

Comparación de Métodos para Determinar el Frente de Carbonatación en Estructuras en Concreto Reforzado, Caso de Estudio Hospital Universitario de Neiva.

Miguel Roberto Tamayo Polania²

Paola Quintero Rodríguez³

Walter Mauricio Barreto Castillo / Director⁴

Resumen

La carbonatación del concreto es uno de los mecanismos de deterioro más relevantes en estructuras de concreto reforzado, debido a su impacto directo en la reducción del pH y la despasivación del acero de refuerzo. Tradicionalmente, la determinación del frente de carbonatación se ha realizado mediante el uso de fenolftaleína; sin embargo, estudios recientes han evidenciado limitaciones en su capacidad para representar la extensión real del fenómeno, particularmente en la identificación de zonas parcialmente carbonatadas. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo comparar la confiabilidad, aplicabilidad y alcance de diferentes indicadores de pH en la determinación del frente de carbonatación en estructuras de concreto en servicio.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental comparativo in situ, evaluando cuatro indicadores (fenolftaleína, azul de timol, alizarina e índigo carmín) sobre columnas estructurales del Hospital Universitario de Neiva, mediante la ejecución de regatas controladas. Se realizaron mediciones de profundidad del frente de carbonatación para cada indicador, analizando la variabilidad, consistencia y legibilidad de los resultados en condiciones reales de inspección.

Los resultados evidencian diferencias significativas entre los indicadores, con profundidades promedio de 40.1 mm para azul de timol, 62.6 mm para fenolftaleína, 70.7 mm para alizarina y 85.4 mm para índigo carmín. Estos hallazgos confirman la existencia de un gradiente de alcalinidad en el concreto y la presencia de una zona parcialmente carbonatada, cuya delimitación depende del umbral de respuesta del indicador utilizado. Se concluye que el frente de carbonatación no debe interpretarse como una frontera única, sino como una zona de transición química, y que el uso exclusivo de fenolftaleína puede conducir a una subestimación del avance del fenómeno. En consecuencia, se recomienda la implementación de enfoques comparativos que integren indicadores alternativos para mejorar la precisión del diagnóstico en estructuras en servicio.

¹ Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de MAGISTER EN PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION.

² Autor de contacto: Miguel Roberto Tamayo Polania, Especialista en Patología de la Construcción, Universidad Santo Tomás de Colombia. miguel.tamayo@usantotomas.edu.co

³ Autor: Paola Quintero Rodríguez, Especialista en Patología de la Construcción, Universidad Santo Tomás de Colombia. paolaquintero@usantotomas.edu.co

⁴ Director: Walter Mauricio Barreto Castillo, Magister en Construcción de Madera, Universidad Santo Tomás de Colombia. walterbarreto@usta.edu.co

Comparison of Methods for Determining the Carbonation Front in Reinforced Concrete Structures: Case Study of the Neiva University Hospital.

Abstract

Carbonation of concrete is one of the most relevant deterioration mechanisms in reinforced concrete structures due to its direct impact on pH reduction and steel depassivation. Traditionally, carbonation depth has been assessed using phenolphthalein; however, recent studies have highlighted its limitations in accurately representing the actual extent of the phenomenon, particularly in detecting partially carbonated zones. In this context, this study aims to compare the reliability, applicability, and applicability of different pH indicators for determining the carbonation front in in-service concrete structures.

The research was conducted through an in-situ comparative experimental approach, evaluating four indicators (phenolphthalein, thymol blue, alizarin, and indigo carmine) on structural columns of the Hospital Universitario de Neiva. Controlled grooves were executed to expose fresh concrete surfaces, and carbonation depths were measured for each indicator. The analysis focused on variability, consistency, and visual interpretability under real inspection conditions.

The results show significant differences among indicators, with average carbonation depths of 40.1 mm for thymol blue, 62.6 mm for phenolphthalein, 70.7 mm for alizarin, and 85.4 mm for indigo carmine. These findings confirm the existence of an alkalinity gradient within concrete and the presence of a partially carbonated zone, whose extent depends on the pH response range of each indicator. It is concluded that the carbonation front should not be interpreted as a single boundary but rather as a transition zone, and that relying solely on phenolphthalein may lead to underestimation of carbonation depth. Therefore, a comparative approach incorporating alternative indicators is recommended to improve diagnostic accuracy in existing structures.

Palabras clave: Carbonatación del concreto; frente de carbonatación; indicadores de pH; fenolftaleína; alizarina; azul de timol; índigo carmín; durabilidad del concreto; patología estructural.

Keywords: Concrete carbonation; carbonation front; pH indicators; phenolphthalein; alizarin; thymol blue; indigo carmine; concrete durability; structural pathology.

Introducción

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado constituye uno de los temas centrales de la ingeniería civil actual, debido a su relación directa con la seguridad estructural, la funcionalidad de las edificaciones y los costos de mantenimiento durante la vida útil. Aunque el concreto ha sido considerado un material durable por su alta alcalinidad y su capacidad de proteger pasivamente el acero de refuerzo, diversos procesos fisicoquímicos pueden comprometer esa condición con el paso del tiempo, especialmente en estructuras expuestas a ambientes urbanos, industriales o de servicio continuo. Entre estos procesos, la carbonatación del concreto se reconoce como uno de los mecanismos de deterioro más relevantes, dado que modifica progresivamente la química interna del material (Merah, 2024) y favorece condiciones para la corrosión del refuerzo (Bui et al., 2023).

La carbonatación ocurre por la difusión de dióxido de carbono (CO_2) a través de la red porosa del concreto y su reacción con compuestos alcalinos presentes en la matriz cementicia, entre ellos el hidróxido de calcio. Como resultado, se forman compuestos carbonatados y se produce una disminución progresiva del pH del concreto (Merah, 2024). Este descenso de

alcalinidad puede comprometer las condiciones de pasivación del acero de refuerzo y, en determinadas condiciones de exposición, puede propiciar el desarrollo de procesos de corrosión (Du et al., 2023).

La evolución de la carbonatación no ocurre como un fenómeno abrupto ni homogéneo dentro del concreto, sino como un gradiente químico asociado a la difusión progresiva de CO_2 y a la transformación parcial de los compuestos presentes en la matriz cementicia. En consecuencia, la transición entre zonas carbonatadas y no carbonatadas puede presentar regiones intermedias donde el concreto aún conserva parte de su capacidad alcalina, aunque ya existan modificaciones fisicoquímicas relevantes para la estabilidad de la capa pasiva del acero de refuerzo. Desde el punto de vista de la evaluación patológica de estructuras en servicio, esta condición resulta particularmente relevante, debido a que la interpretación del frente carbonatado influye directamente en los criterios de diagnóstico, mantenimiento e intervención.

