales y Métodos

La búsqueda de información se realizó en bases de datos de revistas científicas especializadas como Scopus, Science Direct, Springer Link, y Scielo, asegurando una cobertura amplia y actualizada de la literatura científica. Además, se consideraron tesis de nivel de pregrado y posgrado. Se ingresaron en los buscadores, palabras clave como “concreto reforzado”, “patologías de los concretos”, “reaccion Alkali”, “daños por temperatura”, “cloruros”, “carbonatación” y “acción bacteriana”, tanto en el idioma español como en inglés.

La revisión realizada evidenció que la mayor proporción de literatura consultada se enfocaba en las patologías originadas por cambios de temperatura (33,9 %), como se observa en la Figura 1a, la cual presenta la distribución porcentual de los artículos seleccionados según el tipo de patología. Por otro lado, este trabajo pone especial énfasis en la revisión de estudios realizados en Colombia (12,5 %), motivo por el cual en la Figura 1b se destaca que el mayor porcentaje de estudios analizados proviene de dicho país. El enfoque en estudios realizados en Colombia responde al interés por contextualizar las patologías del concreto bajo condiciones climáticas, constructivas y normativas propias del país, con el fin de aportar insumos útiles para la ingeniería local.

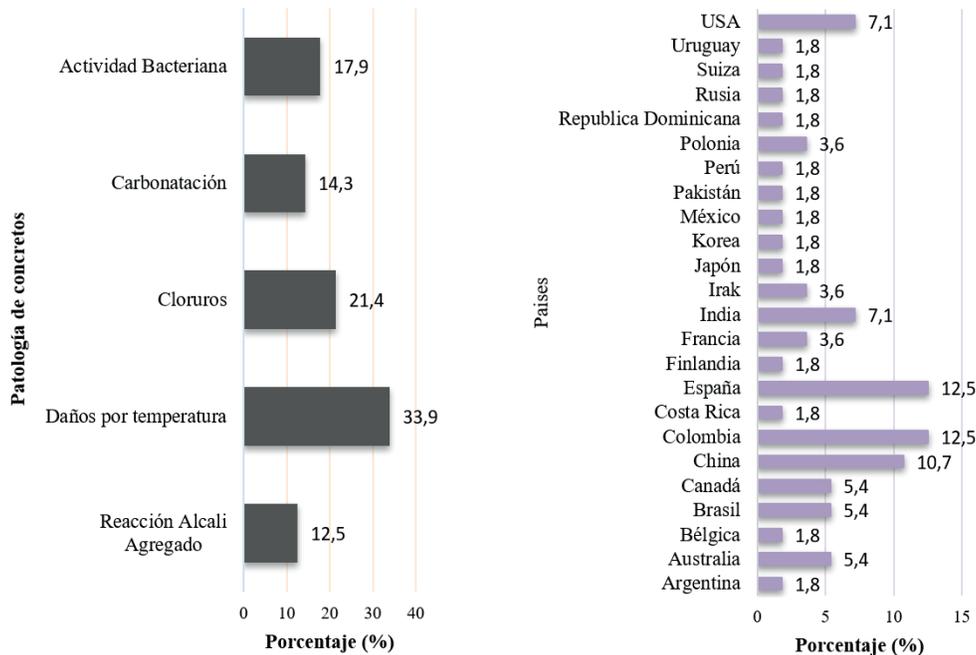


Figura 1. Gráficos de porcentajes de a) composición de la muestra de los artículos revisados relacionados por patología, y b) composición de la muestra de los artículos revisados por países.

## Resultados y Discusión

### *Causas de las patologías en el concreto reforzado*

Corrosión del acero por entrada de cloruros. La corrosión de un material ocurre cuando la concentración de cloruro alcanza un límite umbral en la superficie del refuerzo que produce despasivación. Esta entrada de sales a través del concreto depende tanto de su porosidad como de las condiciones ambientales al que está expuesto [7]. Esto reduce el diámetro inicial de los poros y la capacidad mecánica de la barra de refuerzo, provocando fisuras y desprendimientos en el concreto al generarse acumulación de productos de expansión en la interfaz acero-concreto afectando la adherencia del concreto al refuerzo [8].

El concreto producido adecuadamente genera protección al acero de la penetración de cloruros, no obstante, los elementos de concreto sumergidos en el mar, son muy susceptibles a grietas. Esto es debido a la fuerza hidrostática y demás causas de deterioro, afectando negativamente la durabilidad de los elementos, siendo un fácil acceso a agentes agresivos, especialmente a iones de cloruro [9].

El valor estimado de autocuración en grietas externas se ha estimado de 70  $\mu\text{m}$ . En la superficie interna las grietas que se forman son paralelas debido a las capas de mortero y pasta de cemento (generadas por el proceso de centrifugado en la elaboración del pilote) que se fracturan con mayor facilidad y, por tanto, no hay un valor crítico para la autocuración [10].

Corrosión inducida por carbonatación. El proceso de carbonatación es un proceso más lento en comparación con la corrosión inducida por cloruro. Una alta relación de agua-cemento, bajo contenido de cemento, corto periodo de curado, menor resistencia y concreto poroso, son los factores que aumentan la tasa de

carbonatación. Además, las altas tasas de carbonatación ocurren cuando la humedad relativa del concreto oscila entre 50 % y 75 % [11]. Asimismo, la ausencia de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) significa reducción en la alcalinidad del concreto y, por lo tanto, el bajo valor de pH constituye al ataque del carbonato. El acceso a largo plazo del dióxido de carbono causa que la etringita ( $\text{Ca}_6\text{A}_{12}(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) se vuelva inestable y favorezca la carbonatación, acelerando el proceso de deterioro, produciendo la pérdida de dureza y resistencia del concreto. En estructuras expuestas al Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico y al agua de lluvia durante mucho tiempo, es susceptible el agrietamiento y ataque por carbonato, formando en el interior de las grietas cristales de calcita. Sin embargo, la precipitación de calcita posibilita la autocuración de grietas, pero el pH del mineral debe ser superior a 11,8, para que el acero de refuerzo se encuentre pasivado [12].

