Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Evaluación del frente de carbonatación de una estructura de hormigón sometida a hollín de fuego.

A. Valerio[1]*, P. Helene[2]
*Autor de Contacto: allan_cava@hotmail.com
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.722

Recibido: 09/01/2024 | Correcciones recibidas: 04/12/2024 | Aceptado: 23/12/2024 | Publicado: 01/01/2025

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue comprobar la influencia del calor moderado (< 200ºC) y el hollín de los incendios en la alteración de la carbonatación del hormigón armado. Aunque este hecho ocurre naturalmente en todos los incendios pequeños y grandes, estos autores no encontraron referencias bibliográficas sobre el tema. A continuación, se realizó un experimento de exposición de probetas de hormigón a temperaturas moderadas, seguido de la impregnación de hollín durante doce meses, con la medición de la profundidad de carbonatación cada tres meses. El estudio se llevó a cabo en un ambiente de laboratorio y comparó la profundidad de carbonatación observada en probetas sometidas a moderadas temperaturas y hollín con probetas en condiciones ambientales de laboratorio. A pesar de las limitaciones naturales de un experimento con un marco temporal y ambiente de laboratorio reducidos, se evidenció que incluso en hormigones intactos, las moderadas temperaturas combinadas con la acidez del hollín aceleran las profundidades de carbonatación y pueden alterar significativamente la vida útil residual de la estructura si las medidas de intervención correctivas posteriores no tienen en cuenta este riesgo.

Palabras clave: carbonatación; hormigón armado; fuego; hollín; fumar.

Citar como: Valerio, A., Helene, P. (2025), "*Evaluación del frente de carbonatación de una estructura de hormigón sometida a hollín de fuego*", Revista ALCONPAT, 15 (1), pp. 19 - 34, DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.722

[1] Programa de Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, Brasil.
2 Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, Brasil.

Contribución de cada autor
En este trabajo el autor A. Valerio aportó el 50% de la idea original, el 90% de redacción del trabajo, el 90% de experimentación, el 100% de recolección de datos y el 50% de discusión de los resultados. P. Helene contribuyó en un 50% a la idea original, un 10% en la redacción del trabajo, un 10% en la experimentación y un 50% en la discusión de los resultados.

Licencia Creative Commons
Los derechos de autor (2025) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación
Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2025.

© 2025 ALCONPAT Internacional

Carbonation deep evaluation of a concrete structure subjected to fire soot.

ABSTRACT

The objective of this study was to verify the influence of moderate heat (< 200ºC) and soot from fires on the alteration of carbonation of concrete. Although this fact occurs naturally in all small and large fires, these authors did not find bibliographic references on the subject. An experiment of exposing concrete specimens to moderate temperatures was then performed, followed by soot impregnation for twelve months, with the measurement of carbonation depth every three months. The study was carried out in a laboratory environment and compared the depth of carbonation observed in specimens subjected to moderate temperatures and soot with specimens under laboratory environmental conditions. Despite the natural limitations of an experiment with a reduced time frame and laboratory environment, it was evidenced that even in intact concretes, the moderate temperatures combined with the acidity of the soot accelerate the carbonation depths and can significantly alter the residual service life of the structure if subsequent corrective intervention measures do not consider this risk.

Keywords: carbonation; reinforced concrete; fire; soot; smoke.

Avaliação da alteração da frente de carbonatação de estrutura de concreto submetida a fuligem de incêndio.

RESUMO

O estudo teve como objetivo verificar a influência do calor moderado (< 200ºC) e da fuligem de incêndios na alteração da profundidade de carbonatação do concreto. Apesar deste fato ocorrer naturalmente em todos os pequenos e grandes incêndios, estes autores não encontraram referências bibliográficas sobre o tema. Foi então realizado um experimento de exposição de corpos de prova de concreto a temperaturas moderadas, seguido por impregnação de fuligem por doze meses, com a medição da profundidade de carbonatação a cada três meses. O estudo foi realizado em ambiente de laboratório e comparou a profundidade de carbonatação observada em corpos de prova submetidos a moderadas temperaturas e fuligem com corpos de prova nas condições ambientais do laboratório. Apesar das limitações naturais de um experimento com prazo reduzido e ambiente de laboratório, ficou evidenciado que mesmo em concretos íntegros, as moderadas temperaturas combinadas com a acidez da fuligem aceleram as profundidades de carbonatação podendo alterar significativamente a vida útil residual da estrutura, sempre que as medidas de intervenção corretiva posterior não levem em conta esse risco.