Desde el punto de vista de la durabilidad, la carbonatación representa un fenómeno relevante para la evaluación del desempeño de estructuras de concreto reforzado, especialmente cuando se analizan elementos que permanecen en servicio y cuya condición debe ser valorada con fines de diagnóstico, mantenimiento o intervención (Merah, 2024).

En la práctica de la evaluación de lesiones y patologías de elementos en concreto reforzado, la determinación del frente de carbonatación se realiza operativamente como la profundidad hasta la cual ha ocurrido una disminución significativa del pH del concreto, identificable mediante la aplicación de indicadores ácido-base sobre superficies recién fracturadas o expuestas (Merah, 2024). Esta medida permite estimar la proximidad del proceso de carbonatación a la zona del refuerzo, aspecto directamente relacionado con la durabilidad del elemento estructural (Li et al., 2023).

Sin embargo, se ha encontrado una diferencia en los distintos métodos para medir el frente de carbonatación de acuerdo a la documentación de varios autores principalmente en los rangos de pH como Vogler et al. (2020), Li et al. (2023), Du et al. (2023) y Cui et al. (2022). La literatura reciente ha señalado que en los elementos existe de una zona parcialmente carbonatada, ubicada entre la región claramente no carbonatada y la zona completamente carbonatada. En Colombia, la evaluación del frente de carbonatación en estructuras existentes ha sido desarrollada principalmente mediante el uso de fenolftaleína como indicador convencional de pH, particularmente en estudios asociados a infraestructura en servicio y evaluación patológica de edificaciones y puentes (Gómez & Rodríguez, 2021).

Aunque diversos estudios han evaluado indicadores alternativos de pH en condiciones de laboratorio, aún existe limitada evidencia experimental sobre su comportamiento comparativo en estructuras reales en servicio, particularmente bajo condiciones ambientales heterogéneas y criterios de inspección in situ. Esta brecha limita la comprensión de cómo las diferencias entre indicadores pueden influir en la interpretación del frente de carbonatación durante procesos reales de evaluación patológica.

En este contexto, surge la necesidad técnica de comparar indicadores de pH directamente en estructuras reales en servicio. Para el caso del Hospital Universitario de Neiva—una edificación hospitalaria de aproximadamente 50 años, con sistema estructural porticado losa-columna y antecedentes de exposición a humedad y gases— esta comparación resulta pertinente para analizar el comportamiento y aplicabilidad de diferentes indicadores bajo condiciones representativas de avance de la carbonatación. En consecuencia, el presente estudio busca aportar criterios técnicos para la interpretación comparativa del frente carbonatado mediante distintos indicadores de pH en elementos de concreto reforzado en servicio.

Planteamiento del problema

En la evaluación de estructuras de concreto reforzado, la determinación del frente de carbonatación se emplea de manera frecuente como criterio técnico para estimar el avance del deterioro asociado a la pérdida de alcalinidad del material. En la práctica, esta medición suele realizarse mediante la aplicación de fenolftaleína sobre superficies recién fracturadas o expuestas, debido a que se trata de un procedimiento rápido, económico y de fácil implementación. No obstante, la utilización extendida de este método ha llevado a asumir, en muchos contextos de inspección, que la profundidad revelada por el indicador de pH representa de manera suficiente el avance del fenómeno de carbonatación. Sin embargo, investigaciones recientes han señalado que la zona identificada mediante fenolftaleína no necesariamente coincide con la totalidad de las transformaciones fisicoquímicas asociadas a la pérdida progresiva de alcalinidad del concreto, particularmente en regiones parcialmente carbonatadas (Merah, 2024; Du et al., 2023; Li et al., 2023). Adicionalmente, el uso de fenolftaleína ha sido objeto de revisión desde el punto de vista toxicológico, dado que ha sido clasificada como una sustancia “razonablemente anticipada como carcinógeno humano”, lo que ha motivado la exploración de indicadores alternativos que permitan mantener la confiabilidad del método bajo condiciones de mayor seguridad en su manipulación (National Toxicology Program, 2021).

El principal problema técnico radica en que el frente de carbonatación determinado mediante fenolftaleína no necesariamente coincide con la extensión real de las transformaciones químicas que ocurren en el concreto. Los indicadores de pH permiten identificar una frontera visual asociada al cambio de alcalinidad, pero no necesariamente delimitan la totalidad del proceso fisicoquímico (Vogler et al., 2020). Esta limitación fue confirmada experimentalmente y se presentó que las profundidades determinadas mediante análisis cuantitativo de carbonato de calcio, Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Análisis Termogravimétrico (TGA) fueron entre dos y tres veces mayores que las obtenidas con fenolftaleína (Li et al., 2023). Estos hallazgos indican que el resultado de la medición depende del principio químico del método utilizado y, por tanto, no puede asumirse automáticamente como una representación única del frente real de carbonatación, como usualmente se hace en la práctica con el indicado de fenolftaleína.

A esta situación se suma la existencia de una zona parcialmente carbonatada, cuya identificación no siempre es posible mediante el uso exclusivo de fenolftaleína. También demostraron que en regiones clasificadas como no carbonatadas por este indicador ya se presentaban cambios mineralógicos y microestructurales asociados al proceso de carbonatación (Du et al., 2023). Un indicador con mayor rango de respuesta de pH permitió detectar profundidades superiores a las obtenidas con fenolftaleína (Cui et al., 2022). En conjunto, estos resultados evidencian que la delimitación del frente de carbonatación depende del reactivo empleado y que la interpretación del fenómeno puede variar significativamente según el método de detección.

Sin embargo, aunque esta problemática ha sido documentada experimentalmente, la mayor parte de los estudios disponibles se ha desarrollado en condiciones de laboratorio, con especímenes de geometría regular, materiales controlados y procesos de carbonatación acelerada.

De acuerdo con Merah (2024), los ensayos desarrollados bajo condiciones aceleradas de laboratorio pueden estar significativamente influenciados por variables como la concentración de CO₂, la humedad relativa y la temperatura, limitando la representatividad de los resultados frente al comportamiento de estructuras reales en servicio. Esta brecha adquiere relevancia práctica porque, en condiciones de campo, la lectura del frente de carbonatación no depende únicamente del comportamiento químico del indicador, sino también del estado superficial del concreto, la humedad, la heterogeneidad de los materiales y las condiciones de observación. Factores como el contraste visual y la condición superficial pueden influir en la interpretación de los indicadores,

introduciendo incertidumbre en la medición (Loginova et al., 2023). Esto implica que, en una estructura en servicio, la profundidad registrada puede estar condicionada tanto por el método químico como por las condiciones reales de inspección.