Degradación del concreto por acción bacteriana. El mecanismo de deterioro del concreto por microorganismo se da por deterioro físico, estético y químico, los factores que influyen son la alcalinidad del concreto, la humedad relativa, la temperatura, las propiedades del material, alta concentración de  $\text{CO}_2$ , iones de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) u otras sales. [13], [14]. La acción de los microorganismos afecta la durabilidad del concreto, aumentando costos de mantenimiento y reduciendo la capacidad de los elementos estructurales a largo plazo. Esta patología, principalmente se ha detectado en sistemas de alcantarillado, tuberías submarinas, muelles de puentes, oleoductos, gasoductos y plataformas marinas [13]. El biodeterioro (BD) es poco relevante en análisis estructurales debido a su lenta cinemática, además de que rara vez es la causa directa de la falla en la estructura [13].

En infraestructura hidráulica para agua residual, las bacterias atacan el concreto, generando una capa gelatinosa en la parte seca del tubo, lo cual es causado por el Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) que disuelve el concreto [15]. El biodeterioro por bacterias oxidantes de azufre (SOB) en el mortero de cemento inoculado con cultivos puros de bacterias *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Halothiobacillus neapolitanus*, y un consorcio de ambas cepas, se expusieron a entornos ricos en Ácido Sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), causando cambios físicos y mecánicos en la estructura (Tabla I) [16].

Tabla I. Biodeterioro de mortero expuesto a entornos con ácido sulfhídrico.

Propiedad	Efecto del $\text{H}_2\text{S}$
Observaciones cualitativas	Manchas de diferentes colores, tonos grises, verdes, bronce y blancos. cristales de etringita
Variación de peso	Pérdida de peso del peso inicial. consorcio $6,8 \pm 1,4$ % A. thiooxidans $4,6 \pm 1,4$ % H. neapolitanus $2,4 \pm 0,5$ %
Variación de porosidad	Aumento de la porosidad Consorcio 25 % A. thiooxidans 27 % H. neapolitanus 22 %
Variación de resistencia a la compresión	Reducción de la resistencia Consorcio 52 % A. thiooxidans 28 % H. neapolitanus 28%

**Reacción Álcali – agregado en el concreto.** La reactividad Álcali Agregado (RAA) es un fenómeno que puede presentarse en el concreto desde su fabricación. La causa de esta patología consiste en una reacción química entre algunos compuestos de los agregados, los álcalis del cemento como Óxido de Sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y Óxido de Potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), las alteraciones de la temperatura y la humedad en el material. Esta reacción genera un gel expansivo que agrieta y finalmente destruye el concreto, por lo cual se cataloga a esta patología como

uno de los más serios problemas en el concreto [17]. la temperatura es un factor que influye en la cinética de la reacción, a temperaturas elevadas se induce una reacción más rápida [18].

Las reacciones expansivas son un fenómeno común en las obras hidráulicas, la presencia de ettringita se asocia al ISA (ataque interno de sulfato) y el gel expansivo al RAA. Con ambas reacciones conjuntas, predomina la de mayor deformación, la otra solo llenara los vacíos y grietas causados por la reactividad predominante [19]. En un caso particular, en un reservorio de aguas residuales, con presencia de fugas y agrietamiento severo, su deterioro se le atribuyó a la inadecuada selección de los agregados ocasionando la reacción del agregado alcalino. Generalmente, el deterioro del concreto por esta patología es lento, incluso, el tiempo que tarda en desarrollarse en el material es de hasta un tiempo superior a 5 o 10 años, en presencia de cuarzo en las fisuraciones [20].

***Cambios físicos y mecánicos por efecto de temperatura.*** Las patologías generadas en el concreto por cambios de temperatura obedecen a acciones físicas que afectan las propiedades mecánicas del concreto. Éstas son causadas por dilatación y contracción, exposición al fuego y ciclos de congelación–descongelación [20], [21], [22]. La dilatación térmica es provocada por aumento de temperatura en un elemento estructural con respecto a otro que se encuentra unido. Por otra parte, la contracción en el concreto crea tensiones debido a la restricción de la sección interior más caliente que la superficie exterior, estas tensiones en edad temprana generan fisuras en la superficie del elemento [22], [23], [24].

El concreto posee características propias resistentes al fuego, sin embargo, expuesto a altas temperaturas se genera la degradación de las propiedades de los materiales y desprendimientos [25]. El concreto reforzado es un material heterogéneo y los componentes no reaccionan de igual forma ante la exposición a altas temperaturas. La alteración del elemento depende del nivel de temperatura alcanzado, la composición del concreto y el tiempo de exposición [26]. A altas temperaturas el acero pierde más capacidad que el concreto. En el momento que el concreto alcanza el 35 % de pérdida de resistencia, el acero pretensado puede llegar a pérdidas de capacidad entre 60 y 70 % [27]. La exposición a altas temperaturas por incidencia de calor ocasiona cambio de color y grietas finas en la superficie del concreto, y con flujo de calor constante puede brotar agua del concreto [25].

Las estructuras expuestas a heladas disminuyen la vida útil del material, mientras las grietas originadas aceleran otros problemas relacionados con la durabilidad [28]. El deterioro en el concreto reforzado a causa de la congelación y descongelación cíclica, se debe a la condición porosa del material de concreto. La microestructura del concreto es capaz de absorber y retener agua. El agua existente en el sistema de poros se congela, aumentando un 9% su volumen inicial, provocando tensión dentro del concreto, por consiguiente, formando microgrietas que luego absorberán más agua durante la descongelación, lo cual causa una mayor expansión y más grietas en los siguientes ciclos de congelación-descongelación [29]. Sin embargo, este efecto se ve reducido en el concreto pretensado, el comportamiento del concreto reforzado y pretensado muestran modos de fallas diferentes, debido a los estados de tensión. En el concreto pretensado se presentan menos facturas, puesto que la tensión introducida por las fuerzas externas se superpone a la tensión de tracción inducida por la congelación [29].

## ***Técnicas y procedimiento para el diagnóstico de las patologías***

***Identificación de la corrosión en el acero de refuerzo.*** Las patologías en el concreto reforzado son un problema relevante para la seguridad de la estructura. La corrosión del acero del concreto es uno de los problemas, el cual se produce por una reacción espontánea [30], y su presencia en el material se puede detectar a través de algunas técnicas, como se explica a continuación.