Bajo este panorama, el problema de investigación no consiste únicamente en verificar si es adecuado utilizar la fenolftaleína para medir el frente de carbonatación, sino en establecer en qué medida los diferentes indicadores de PH disponibles producen resultados comparables, técnicamente y económicamente interpretables cuando se aplican sobre concreto real en servicio. En estructuras con un tiempo prolongado de servicio, la aplicación de métodos de evaluación debe considerar criterios de mínima intervención sobre los elementos. La generación de núcleos o ensayos destructivos para la aplicación de indicadores puede implicar afectaciones adicionales sobre el material o limitaciones operativas en zonas funcionales. En este sentido, la evaluación de indicadores de pH alternativos que permitan mejorar la lectura del frente de carbonatación, sin requerir intervenciones extensivas o repetitivas sobre el elemento, adquiere relevancia técnica dentro del proceso de diagnóstico. La literatura reciente ha mostrado que distintos indicadores de pH presentan umbrales cromáticos de respuesta asociados a diferentes rangos de alcalinidad del concreto. Vogler et al. (2020) reportaron que la fenolftaleína presenta transición de color en valores aproximados entre pH 8.2 y 10, mientras que indicadores alternativos como azul de timol, alizarina e índigo carmín responden bajo intervalos de pH diferentes. Los autores señalaron que estas diferencias pueden modificar la delimitación visual del frente de carbonatación y evidenciar regiones parcialmente carbonatadas que no siempre son identificadas mediante el método convencional basado en fenolftaleína. Adicionalmente, Vogler et al. (2020) indicaron que la transición entre zonas carbonatadas y no carbonatadas no ocurre necesariamente como una frontera abrupta, sino como una región gradual asociada a cambios progresivos en la alcalinidad del concreto.

De manera complementaria, se ha observado que indicadores con mayor rango de respuesta de pH pueden detectar profundidades superiores a las obtenidas con fenolftaleína (Cui et al., 2022), lo cual abre la posibilidad de optimizar las estrategias de evaluación en campo bajo criterios de aplicabilidad y menor impacto sobre la estructura. En este sentido, se justifica comparar distintos métodos de determinación del frente de carbonatación bajo condiciones representativas de inspección in situ, con el fin de identificar sus alcances, limitaciones y aplicabilidad en el diagnóstico patológico de estructuras de concreto reforzado.

En este marco, el caso de estudio corresponde al Módulo 3 del Hospital Universitario Hernando Moncaleano Perdomo, ubicado en la ciudad de Neiva, Huila, una edificación institucional de uso hospitalario cuya construcción data de 1975 y que, de acuerdo con la información técnica disponible, fue construido bajo un sistema estructural porticado con transferencia de cargas losa-columna mediante capiteles. De acuerdo a las inspecciones realizadas, se trata de una estructura de tres niveles (sótano, dos pisos y cubierta), que actualmente se encuentra fuera de servicio debido a su avanzado estado de deterioro y al riesgo asociado al comportamiento de algunos de sus elementos estructurales. Por su naturaleza funcional, esta infraestructura corresponde a una edificación indispensable del grupo de uso IV según la NSR-10, condición que incrementa la exigencia técnica sobre su evaluación, durabilidad y seguridad en servicio. Adicionalmente, se tienen documentados antecedentes de exposición prolongada a humedad, vapores, condensación y ambientes interiores agresivos en zonas de sótano y otras áreas, lo que resulta relevante para el estudio del avance del frente de carbonatación y la interpretación del comportamiento del concreto frente a la pérdida de alcalinidad.

Por lo que este caso ofrece un contexto técnicamente pertinente para analizar comparativamente el desempeño de distintos indicadores de pH aplicados a la determinación del frente de carbonatación en una estructura real de concreto en servicio.

Objetivo general:

Comparar el desempeño observado y la aplicabilidad de diferentes indicadores de pH para la determinación del frente de carbonatación en estructuras de concreto en servicio, mediante un mismo procedimiento experimental de inspección in situ aplicado sobre elementos estructurales del Hospital Universitario de Neiva.

Objetivos específicos:

- Analizar los indicadores de pH reportados en la literatura para la determinación del frente de carbonatación, con énfasis en sus rangos de respuesta, principios de medición y aplicación en estructuras de concreto reforzado.
- Identificar alcances y limitaciones observadas en la aplicación de indicadores de pH convencionales y alternativos para la evaluación del frente de carbonatación en estructuras reales de concreto reforzado.
- Proponer criterios técnicos según los resultados obtenidos para la selección y uso de indicadores alternativos de pH para estructuras de concreto reforzado en servicio, bajo principios de confiabilidad, aplicabilidad y mínima intervención.

Marco teórico y conceptual

La carbonatación del concreto constituye uno de los mecanismos de deterioro más relevantes en estructuras de concreto reforzado expuestas al ambiente durante su vida útil. Su importancia radica en que modifica progresivamente la química interna del material y puede comprometer las condiciones de pasivación del acero de refuerzo, afectando así la durabilidad del sistema estructural. Desde el punto de vista de la ingeniería civil, su estudio no se limita a la identificación de un fenómeno químico aislado, sino que se relaciona directamente con la evaluación del desempeño del concreto en servicio, la estimación de vida útil y la interpretación del estado de conservación de los elementos estructurales (Merah, 2024).

Reducción de pH y alcalinidad del concreto

Uno de los efectos más importantes de la carbonatación es la disminución progresiva del pH del concreto. En estado no carbonatado, la matriz cementicia presenta una alta alcalinidad, condición que favorece la estabilidad química del acero embebido. A medida que avanza la carbonatación, esta alcalinidad disminuye debido al consumo de compuestos básicos y a la formación de carbonatos (Merah, 2024). Esta reducción del pH no ocurre de manera uniforme, sino como un gradiente químico dentro del espesor del concreto.

La relevancia del pH radica en que constituye uno de los principales parámetros indirectos utilizados para interpretar el grado de carbonatación del material. No obstante, la literatura ha mostrado que la disminución del pH y la transformación mineralógica del concreto no siempre ocurren de forma coincidente desde el punto de vista operativo de medición.

Por ello, la interpretación del “frente” de carbonatación depende en gran medida del umbral químico del método utilizado para detectarlo (Li et al., 2023).

Pasivación y despasivación del acero de refuerzo

En estructuras de concreto reforzado, la elevada alcalinidad del concreto permite la formación y estabilidad de una capa pasiva sobre la superficie del acero, la cual actúa como barrera protectora frente a la corrosión. Cuando el pH disminuye progresivamente como resultado de la carbonatación, esta condición protectora puede verse comprometida, generando un entorno más favorable para el inicio de procesos corrosivos si concurren además condiciones adecuadas de humedad y oxígeno (Du et al., 2023).

La relación entre pH y comportamiento del acero no debería interpretarse únicamente desde el umbral clásico de la fenolftaleína (Du et al., 2023). Sus resultados mostraron que el inicio de la pérdida de pasividad puede asociarse a valores de pH superiores al intervalo de respuesta de este indicador, lo que implica que el criterio convencional de medición puede no reflejar completamente el estado electroquímico relevante para la durabilidad del refuerzo.

Frente de carbonatación y zona parcialmente carbonatada

Tradicionalmente, el frente de carbonatación ha sido entendido como la frontera que separa el concreto carbonatado del no carbonatado. Sin embargo, los avances recientes en la caracterización del fenómeno han mostrado que esta interpretación binaria resulta insuficiente. La profundidad determinada con fenolftaleína puede diferir significativamente de la obtenida mediante métodos cuantitativos (Li et al., 2023), mientras que se demostró que en regiones clasificadas como “no carbonatadas” por este indicador ya existían cambios asociados al proceso de carbonatación (Du et al., 2023).

Estos hallazgos sustentan la existencia de una zona parcialmente carbonatada, es decir, una región intermedia donde el concreto aún conserva parte de su alcalinidad, pero ya presenta transformaciones químicas o microestructurales. Desde el punto de vista del diagnóstico, esta zona tiene gran importancia porque cuestiona la interpretación del frente como una línea única y obliga a entenderlo como una transición química dependiente del método de observación (Du et al., 2023, Cui et al., 2022).

Indicadores de pH y sus rangos de respuesta

Los indicadores de pH se han utilizado ampliamente para la determinación del frente de carbonatación debido a su facilidad de aplicación y a la posibilidad de obtener una respuesta visual inmediata sobre el estado alcalino del concreto. Su principio de funcionamiento se basa en el cambio de color que presentan al entrar en contacto con un determinado intervalo de pH. Por esta razón, el resultado que arrojan depende directamente del rango de respuesta del reactivo utilizado (Vogler et al., 2020).

La fenolftaleína ha sido el indicador más utilizado en la práctica, pero no es el único. Se han evaluado otros indicadores como Thymol Blue (azul de timol), Alizarin Yellow R, índigo carmín e indicadores mixtos (Vogler et al., 2020), evidenciando que cada uno responde de forma distinta frente al gradiente alcalino del concreto. Al analizar la aplicación de alizarina y rojo neutro como alternativas complementarias en la identificación de la capa neutralizada del concreto (Loginova et al., 2023).

Desde esta perspectiva, el uso de indicadores alternativos no implica únicamente reemplazar un reactivo por otro, sino reconocer que cada uno puede revelar una parte diferente del

proceso químico. Por ello, la selección del indicador tiene implicaciones directas sobre la profundidad medida y sobre la interpretación técnica del resultado (Vogler et al., 2020).

Limitaciones de la fenolftaleína

Aunque la fenolftaleína continúa siendo el método de referencia más difundido, la literatura reciente ha mostrado limitaciones claras en su capacidad para representar la totalidad del fenómeno de carbonatación. Las profundidades medidas con fenolftaleína fueron significativamente menores que las obtenidas mediante análisis cuantitativos (Li et al., 2023). Aunque algunos indicadores alternativos mostraban alta correlación con la fenolftaleína, la carbonatación real podía avanzar más allá de la frontera visual identificada por este reactivo (Vogler et al., 2020). En la misma línea, se evidenció que la zona considerada no carbonatada por fenolftaleína ya podía presentar transformaciones químicas relevantes (Du et al., 2023).

En conjunto, estos resultados indican que la fenolftaleína sigue siendo útil como herramienta práctica de inspección, pero su lectura debe interpretarse con cautela cuando se pretende inferir el grado real de carbonatación o su relación con la pérdida de pasividad del acero (Du et al., 2023) (Li et al., 2023).

Alternativas: azul de timol, alizarina, índigo carmín y otros indicadores

Dentro de los indicadores alternativos estudiados, el azul de timol (Thymol Blue) ha sido evaluado como opción para la delimitación del frente de carbonatación. Sin embargo, su desempeño visual fue limitado, debido a que el tono azul claro podía confundirse con el color gris del concreto (Vogler et al., 2020). En contraste, Alizarin Yellow R mostró una mejor respuesta visual y una adecuada correlación con la fenolftaleína, aunque sin representar necesariamente toda la extensión del fenómeno.

El uso de alizarina y rojo neutro como complementos de la fenolftaleína indica en sus resultados que el rojo neutro permitió ampliar el rango de lectura hacia zonas más carbonatadas, mientras que la alizarina presentó dificultades de interpretación visual en condiciones prácticas (Loginova et al., 2023). En consecuencia, la selección de un indicador alternativo no depende únicamente de su fundamento químico, sino también de su legibilidad, contraste y aplicabilidad en condiciones reales de inspección.

Aplicación en estructuras en servicio

En estructuras de concreto en servicio, la determinación del frente de carbonatación debe interpretarse considerando que su avance no depende exclusivamente del tiempo de exposición, sino también de la interacción entre variables ambientales, constructivas y superficiales. Estudios desarrollados en edificaciones reales han mostrado que la profundidad de carbonatación puede variar significativamente entre elementos ubicados en ambientes interiores y exteriores, debido a diferencias en la concentración de CO_2 , humedad relativa, ventilación y presencia de recubrimientos o acabados superficiales (Li et al., 2018). Asimismo, se ha documentado que factores internos del concreto, como la resistencia a la compresión, se relacionan inversamente con la profundidad carbonatada, lo que confirma que concretos más densos tienden a ofrecer mayor resistencia al ingreso de CO_2 (Li et al., 2018).

En esta misma línea, se ha señalado que la interpretación de la carbonatación en estructuras existentes requiere cautela, debido a la heterogeneidad del concreto, la variabilidad del recubrimiento y la dificultad de conocer con precisión todas las condiciones de exposición a lo largo de la vida útil de la estructura (Benítez et al., 2019). Desde una perspectiva de durabilidad, la carbonatación adquiere relevancia porque puede disminuir la alcalinidad del concreto hasta comprometer la estabilidad de la capa pasiva del acero de refuerzo, favoreciendo procesos posteriores de corrosión, fisuración y desprendimiento del recubrimiento (Fuhaid & Niaz, 2022). Por ello, la medición del frente carbonatado en edificaciones en servicio no debe entenderse como una lectura aislada, sino como una aproximación diagnóstica influida por múltiples factores físicos y fisicoquímicos.

Metodología

Enfoque y tipo de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, combinando un componente experimental en campo con análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados obtenidos. El componente cuantitativo correspondió a la medición de profundidades del frente de carbonatación mediante distintos indicadores de pH aplicados sobre elementos estructurales en servicio. Por su parte, el componente cualitativo se orientó a la observación comparativa de aspectos asociados a la respuesta visual de los indicadores, tales como contraste cromático, nitidez de delimitación y facilidad de interpretación en condiciones reales de inspección. El diseño corresponde a un estudio comparativo aplicado, orientado a evaluar el comportamiento de distintos indicadores de pH en la determinación del frente de carbonatación en elementos de concreto reforzado en servicio.