***Técnicas de monitoreo.*** Los sistemas de monitoreo proporcionan una detección temprana de la corrosión y el oportuno mantenimiento o rehabilitación de las estructuras de concreto reforzado. Al monitorear la corrosión en concreto reforzado por medio de emisión acústica (AE), se detecta efectivamente la corrosión que ocurre en tiempo real en la estructura [31]. La combinación de esta técnica con el monitoreo basado en ondas guiadas ultrasónicas activas (UGW), puede localizar eficientemente las diferentes etapas de la corrosión: el inicio, la propagación y la etapa final de fractura del concreto [32]. Otra técnica que se ha desarrollado es el potencial de media celda, generalmente usada para detectar la corrosión a través de la medición de cambios electroquímicos, no obstante, esta técnica en desventaja frente a la combinación de las técnicas UGW y AE [32].

En el monitoreo UGW consiste en que la onda transmitida cambia la intensidad de la señal debido a la corrosión, cuando se presentan discontinuidades o picaduras en la barra de refuerzo. El monitoreo UGW capta indirectamente el fenómeno de la corrosión, pero no indica el efecto de la corrosión de las barras de refuerzo en el concreto circundante, en términos de micro a macro agrietamiento debido a la corrosión [30], [32]. El monitoreo AE involucra el uso de sensores en la estructura sin excitación externa y detecta los cambios dentro de la estructura con la progresión del daño, los impactos acumulativos de AE, la fuerza de señal acumulada y las parcelas de eventos (mapas de eventos para niveles de corrosión). La técnica AE ayuda a comprender el mecanismo y el efecto de la corrosión. [32].

***Sensores para identificar la corrosión en barras de acero.*** Para ubicar el refuerzo y medir el espesor de los elementos, el radar de penetración terrestre (GPR) tiene ventajas, en cuanto a que integra un medidor de cobertura, por su rapidez de medición y por permitir cubrir grandes superficies en menos tiempo. La principal desventaja de GPR es la dificultad de evaluar con precisión la profundidad del refuerzo y calibración [33].

En la última década se ha optado por métodos no destructivos que utilizan mecanismos con sensores. La técnica de impedancia electromagnética, involucran sensores piezoeléctricos de titanato de circonato de plomo (PZT) para estimar la corrosión por medio de parámetros ESP (parámetro de rigidez equivalente) y EMP (parámetro de masa equivalente). Los parámetros indican los cambios que ocurren durante el proceso de carbonatación e indican la fase de propagación de la corrosión [11]. Otra técnica requiere de sensores inalámbricos para monitorear la corrosión del refuerzo en tiempo real, basados en radiofrecuencia, estando libres de una fuente de alimentación interna transmiten la señal de corrosión del refuerzo de adentro hacia afuera [34].

***Estudios electroquímicos.*** El estudio electroquímico se usa para evaluar la corrosión del acero en el concreto y se basa en tres técnicas, la resistencia lineal a la polarización (LPR), el potencial de corrosión (Ecorr) y la técnica de pulso galvanostático [35]. En un ejemplo de la aplicación a concretos de activación alcalina (AAS), se empleó como material cementante para evaluar el efecto de las tres técnicas, se encontró que, éstas tienen un tiempo de exposición significativo, así como, las interacciones relacionadas con el

cementante y las condiciones ambientales. En términos generales los concretos con activación alcalina con refuerzo presentan una menor actividad de corrosión [35].

En comparación de efectividad de varios métodos no destructivos para detectar la corrosión de concreto, se destaca la técnica de potencial de media celda (HCP) debido a que sus resultados son más precisos para la detección de cloruros [36]. Entre las otras técnicas como de radar de penetración terrestre (GPR), termografía infrarroja, (IRT) resistividad eléctrica (ER) y velocidad de pulso ultrasónico (UPV), las cuales están en desventaja frente a la combinación de las técnicas UGW y AE [32].

**Análisis de propiedades mecánicas.** Normalmente los métodos de evaluación de las propiedades mecánicas del concreto después de sufrir alguna patología consisten en métodos destructivos. En estructuras post-incendio es común su aplicación, después de la inspección visual, se extraen núcleos de concreto y probetas del acero de refuerzo de las estructuras, para identificar las propiedades mecánicas del concreto y del acero. Los ensayos destructivos agregan mayor desestabilidad al elemento estructural en estudio [37].

Un método eficiente capaz de evaluar el daño en estructuras de concreto reforzado expuestas a altas temperaturas sin adicionar más daño a ésta, consiste en realizar análisis micromecánico del concreto y del acero de refuerzo por medio de “indentación” de micro muestras expuestas a altas temperaturas. A partir de las propiedades micromecánicas se obtienen las propiedades macroescalares usando una técnica autoconsistente o de homogenización de datos [38].

**Ensayos para la reactividad de los agregados.** Se ha desarrollado una metodología mediante la modificación del ensayo ASTM C1260, para determinar experimentalmente la reacción álcali sílice en agregados reactivos (F) y no reactivos (G) [39]. Los investigadores Rathod y Gupta, en el desarrollo de la metodología introdujeron álcalis ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) utilizando la conducción iónica en la solución de poros de las probetas de la ASTM C1260. En el estudio se concluyó que la alta temperatura es más eficiente que la electroquímica a la hora de introducir álcalis dentro de las muestras [39].

Los desechos de una estructura original se pueden usar como agregado de concreto reciclado (RCA) para construir nuevas estructuras. La efectividad de la prueba acelerada de barra de mortero (AMBT) y la prueba de microbarras de concreto (CMBT) sirven evaluar la reactividad de álcali sílice de los agregados de concreto reciclado (RCA). Los resultados de la prueba CMBT, mostraron una ventaja importante sobre AMBT ya que este último no es capaz de evaluar la reactividad de algunos tipos de areniscas como Potsdam. También, se observó que la reactividad de algunos RCA puede alcanzar la del agregado original utilizado en el hormigón viejo [7].