Este enfoque se fundamenta en la necesidad de analizar los métodos en condiciones reales de inspección, donde la carbonatación depende de la interacción entre variables ambientales, propiedades del material y condiciones superficiales (Li et al., 2018), y donde la medición presenta incertidumbre asociada a la heterogeneidad del concreto (Benítez et al., 2019).

Alcance del estudio

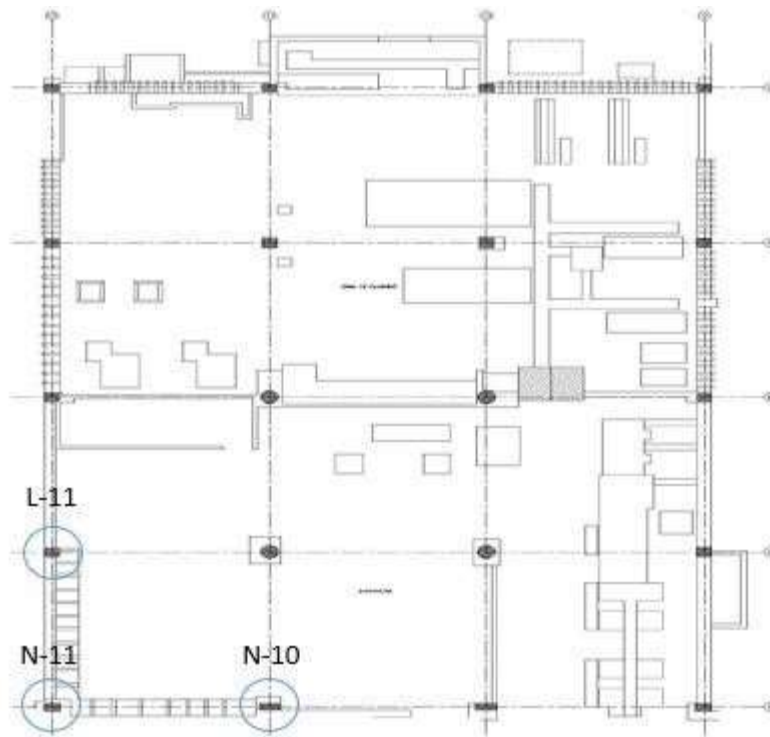
El estudio se centró en la comparación de indicadores de pH convencionales y alternativos aplicados directamente sobre elementos estructurales del Hospital Universitario de Neiva. No se buscó determinar un valor absoluto de la profundidad de carbonatación, sino analizar:

- La variabilidad de los resultados entre indicadores.
- La consistencia de las mediciones.
- La legibilidad del frente en campo.
- La aplicabilidad de los métodos bajo criterios de mínima intervención.

En este sentido, la profundidad medida se interpretó como un indicador operativo del cambio de alcalinidad, dependiente del rango de respuesta del reactivo (Li et al., 2023; Vogler et al., 2020), y no como una frontera única del fenómeno.

Selección de elementos

Esquema 1. Localización en planta de columnas evaluadas.



Fuente: Elaboración propia.

Intervención y preparación de superficie

En cada columna se ejecutaron regatas horizontales controladas, con dimensiones aproximadas de:

- ancho: 6-8 cm
- profundidad: 8-10 cm
- longitud: 14-16 cm

El objetivo fue exponer concreto interno sin afectar el acero de refuerzo ni comprometer la integridad estructural del elemento, mediante intervenciones localizadas de dimensiones reducidas, conservando el recubrimiento circundante y evitando cortes directos sobre el refuerzo.

Las superficies expuestas fueron limpiadas en seco mediante brocha, evitando el uso de agua para no alterar la lectura de los indicadores. La aplicación de los reactivos se realizó inmediatamente después de la exposición, garantizando condiciones adecuadas de observación del cambio de color.

Indicadores evaluados

Se evaluaron cuatro indicadores de pH:

- Alizarina (Alizarin Yellow R)
- Azul de timol (Thymol Blue)
- Fenolftaleína (referencia convencional)
- Índigo carmín (Indigo Carmine)

Tabla 1. Información indicadores de PH utilizados.

ID	Indicador	Rango de viraje / respuesta	Respuesta visual en pH bajo	Respuesta visual en pH alto
1	Alizarina Yellow R	10.1–12.0	Amarillo / naranja	Rojo / violeta
2	Azul de timol	8.0–9.6	Amarillo	Azul
3	Fenolftaleína	8.2–10.0	Incoloro	Rosado / fucsia
4	Índigo carmín	11.4–13.0	Amarillo / incoloro	Azul

Nota: los rangos de pH son de referencia para interpretación en concreto; la respuesta visual puede variar por humedad, iluminación, textura, concentración del reactivo y color base del material.

Fuente: Elaboración propia.

La selección se basó en su uso reportado en la literatura para la evaluación de alcalinidad del concreto (Vogler et al., 2020; Cui et al., 2022; Loginova et al., 2023).

Procedimiento de medición

En cada regata se aplicaron los indicadores sobre la superficie recién expuesta, identificando visualmente el cambio de color asociado a la variación del pH. Para cada indicador se realizaron:

- Tres mediciones puntuales de profundidad.
- Utilizando instrumento de medición (calibrador o regla milimetrada).
- Desde la superficie expuesta hasta la zona de cambio cromático.

Las mediciones se realizaron en puntos representativos de cada regata, buscando capturar la variabilidad del frente. Se registró información para cada columna como la registrada en la tabla 2.

Tabla 2. Información tipo- Columna L11 evaluada en la fase de exploración

<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>	<i>COLUMNA L 11 - REGATA No. 01 - Alizarina</i>	<i>COLUMNA L 11 - REGATA No. 01 - Azul de Timol</i>	<i>COLUMNA L 11 - REGATA No. 01 Fenolftaleína 1%</i>	<i>COLUMNA L 11 - REGATA No. 01 Índigo Carmín</i>
Estado superficial	Seco / Húmedo	Seco	Seco		
Presencia de fisuras	Sí / No	No	No	Seco	Seco

Recubrimiento visible	Sí / No	Si	Si	No	No
Condición ambiental	Ventilado / Cerrado	Ventilado	Ventilado	Si	Si

Observaciones generales: Edificación construida desde 1953, terminada en 1978 puesta en servicio.

Fuente: Propia.

Procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos fueron organizados en matrices por columna e indicador, considerando: los valores promedio de profundidad registrados para cada indicador, la comparación de profundidades observadas entre indicadores y el análisis descriptivo de las respuestas visuales obtenidas durante la inspección.

Este análisis se desarrolló bajo un enfoque comparativo y descriptivo, orientado a identificar tendencias observadas en el comportamiento de los indicadores de pH aplicados sobre elementos estructurales con diferentes condiciones de exposición. Debido al carácter exploratorio y aplicado del estudio, así como a la heterogeneidad de las condiciones de carbonatación presentes en cada elemento evaluado, no se realizaron análisis estadísticos inferenciales ni comparaciones orientadas a establecer representatividad poblacional o relaciones generalizables entre variables.

Criterios de interpretación

Los resultados fueron interpretados considerando los siguientes criterios:

El frente de carbonatación no corresponde necesariamente a una línea única, sino a una zona de transición química asociada a cambios progresivos de alcalinidad dentro del concreto (Du et al., 2023). Diferentes indicadores de pH responden a umbrales cromáticos distintos, lo cual puede generar variaciones en la profundidad observada del frente carbonatado (Li et al., 2023; Vogler et al., 2020). Las condiciones reales de inspección, incluyendo textura superficial, humedad residual y contraste visual, pueden influir en la interpretación de los indicadores durante la evaluación en campo (Loginova et al., 2023).

En consecuencia, el análisis no se orientó a identificar un valor absoluto o “real” de carbonatación, sino a comparar las profundidades observadas y las respuestas visuales registradas mediante distintos indicadores de pH aplicados bajo un mismo procedimiento experimental de inspección in situ.

La interpretación de resultados se desarrolló a partir de criterios descriptivos asociados a: la profundidad medida del frente, el contraste cromático, la nitidez de delimitación y la facilidad de interpretación visual en condiciones reales de inspección.

Estos criterios permitieron identificar alcances y limitaciones observadas en la aplicación de indicadores convencionales y alternativos sobre estructuras reales de concreto reforzado en servicio.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos evidencian diferencias sistemáticas en la profundidad del frente de carbonatación en función del indicador de pH empleado, lo cual sugiere que la delimitación observada del fenómeno puede variar de acuerdo con el intervalo de respuesta de cada reactivo y no exclusivamente con el estado del material. El registro fotográfico se realizó como se muestra en la figura 1 y se presenta en el anexo al documento.

Figura 1. Registro fotográfico muestra elemento L11.

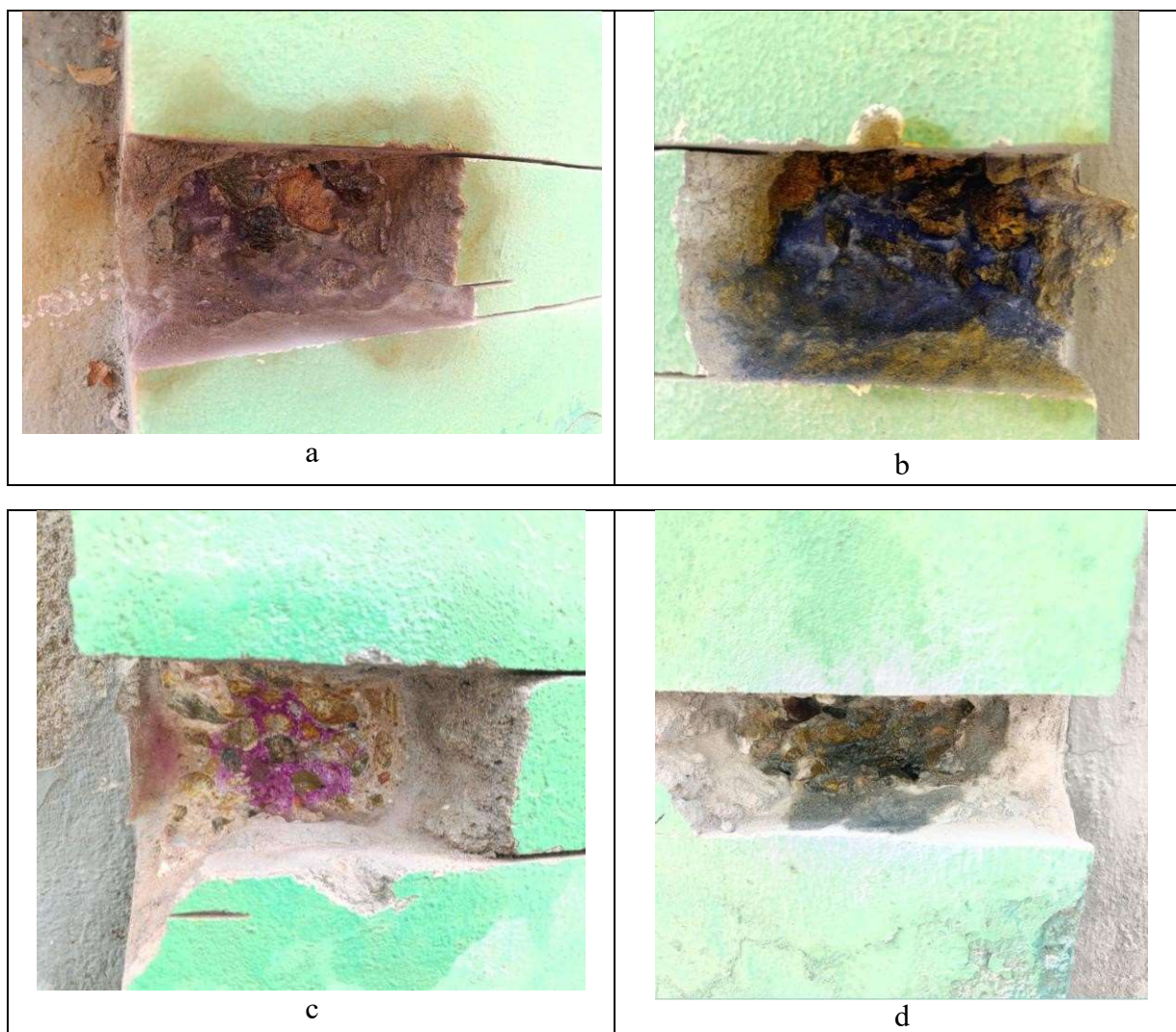


Figura 1- Exploración realizada en campo: a. Columna 1 indicador alizarina, b. Columna 1 indicador azul de timol, c. Columna 1 indicador fenolftaleína, d. Columna 1 indicador índigo carmín.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 presenta la síntesis de los valores medidos para cada indicador y elemento estructural evaluado.

Tabla 3. Información cuantitativa de la profundidad de reacción del indicador de PH.

Columna	Alizarina (mm)	Azul de timol (mm)	Fenolftaleína (mm)	Índigo carmín (mm)
L-11	53.6	42.6	78.1	84.7
N-11	84.4	30.8	40.3	87.6

Columna	Alizarina (mm)	Azul de timol (mm)	Fenolftaleína (mm)	Índigo carmín (mm)
N-10	74.0	47.0	69.5	84.0
Promedio	70.7	40.1	62.6	85.4

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 3, el azul de timol registró las menores profundidades promedio, seguido por la fenolftaleína, mientras que la alizarina y el índigo carmín evidenciaron valores superiores. Este comportamiento es consistente con la existencia de un gradiente de alcalinidad en el concreto, en el cual cada indicador responde a un umbral distinto de pH, lo que genera variaciones en la profundidad medida (Vogler et al., 2020; Li et al., 2023).