**Modelos de elementos finitos y matemáticos.** Recientemente se han desarrollado modelos matemáticos con el objetivo de detectar anticipadamente la patología en las estructuras. Se ha podido determinar que un meta-modelo de uso eficiente y sencillo, para calcular la profundidad del frente de carbonatación dentro de las estructuras de concreto. Este meta-modelo desarrollado tiene en cuenta varios parámetros tanto del material, tecnológicos y ambientales y está basado en la solución analítica de la primera ley de Fick [40].

Adicionalmente, se estudió un modelo para detectar carbonatación en el concreto, el cual se fundamenta en un algoritmo de procesamiento de imágenes que detecta regiones de carbonatación en el concreto reforzado

rociado con fenolftaleína. Para este último modelo se identificó que puede proporcionar resultados erróneos, en casos donde los agregados con color similar a la pasta de cemento se encuentren en el límite entre una región carbonatada y una región no carbonatada asumiéndolos como área carbonatada [41]. Para el efecto de las heladas en el concreto reforzado el modelo de zona cohesiva combinado con imágenes de CT (tomografía computarizada) de rayos x y simulación a microescala es eficiente para caracterizar y pronosticar el efecto del daño microestructural producido por acciones cíclicas de congelación-descongelación en el concreto [42].

A diferencia a la simulación anterior, un modelo incluye en el sistema de simulación de elementos finitos, modelos termodinámicos y modelos poro-mecánicos. El modelo es capaz de simular el mecanismo del material y la afectación a la mecánica de la estructura a macro escala. También, la simulación puede utilizarse en diferentes concretos reforzados con diferentes tamaños, formas y condiciones ambientales, incluyendo carga cíclica horizontal para simular el comportamiento sísmico de columnas afectadas por congelación y descongelación, así como para caracterizar las fuerzas de restauración de las columnas de concreto reforzado [28]. Un modelo numérico arroja resultados confiables para un efecto de reactividad álcali-agregado, usando elementos finitos 3D para estudiar la estructura completa, y un modelo 2D para un área en específica, el desplazamiento producido por el modelo alcanzó valores cercanos a los desplazamientos reales y los valores generados por el modelo son consistentes con los desplazamientos verticales [19].

***Espectroscopía infrarroja.*** La técnica espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) logra identificar satisfactoriamente la degradación del concreto, considerándose como un método preciso, rápido y económico para investigar el ataque de sulfato [43]. El fundamento de la espectroscopía es la absorción de la radiación infrarroja por las moléculas. Cuando las moléculas se activan por la vibración a causa de la energía recibida, éstas empiezan a absorber una determinada longitud de onda que corresponden al espectro electromagnético del infrarrojo. Es así, por medio de análisis de las longitudes de ondas absorbidas por el material, se detectan las moléculas presentes [44].

### ***Prevención, rehabilitación y mantenimiento***

***Aglutinantes minerales en el concreto reforzado.*** En los últimos años se ha avanzado en el estudio de aglutinantes minerales mezclados con cemento, debido a las sinergias encontradas que favorecen la hidratación, así como, las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. En la Tabla II se presentan alternativas de concreto con aditivos minerales para disminuir el efecto de los patógenos.

Tabla II. Adición de minerales en el concreto.

Método	Material de adición	Observación
Concreto para inhibir la entrada de cloruros	Ceniza volante	Las mezclas de cemento con ceniza volante y escoria son eficaces como métodos de mitigación de corrosión del acero, sus altas capacidades de unión dan concentraciones de superficie más altas, y reduce la concentración de cloruro libre cerca del acero de refuerzo [7].
	Humo de sílice	El rendimiento del humo de sílice es similar al del OPC en los coeficientes de difusión y ligeramente menores en las tasas de corrosión, calculados en la prueba de perfil de cloruro [7].
	concreto ternario SL (64% cemento, 6% piedra caliza y 30% escoria de alto horno)	Una barra de acero con recubrimiento de zinc de $229 \pm 37 \mu\text{m}$ de espesor incrustada en concreto OPC (100% cemento) y en concreto ternario SL. El concreto ternario retrasa la entrada de cloruros, pero la zona de transición interfacial es más débil por consiguiente mayores pérdidas del revestimiento, aun cuando la cantidad de cloruros acumulados al nivel de la barra de refuerzo galvanizada es menor que en el concreto OPC, es recomendable emplear refuerzo galvanizado con concreto OPC [45].
Concreto para prevenir la carbonatación	Ceniza volante	Al remplazar o adicionar 10% y 30% (en masa de cemento) de ceniza volante en la mezcla de concreto se genera reducción del suministro alcalino, aumenta la velocidad de carbonatación y se disminuye la resistencia a compresión a los 28 días [46].
Concreto resistente a la reacción álcali sílice	Ceniza volante	La ceniza volante reduce significativamente el tamaño de los poros del concreto reforzado, por las características del material (partículas finas) y su propiedad de activación puzolánica, que se genera por altas temperaturas, de esta forma la difusividad se ve reducida en gran medida, reduciendo también la migración de álcalis desde el exterior. La adición de 15% de ceniza volante a la mezcla de concreto mitiga la reacción álcali sílice [39].
	Ceniza volante	Mezcla con 20%, 30%, 40% y 43% de reemplazo de cementante por ceniza volante es efectivo como mecanismo de mitigación del efecto de reactividad álcali sílice [17].
	Humo de sílice	Al emplear humo de sílice en la mezcla de concreto reduce la expansión, debido a la reacción que ocurre con los álcalis, ocasionando que el pH de la solución de poros se reduzca por los silicatos alcalinos formados. Además, el humo de sílice también reduce la permeabilidad [39].
	Humo de sílice	En agregados altamente reactivos la adición de humo de sílice no inhibe el problema y por el contrario se mantiene en expansión [17].
	Piedra caliza	El relleno de piedra caliza no redujo significativamente los efectos de ASR, en general, se puede considerar que la serie con relleno de piedra caliza y la serie de referencia son equivalentes [47].
	Ceniza de cáscara de arroz	La ceniza de cáscara de arroz había demostrado actividad puzolánica en pruebas de puzolanidad, pero en la prueba de ASR tuvo un aumento de la expansión [47].
	Material cerámico	la adición de cerámica roja - En el caso de los materiales cerámicos, los valores de expansión por ASR, en todos los casos, fueron superiores a los presentados por la serie de referencia, lo que indica que no se recomienda usar este material en concretos utilizados junto con el agregado reactivo [47].
Concreto resistente a ciclos de congelación-descongelación	Cemento portland sin aditivos minerales y cemento de escoria. La mezcla de concreto se reforzó con fibra de acero.	La introducción del refuerzo disperso mejora la estructura de poros de la matriz del concreto y da como resultado menos permeabilidad. Al adicionar escoria se redujo el tamaño de poro promedio, el concreto más resistente a las heladas fue el concreto reforzado con acero y con 50% de contenido de escoria [48].

**Inhibidores.** Los inhibidores se han desarrollado con el fin de evitar que ocurra la reacción química o el proceso que genera la patología.

**Inhibidor de corrosión del acero.** El concreto con inhibidores de corrosión como el caltite, el Nitrato de Calcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) y un inhibidor de corrosión migratoria, expuestos a zonas de marea, salpicadura y zona atmosférica del mar, muestra que, la inclusión de inhibidores de corrosión es poco beneficioso para el acero de refuerzo con profundidades inferiores a 2.54 cm. A profundidades mayores, disminuyen la velocidad de corrosión en las mezclas con el inhibidor [7]. También es beneficioso adicionar 10% de microsílíce en la mezcla del concreto para prevenir la corrosión del acero [8]. A largo plazo el inhibidor Ferro Gard 901 de Sika a base de alconolamina, es eficiente como inhibidor de corrosión de estructuras expuestas a cloruros.

En concreto ordinario la corrosión inicia después de aproximadamente 8 a 9 años de exposición a una profundidad de 1.5 cm. Después de 18 años el acero en el concreto con el inhibidor no presenta corrosión, por tanto, el inhibidor aumenta el doble de tiempo el inicio de la corrosión [49], [50].

Bactericidas. Para reducir las patologías en el concreto causadas por microorganismos se han evaluado bactericidas como el Bromuro de Sodio (NaBr), Tungstato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{WO}_4$ ), Óxido de Zinc (ZnO), Ftalocianina de Cobre (CuPc) y dloruro de dodecil dimetil. Las tasas de esterilización de los bactericidas son 87.14, 92.00, 99.40, 99.94 y 97.43 %, respectivamente, siendo el ftalocianina de cobre un tipo de bactericida eficiente para prevenir la corrosión bacteriana en el concreto expuesto a aguas residuales [51]. A pesar de que los inhibidores mejoran la resistencia del concreto al biodeterioro, la efectividad de los inhibidores es temporal y en altas proporciones pueden afectar las propiedades estructurales del concreto, otra desventaja son los altos costos económicos y ambientales [13].

Otra alternativa, consiste en usar nanotecnología para prevención/mitigación del BD. Los nanomateriales como nanopartículas de Titania ( $\text{TiO}_2$ ) y nanoplata se aplican para la protección de materiales de construcción. La disminución del tamaño de partícula a escala nanométrica aumenta significativamente la relación superficie-volumen, por lo tanto, se obtiene como resultado propiedades antimicrobianas. El daño a los microorganismos se realiza en la membrana celular por *B. cereus*, contacto directo con las nanopartículas. La liberación de nanomateriales presenta riesgo potencial para la salud humana y ambiental [13]. Las nanopartículas deben ser estables para evitar la agregación, y garantizar un rendimiento constante a largo plazo ya que influye en la actividad antibacteriana de NP (nanopartículas) afectando el área de superficie de exposición. En estudios recientes se han analizado las nanopartículas de óxido de zinc y plata en bacterias como la *Bacillus cereus* y la *Escherichia coli*. Se obtuvo la inhibición completa del crecimiento de *E. coli* y más del 60 % de inhibición de en presencia de nanopartículas de plata a una dosis del 0.5 % en peso de cemento [52].

*Utilización de polímero como reparación o prevención.* Los elementos de concreto reforzado que están deteriorados por exposición a ambientes severos, necesitan una reparación resistente a la corrosión [53]. La aplicación del concreto con fibra de geopolímero (FRGC) ofrece una mejor resistencia a la corrosión, mejora el rendimiento de los elementos y logra tener buenas condiciones de interfaz entre la capa de concreto nuevo y el concreto existente [54]. Además, los elementos de concreto afectados por altas temperaturas pueden recuperar la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión, usando una envoltura de CFRP (polímero reforzado con fibra de carbono), y también reduce el costo final del proyecto de restauración/fortalecimiento [55].

Los refuerzos con compuestos TRM (mortero reforzado textil) y FRP (polímero reforzado con fibra) se emplearon como alternativa para mejorar la capacidad de flexión y propiedades mecánicas en vigas RC expuestas a altas temperaturas. Se obtuvo mayor rendimiento en el refuerzo de vigas con TRM, pero la efectividad se reduce con el aumento de temperatura (20 a 150 °C) y al aumentar el número de capas del refuerzo, mientras que el FRP no muestra efectividad, razón por la cual ambas técnicas requieren de mayor estudio [56].

*Recubrimiento o selladores de superficies.* Los recubrimientos de película orgánica han sido utilizados en el campo de la protección y durabilidad del concreto, los cuales generan una capa densa después del

endurecimiento, dificultando la difusión de  $\text{CO}_2$  en el concreto [57]. Sin embargo, el envejecimiento de los recubrimientos de película orgánica también podría provocar defectos considerables y disminución en la protección del recubrimiento [58]. Los materiales como polímeros basados en poliéster, epoxi, epoxi reforzado con fibra de vidrio, epoxi y poliuretano, poliuretano, epoxi mezclado con óxido cuproso y óxido de plata, y el recubrimiento que contiene epoxi que contiene zeolitas de Plata, son utilizados como recubrimientos eficientes para proteger las estructuras de concreto expuestas al biodeterioro [13].

**Disposición del acero de refuerzo.** Se han explorado varios métodos de protección, unas de las tecnologías de prevención es galvanizar la superficie del acero o cambiar el refuerzo por acero inoxidable. La galvanización confiere una mayor resistencia a la corrosión del refuerzo en presencia de cloruros que el acero desnudo, además los productos de corrosión generados son menos voluminosos que el del refuerzo tradicional. Sin embargo, hay factores que influyen en el rendimiento de la corrosión del revestimiento galvanizado, como la estructura del recubrimiento galvanizado, la humedad del concreto o el tipo de cemento [45]. El uso de refuerzo lateral aumenta la capacidad local de tracción en el concreto, confinando el hiello expandido y controlando la apertura de la grieta por absorción de agua, pero este efecto no es proporcional a la relación de refuerzo por volumen [28].