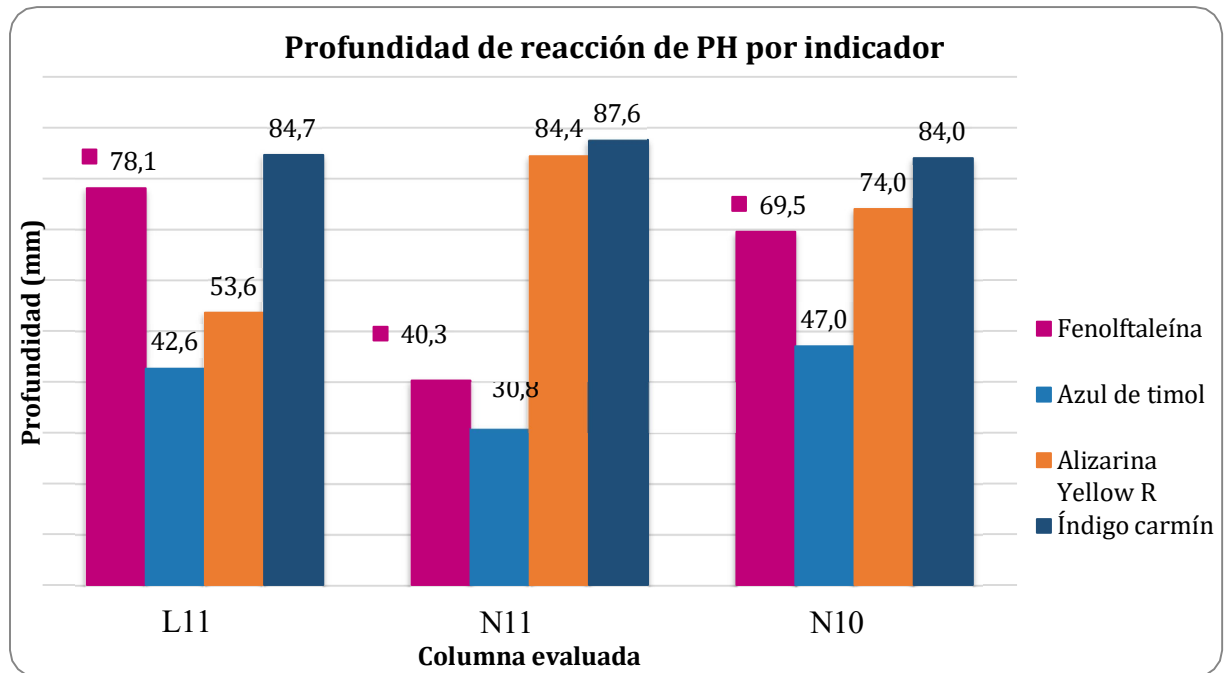
A nivel de elementos individuales, la columna N-11, presentó las mayores diferencias observadas entre indicadores, particularmente entre fenolftaleína (40.3 mm) y alizarina (84.4 mm). Esta diferencia sugiere la existencia de una zona parcialmente carbonatada, en la cual la reducción del pH no es completamente detectada por el método convencional. Este resultado es coherente con lo reportado por Du et al. (2023), quienes evidencian transformaciones químicas en regiones que aún presentan respuesta alcalina frente a la fenolftaleína.

En la columna L-11, los valores obtenidos muestran una mayor correspondencia entre fenolftaleína (78.1 mm) e índigo carmín (84.7 mm), lo que evidencia una menor diferencia observada entre ambos indicadores en comparación con otros elementos evaluados. Sin embargo, el azul de timol presentó una menor profundidad (42.6 mm), comportamiento que coincide con las limitaciones reportadas para este indicador en términos de contraste visual y sensibilidad en condiciones reales de inspección (Vogler et al., 2020).

Por su parte, la columna N-10 presentó valores intermedios, con diferencias observadas entre fenolftaleína (69.5 mm) y alizarina (74.0 mm). Este comportamiento evidencia variaciones en la profundidad registrada por los indicadores de pH aplicados sobre el mismo elemento, resultado consistente con lo reportado en estudios previos sobre estructuras reales de concreto reforzado, donde se ha señalado que las condiciones de exposición y las características del material pueden influir en la interpretación del frente de carbonatación (Li et al., 2018; Benítez et al., 2019). Los resultados correspondientes a este elemento se presentan en la gráfica 1.

Gráfica 1.

Comparación de profundidades del frente de carbonatación registradas por indicador de pH.



Fuente: Elaboración propia.

El índigo carmín registró las mayores profundidades en todos los elementos evaluados (promedio de 85.4 mm), lo cual puede asociarse a su capacidad para responder a un rango más amplio de variación de la alcalinidad. No obstante, las observaciones de campo evidenciaron una menor definición cromática en comparación con otros indicadores, lo que introduce incertidumbre en la delimitación visual del frente. Este comportamiento evidencia que la respuesta observada de los indicadores puede verse influenciada tanto por su rango de respuesta de pH como por las condiciones de aplicación e interpretación visual en campo (Vogler et al., 2020; Loginova et al., 2023).

Desde el punto de vista cualitativo, las evidencias fotográficas muestran que la fenolftaleína permite una delimitación más clara del frente de carbonatación, mientras que la alizarina y el índigo carmín presentan transiciones más difusas, asociadas a la presencia de zonas de cambio gradual en el pH del concreto. Adicionalmente, la exposición del agregado en las zonas de mayor profundidad confirma el avance significativo del proceso de carbonatación en el recubrimiento evaluado, lo cual es consistente con estructuras de larga vida útil sometidas a condiciones ambientales variables.

En conjunto, los resultados obtenidos sugieren que el frente de carbonatación no debe interpretarse necesariamente como una línea única, sino como una zona de transición cuya delimitación observada puede variar según el indicador de pH utilizado. Este comportamiento tiene implicaciones directas en la evaluación patológica de estructuras en servicio, debido a que el uso exclusivo de fenolftaleína podría conducir a una delimitación más conservadora del frente observado en comparación con otros indicadores evaluados.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados evidencian que ningún indicador por sí solo proporciona una representación completa del proceso de carbonatación. Mientras la fenolftaleína ofrece una lectura clara y operativamente viable, su alcance es limitado. Por su parte, indicadores

como la alizarina y el índigo carmín permiten identificar diferencias observadas en la delimitación visual del frente carbonatado, aunque presentan restricciones asociadas a su interpretación en condiciones reales de inspección.