**Concreto autorreparable.** Las bacterias pueden generar beneficios al concreto, usando bacterias sintetizadoras de calcita dentro del concreto para reparar grietas y así impedir mayores daños [59]. La bacteria *Sporosarcina pasteurii* en encapsulado de cemento de sulfoaluminato de calcio con adición de 20 % de humo de sílice, es un soporte de baja alcalinidad efectivo para preservar la actividad bacteriana. Dentro del encapsulado de las esporas se incluyen los nutrientes que son esenciales para la germinación de las esporas, debido a que son materiales orgánicos aplicados directamente en el concreto ocasiona pérdida de resistencia. La aparición de grietas en el concreto es autocurada en 28 días, alcanzando cierre cercano al 100 % de grietas hasta 417  $\mu\text{m}$  de espesor en concreto microbiano [60].

La adición de bacterias en el concreto de cascara de arroz puede aumentar las propiedades de resistencia debido a la precipitación de calcita en todas las edades del concreto reforzado [61]. La porosidad y permeabilidad del concreto de ceniza volante se puede reducir agregando la bacteria *Sporosarcina Pasteurii*, lo cual aumenta la resistencia del material [62]. La precipitación de calcita en las muestras de concreto por encapsulación de hidrogel, capsulas y sistemas vasculares parecen ser viables para la auto curación del concreto. El uso de *Sporosarcina Pasteurii* y *Bacillus Subtilis* reduce la penetración del cloruro en el concreto; también mejora la tendencia de reducción de masa del concreto expuesto al sulfato. A razón de los beneficios del concreto microbiano se ha considerado como un concreto alternativo y respetuoso con el ambiente [63].

## Conclusiones

A manera general se encontró un mayor énfasis en investigaciones sobre patologías originadas por cambios de temperatura y escasos estudios sobre la reacción álcali agregado. Recientemente, se han desarrollado técnicas para identificar de forma temprana el ataque por patógenos y simulaciones que puedan predecir futuros daños en el material. Se destacan los métodos de reparación y prevención aplicando recubrimientos e inhibidores químicos y minerales; también, el uso de la nanotecnología y el concreto autorreparable como la carbonatación que, en condiciones adecuadas, se considerada una estrategia de autocuración de pequeñas grietas en el concreto. Esta estrategia de autocuración, también se les ha atribuido a las bacterias sintetizadoras de calcitas.

Se evidencia que el estudio de materiales para mejorar las propiedades del concreto reforzado, relacionado con aglutinantes minerales mezclados con cemento, es un tema ampliamente estudiado, debido al interés que representa por las sinergias identificadas que favorecen las propiedades del concreto. Una técnica novedosa es el uso de nanomateriales, los cuales aumentan la resistencia al biodeterioro del concreto, no obstante, la durabilidad a largo plazo del concreto reforzado, no ha sido comprobada. Dentro de los materiales, una de las tecnologías para prevenir la corrosión es galvanizar la superficie del acero o cambiar el refuerzo por acero inoxidable.

## Referencias

- [1] C. Broto, "Enciclopedia Broto de patologías de la construcción: Conceptos generales y fundamentos", *Links Books*, 2006.
- [2] P. Diaz, "Protocolo para los Estudios de Patología de la Construcción en Edificaciones de Concreto Reforzado en Colombia," Tesis de Maestría, Pontificia *Universidad Javeriana*, Bogotá, Colombia, 2014.
- [3] J. Lahdensivu y J. Aromaa, "Renovation of an alkali-aggregate reaction damaged swimming pool", *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 3, pp. 1–8, diciembre, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.04.002>
- [4] C. P. Valderrama, J. Torres y R. Mejía de Gutiérrez, " Características de rendimiento de un hormigón de cenizas volantes con alto contenido de carbono no quemado", *Ing. e Investig.*, vol. 31, no.1, pp. 39–46, abril, 2011. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092011000100004&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092011000100004&script=sci_arttext&tlng=en)
- [5] S. García y S. Gómez, "Implementación del método de barras acelerado y una adaptación del método de prismas, con el fin de determinar el potencial de reactividad álcali-sílice y compararlo con la caracterización ya existente, correspondiente a tres de las fuentes de agregados," Tesis de Pregrado, *Universidad EIA*, Envigado, Colombia, 2018.
- [6] O. Hurtado-Figueroa, C. A. Bonilla-Granados, J. A. Cardenas-Gutierrez, "Asentamiento en concretos con reemplazo parcial de material cementante por ceniza volante y cal hidratada", *Respuestas*, vol. 25, no. S2, pp. 46-52, 2020. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1832>
- [7] A. Abd El Fattah, I. Al-Duais, K. Riding y M. Thomas, "Field evaluation of corrosion mitigation on reinforced concrete in marine exposure conditions", *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 663–674, marzo, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.077>
- [8] H.A. Estupiñan Duran, D.Y. Peña Ballesteros, C. Vásquez Quintero y S.A. Solano Rodriguez, "Simulación de la difusión del Cl- hasta la despasivación del acero de refuerzo en concreto con microsílice y expuesto a carbonatación", *Boletín Ciencias la Tierra*; No. 34, pp. 15-24, diciembre, 2013. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/34049>
- [9] Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones - IECA, "Hormigón en ambiente marino", pp. 5–6, enero, 2013.

- [10] Z. Yue, J. Li, W. Shao y L. Li, "Effect of crack opening and recovery on chloride penetration into reinforced concrete hollow piles", *Mater. Struct. Constr.*, vol. 49, no. 8, pp. 3217–3226, octubre, 2015. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0714-3>
- [11] V. Talakokula, S. Bhalla, R.J. Ball, C.R Bowen, G.L. Pesce, R. Kurchania, B. Bhattacharjee, A. Gupta y K. Paine, "Diagnosis of carbonation induced corrosion initiation and progression in reinforced concrete structures using piezo-impedance transducers", *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 242, pp. 79–91, febrero, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.02.033>
- [12] W. Piasta, "Analysis of carbonate and sulphate attack on concrete structures", *Eng. Fail. Anal.*, vol. 79, pp. 606–614, mayo, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.008>
- [13] T. Noeiaghahi, A. Mukherjee, N. Dhami y S. Chae, "Biogenic deterioration of concrete and its mitigation technologies", *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 575–586, mayo, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.144>
- [14] A. Bielefeldt, M. G. D. Gutierrez, S. Ovtchinnikov, J. Silverstein y M. Hernandez, "Bacterial Kinetics of Sulfur Oxidizing Bacteria and Their Biodeterioration Rates of Concrete Sewer Pipe Samples", *J. Environ. Eng.*, vol. 136, no. 7, pp. 731–738, julio, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000215)
- [15] L.E. Rendón y D. Koleva, "Concrete durability. Materiales cementicios y hormigón armado: propiedades, comportamiento y resistencia a la corrosión," *Springer International Publishing*, 2015.
- [16] J. F. Marquez-Peñaranda, M. Sanchez-Silva, J. Husserl y E. Bastidas-Arteaga, "Effects of biodeterioration on the mechanical properties of concrete", *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 10, pp. 4085–4099, diciembre 2016. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0774-4>
- [17] L. Melo, "Reactividad álcali-agregado (raa): experiencias en presas colombianas, análisis comparativo de principales variables que intervienen en el fenómeno", Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2014.
- [18] C. Comi, B. Kirchmayr y R. Pignatelli, "Two-phase damage modeling of concrete affected by alkali-silica reaction under variable temperature and humidity conditions", *Int. J. Solids Struct.*, vol. 49, no. 23, pp. 3367–3380, julio, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.07.015>
- [19] A. Campos, C. M. López, A. Blanco y A. Aguado, "Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam", *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 668–683, enero, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.180>
- [20] M. Sollero y H. Bolorino, "Investigation and diagnosis of a reinforced concrete reservoir with intense crack formation from several sources", *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 1, no. 1, p. 6, octubre, 2016. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0008-3>

- [21] E. Avendaño, "Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural usados en infraestructura industrial", Tesis de pregrado, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2006.
- [22] E. Pedoja, "Patologías de origen térmico en estructuras", *Memoria investig. ing. (Facultad Ing., Univ. Montev.)*, no. 4, pp. 97-101, noviembre, 2005. <https://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/247>
- [23] J. Toirac-Corral, "Patología de la construcción: grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención", *Cienc. Soc.*, vol. 29, no. 1, pp. 72–114, marzo, 2004. <https://doi.org/10.22206/cys.2004.v29i1.pp72-114>
- [24] I. Hager, "Behaviour of cement concrete at high temperature", *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 61, no. 1, pp. 145–154, abril, 2013. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013>
- [25] Q. X. Le, V. T. Dao, J. L. Torero, C. Maluk y L. Bisby, "Effects of temperature and temperature gradient on concrete performance at elevated temperatures", *Adv. Struct. Eng.*, vol. 21, no. 8, pp. 1223–1233, junio, 2018. <https://doi.org/10.1177/13694332177463>
- [26] J. Echavarría y E. Palacios, "Principales causas y posibles soluciones de las reclamaciones a nivel patológico en sistemas de edificaciones aporticadas", Tesis de Especialista, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia, 2011.
- [27] Q. X. Le, V. T. Dao, J. L. Torero, C. Maluk, L. Bisby, "Effects of temperature and temperature gradient on concrete performance at elevated temperatures", *Adv. Struct. Eng.*, vol. 21, no. 8, pp. 1223–1233, octubre, 2017. <https://doi.org/10.1177/1369433217746347>
- [28] F. Gong y K. Maekawa, "Multi-scale simulation of freeze-thaw damage to RC column and its restoring force characteristics", *Eng. Struct.*, vol. 156, pp. 522–536, noviembre, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.066>
- [29] X. Qin, S. Meng, D. Cao, Y. Tu, N. Sabourova, N. Grip, U. Ohlsson, T. Blanksvard, G. Sas y L. Elfgren, "Evaluation of freeze-thaw damage on concrete material and prestressed concrete specimens", *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 892-904, octubre, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.098>
- [30] H. Jiménez y Y. Milano, "Corrosión acelerada en medio salino y adherencia de sistemas de pinturas depositadas sobre acero", *Mundo FESC*, vol. 7, no. 13, pp. 48–55, junio, 2017. <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/103>
- [31] N. Zaki, A. Chai, H. K. Aggelis y D. G. Alver, "Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: A review and capability of acoustic emission technique", *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, pp. 19069–19101, agosto, 2015. <https://doi.org/10.3390/s150819069>
- [32] A. Sharma, S. Sharma, S. Sharma, y A. Mukherjee, "Investigation of deterioration in corroding

- reinforced concrete beams using active and passive techniques", *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 555–569, noviembre, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.165>
- [33] K. Agred, G. Klysz y J.-P. Balayssac, "Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna", *Constr. Build. Mater.*, vol. 188, pp. 1119–1127, agosto, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.165>
- [34] J. Wu y W. Wu, "Study on wireless sensing for monitoring the corrosion of reinforcement in concrete structures", *Measurement*, vol. 43, no. 3, pp. 375–380, diciembre, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.12.003>
- [35] W. Aperador Chaparro, M. Gordillo y J. Bautista, "Evaluación de la corrosión del acero embebido en concreto AAS, expuesto a carbonatación mediante un experimento factorial con medidas repetidas", *Ingeniería y Ciencia*, vol. 9, no. 17, pp. 237–260, noviembre, 2013. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.9.17.12>
- [36] H. Rathod y R. Gupta, "Sub-surface simulated damage detection using Non-Destructive Testing Techniques in reinforced-concrete slabs", *Constr. Build. Mater.*, vol. 215, pp. 754–764, abril, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.223>
- [37] M. C. Alonso y F. Laguna, "Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio", *Rev. ALCONPAT*, vol. 3, no. 1, pp. 1-16, abril, 2013. <https://doi.org/10.21041/ra.v3i1.39>
- [38] Y. Guruprasad y A. Ramaswamy, "Micromechanical analysis of concrete and reinforcing steel exposed to high temperature", *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 761–773, octubre, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.061>
- [39] J. Silva, "Propuesta metodológica para la determinación experimental de la reacción alcali-silice en agregados de arcilla térmicamente expandida por medio de un nuevo ensayo de electro-migración", Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2018
- [40] V. L. Ta, S. Bonnet, T. Senga Kiese y A. Ventura, "A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures", *Constr. Build. Mater.*, vol. 129, pp. 172–181, octubre, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.103>
- [41] J. I. Choi, Y. Lee, Y. Y. Kim y B. Y. Lee, "Image-processing technique to detect carbonation regions of concrete sprayed with a phenolphthalein solution", *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 451–461, julio, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.205>
- [42] Y. Dong, C. Su, P. Qiao y L. Sun, "Microstructural damage evolution and its effect on fracture behavior of concrete subjected to freeze-thaw cycles", *Int. J. Damage Mech.*, vol. 27, no. 8, pp. 1272–1288, Agosto, 2018. <https://doi.org/10.1177/1056789518787025>
- [43] S. Nasrazadani, R. Egtesad, E. Sudoi, S. Vupputuri, J. D. Ramsey y M. T. Ley, "Application of