Los resultados obtenidos permitieron identificar alcances y limitaciones observadas en la aplicación de distintos indicadores de pH sobre estructuras reales de concreto reforzado en servicio. Mientras la fenolftaleína presentó ventajas asociadas a la claridad visual y facilidad operativa en campo, indicadores como la alizarina y el índigo carmín evidenciaron profundidades observadas mayores y diferencias en la delimitación visual del frente carbonatado. Sin embargo, algunos indicadores alternativos presentaron limitaciones relacionadas con el contraste cromático y la interpretación en condiciones reales de inspección. Estos resultados resaltan la importancia de interpretar el frente de carbonatación bajo un enfoque comparativo y contextualizado según las condiciones de evaluación en estructuras existentes.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer que la determinación del frente de carbonatación en estructuras de concreto en servicio depende significativamente del indicador de pH empleado, lo cual introduce variabilidad en la medición y condiciona la interpretación del fenómeno. En este sentido, se confirma que la profundidad del frente carbonatado no corresponde a un valor único, sino a un rango asociado al umbral de respuesta química de cada indicador.

La comparación entre indicadores evidenció que la fenolftaleína, aunque ampliamente utilizada por su facilidad de aplicación y claridad en la respuesta cromática, presentó menores profundidades observadas frente a otros indicadores evaluados en algunos elementos. Este comportamiento sugiere que la delimitación visual obtenida mediante el método convencional puede diferir respecto a la registrada por indicadores con rangos de respuesta de pH distintos, especialmente en estructuras con prolongados periodos de exposición.

Por su parte, indicadores como la alizarina y el índigo carmín registraron profundidades observadas mayores en comparación con la fenolftaleína en algunos elementos evaluados. Sin embargo, las observaciones en campo evidenciaron que estos indicadores también presentan limitaciones relacionadas con el contraste cromático, la legibilidad y la interpretación visual en condiciones reales de inspección, lo cual puede dificultar la delimitación del frente observado.

El azul de timol presentó menores profundidades observadas y menor definición visual del frente en las condiciones evaluadas, comportamiento que limitó su aplicabilidad como herramienta principal para la inspección de carbonatación en estructuras reales.

En conjunto, los resultados sugieren que el frente de carbonatación debe interpretarse como una zona de transición química cuya delimitación observada puede variar según el indicador de pH utilizado y las condiciones reales de inspección. En este sentido, el estudio resalta la importancia de adoptar enfoques comparativos y contextualizados para la interpretación del frente carbonatado en estructuras de concreto reforzado en servicio.

Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda que la evaluación del frente de carbonatación en estructuras de concreto en servicio no se base exclusivamente en el uso de fenolftaleína, sino que incorpore el análisis comparativo con indicadores alternativos, especialmente en estudios de diagnóstico donde se requiera una mayor comprensión del estado de alcalinidad del material.

Se sugiere que los indicadores como la alizarina y el índigo carmín sean utilizados como herramientas complementarias para identificar zonas de transición en el proceso de carbonatación, teniendo en cuenta sus limitaciones en términos de interpretación visual y la necesidad de condiciones controladas de observación.

En contextos de inspección en campo, particularmente en edificaciones en servicio con restricciones de intervención como era el caso del Hospital de Neiva, se recomienda priorizar metodologías que permitan un equilibrio entre confiabilidad técnica, facilidad de aplicación y mínima invasividad, considerando que la legibilidad del indicador es un factor determinante en la calidad del diagnóstico.

Se recomienda también que futuras investigaciones incorporen métodos instrumentales complementarios, tales como análisis de difracción de rayos X (DRX), espectroscopía infrarroja (FTIR) o análisis termogravimétrico (TGA), con el fin de correlacionar las mediciones obtenidas mediante indicadores de pH con transformaciones mineralógicas del concreto.

Asimismo, se propone ampliar el número de elementos evaluados y considerar diferentes tipos de concreto, edades y condiciones ambientales, con el fin de fortalecer la representatividad de los resultados y avanzar en la construcción de criterios más robustos para la interpretación del frente de carbonatación en estructuras reales.

Finalmente, se recomienda profundizar en el desarrollo de protocolos de aplicación y lectura de indicadores alternativos, orientados a mejorar su desempeño en condiciones de campo, lo cual contribuiría a fortalecer su uso como herramientas válidas dentro de la práctica de la patología del concreto.

Referencias

Merah, A. (2024). Methods of concrete accelerated carbonation test: A review. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 53. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00057-z>

Bui, H., Delattre, F., & Levacher, D. (2023). Experimental Methods to Evaluate the Carbonation Degree in Concrete—State of the Art Review. *Applied Sciences*, 13(4), 2533. <https://doi.org/10.3390/app13042533>

Du, N., Guan, R., & Hou, P. (2023). New fluorescent pH indicators for characterizing cement carbonation. *Construction and Building Materials*, 388, 131662. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131662>

Li, B., Tian, Y., Zhang, G., Liu, Y., Feng, H., Jin, N., Jin, X., Wu, H., Shao, Y., Yan, D., Zhou, Z., Wang, S., Zhang, Z., Chen, J., Chen, X., Lu, Y., Li, X., & Wang, J. (2023). Comparison of detection methods for carbonation depth of concrete. *Scientific Reports*, 13(1), 19980. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47443-8>

Vogler, N., Lindemann, M., Drabetzki, P., & Kühne, H.-C. (2020). Alternative pH-indicators for determination of carbonation depth on cement-based concretes. *Cement and Concrete Composites*, 109, 103565. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103565>

Cui, D., Liu, W., Wang, J., Hu, J., Shan, D., Wan, Y., Wang, Q., & Wang, J. (2022). Use of a novel pH indicator extracted from petals to investigate the carbonation behavior in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104804.

Loginova, S., Razgovorov, P., & Goglev, I. (2023). Possibilities of using alizarin and neutral red indicators to determine the neutralized layer of concrete in the field. *E3S Web of Conferences*, 389, 01031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338901031>

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104804>

Li, D., Chen, B., Sun, H., Memon, S. A., Deng, X., Wang, Y., & Xing, F. (2018). Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures. *Construction and Building Materials*, 167, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.127>

Benítez, P., Rodrigues, F., Talukdar, S., Gavilán, S., Varum, H., & Spacone, E. (2019). Analysis of correlation between real degradation data and a carbonation model for concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 95, 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.019>

Fuhaid, A. F. A., & Niaz, A. (2022). Carbonation and Corrosion Problems in Reinforced Concrete Structures. *Buildings*, 12(5), 586. <https://doi.org/10.3390/buildings12050586>

Chinchón-Payá, S., Andrade, C., & Chinchón, S. (2016). Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. *Cement and Concrete Research*, 82, 87-91. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.010>

National Toxicology Program. (2021). Phenolphthalein. En 15th Report on Carcinogens. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK590820/>
e 2020.

Gómez, X., & Rodríguez, Y. (2021). *EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CARBONATACIÓN EN PUENTES VEHICULARES DE CONCRETO, LOCALIDADES DE USAQUÉN Y FONTIBÓN*. Universidad Católica de Colombia.

<https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/6386ff72-7bb4-4de6-b4d5-ecd345f7f125/content>