Fourier transform infrared spectroscopy to study concrete degradation induced by biogenic sulfuric acid", *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 5, pp. 2025–2034, mayo, 2015. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0631-5>

- [44] K. Nakamoto, "Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds", *Handbook of Vibrational Spectroscopy*, pp. 1872–1892, diciembre, 2001. <https://doi.org/10.1002/9780470405840>
- [45] F. J. Luna Molina, M. C. Alonso Alonso, M. Sánchez Moreno y R. Jarabo Centenero, "Corrosion protection of galvanized rebars in ternary binder concrete exposed to chloride penetration", *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 468–475, diciembre, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.002>
- [46] M. H. F. de Medeiros, J. W. Raisdorfer, J. Hoppe Filho y R. A. Medeiros Junior, "Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve", *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–9, marzo, 2017. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>
- [47] C. Dos Santos Adorno, M. H. de Medeiros, J. H. Filho y G. C. Réus, "Effects of the addition of red ceramic, limestone filler and rice husk ash in alkali silica reaction", *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 3, no. 1, p. 11, diciembre, 2017. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0030-0>
- [48] S. N. Pogorelov y G. S. Semenyak, "Frost Resistance of the Steel Fiber Reinforced Concrete Containing Active Mineral Additive", in *Procedia Eng.*, vol. 150, pp. 1491–1495, enero, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.088>
- [49] U. M. Angst, M. Büchler, J. Schlumpf y B. Marazzani "An organic corrosion-inhibiting admixture for reinforced concrete: 18 years of field experience", *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 7, pp. 2807–2818, julio, 2016. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0687-2>
- [50] J. Kubo, Y. Tanaka, C. L. Page y M. M. Page, "Application of electrochemical organic corrosion inhibitor injection to a carbonated reinforced concrete railway viaduct", *Constr. Build. Mater.*, vol. 39, pp. 2–8, junio, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.010>
- [51] L. Kong, B. Zhang y J. Fang, "Study on the applicability of bactericides to prevent concrete microbial corrosion", *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 1–8, mayo, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.108>
- [52] T. Noeiaghahi, N. Dhami y A. Mukherjee, "Nanoparticles surface treatment on cemented materials for inhibition of bacterial growth", *Constr. Build. Mater.*, vol. 150, pp. 880–891, junio, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.046>
- [53] J. Arrieta Baldovino, C. Millán Páramo, R. dos Santos Izzo y E. Moreira, "CO<sub>2</sub> and cost optimization of reinforced concrete footings over a lime-treated soil using modified simulated annealing algorithm", *INGE CUC*, vol. 16, no. 1, pp. 95-115, junio, 2020. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.07>
- [54] M. H. Al-Majidi, A. P. Lampropoulos, A. B. Cundy, O. T. Tsioulou y S. Al-Rekabi, "A novel corrosion resistant repair technique for existing reinforced concrete (RC) elements using polyvinyl alcohol fibre

- reinforced geopolymer concrete (PVAFRGC)", *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 603–619, diciembre, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.213>
- [55] H. Ahmad, R. Hameed, M. Rizwan Riaz y A. A. Gillani, "Strengthening of concrete damaged by mechanical loading and elevated temperature", *Adv. Concr. Constr.*, vol. 6, no. 6, pp. 645–658, noviembre, 2018. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.6.645>
- [56] S. Raof y D. Bournas, "TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures", *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 424–437, julio, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.195>
- [57] A. Gómez Cabrera y A. Orozco Ovalle, "Simulación digital como herramienta para la gestión del conocimiento en la construcción de edificaciones en concreto", *INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 75-82, 2014. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/346>
- [58] G. Li, L. Dong, M. Lei y J. Du, "Predicting carbonation depth for concrete with organic film coatings combined with ageing effects", *Constr. Build. Mater.*, vol. 142, pp. 59–65, julio, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.063>
- [59] R. Cruz Hernández, D. Franco Durán y L. Pérez Bustos "Reemplazo del agregado fino por escoria de horno de cubilote para la fabricación de concreto", *INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 83-88, junio, 2014. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/347>
- [60] J. Xu y X. Wang, "Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material", *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 1–14, abril, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.020>
- [61] J. Cruz Benedetti, L. Acosta, A. López Ramos, J. Lakah Durango y C. Ceballos Díaz, "Relación entre los ensayos ultrasónico y convencional para determinar la resistencia del concreto simple a la compresión", *INGE CUC*, vol. 12, no. 1, pp. 94-98, junio, 2016. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.12.1.2016.10>
- [62] A. Viviescas Jaimes, L. Herrera Rey y S. Arenas Páez "Determinación de la capacidad resistente de puentes viga-losa en concreto postensado mediante pruebas de vibración ambiental: Caso de estudio Puente El Ramo", *INGE CUC*, vol. 13, no. 1, pp. 32-41, enero, 2017. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.13.1.2017.03>
- [63] K. Vijay, M. Murmu y S. V. Deo, "Bacteria based self healing concrete – A review", *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 1008–1014, octubre, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>