Palavras-chave: carbonatação; concreto armado; incêndio; fuligem; fumaça.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios son, lamentablemente, muy comunes tanto en el país como en todo el mundo, a pesar de la existencia de diversas normas e instrucciones técnicas destinadas a prevenir su ocurrencia, elaboradas por la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT), el Cuerpo de Bomberos y otros institutos. Según el Instituto Sprinkler Brasil (2023), en 2022 se contabilizaron 2.041 incendios en edificaciones en todo el territorio nacional, según lo informado en la prensa, una cifra ligeramente menor pero similar a los datos de 2021, cuando se registraron 2.301 incendios.

Dado que las reparaciones en edificaciones dañadas por incendios suelen tener un gran impacto financiero, la captación de recursos generalmente se realiza a través de aseguradoras o financiadoras, lo que, en la mayoría de los casos, requiere un tiempo considerable. Además, la propia planificación para la reparación de la edificación, como la elaboración de proyectos, la cotización de proveedores, entre otras actividades, hace que el lapso temporal entre el incendio y la reparación sea a menudo extenso, abarcando desde varios meses hasta años. Durante este período, los inmuebles permanecen cerrados y con puertas y ventanas selladas por motivos de seguridad contra invasiones y saqueos, dejando la edificación en condición de "siniestro", acumulando en su interior todos los residuos restantes del incendio.

Con la captación de recursos enfocados en la realización de las reparaciones de estos inmuebles, especialmente en estructuras de concreto armado, es muy común que la atención de las intervenciones se concentre en las piezas que sufrieron daños por altas temperaturas, dado que existen diversas bibliografías sobre el tema. Por ejemplo, un estudio realizado por Feng et al. (2023) demuestra que la exposición a altas temperaturas causó una degradación severa en la resistencia a la compresión del concreto, en el módulo de elasticidad dinámico relativo y en la resistencia a la carbonatación, en muestras de concreto sometidas a temperaturas superiores a 400°C. Para estos concretos dañados por altas temperaturas, se pueden aplicar diversos métodos de recuperación y restablecimiento de su vida útil, desde refuerzos estructurales hasta métodos en estudio, como el método de recuperación cíclica agua y agua-CO_2, que puede mejorar eficazmente la resistencia a la compresión del concreto de alto desempeño dañado térmicamente tras ser calentado a más de 600°C (LIU; WANG; ZOU; LONG; MIAH; LI, 2023).

Sin embargo, las piezas que no presentan indicios visuales de haber sido sometidas a altas temperaturas suelen pasan solo por procesos de limpieza y reconstitución de revestimientos, ya que no existen referencias bibliográficas que relacionen temperaturas inferiores a 200°C con alteraciones significativas en las propiedades mecánicas del concreto armado.

No obstante, también se debe considerar el aspecto de la durabilidad. Existen bibliografías que muestran que cuerpos de prueba de concretos sometidos a temperaturas superiores a 200 °C y colocados dentro de una cámara de carbonatación sellada durante 30 días experimentaron un avance en el frente de carbonatación (OLIVEIRA; RIBEIRO; PEDROTI; FARIA; NALON; JÚNIOR, 2019). Sin embargo, este estudio se enfocó en comparar el avance del frente de carbonatación bajo enfriamientos bruscos y lentos, en un entorno donde la carbonatación fue inducida. No se encontraron, sin embargo, bibliografías que analizaran el avance del frente de carbonatación en concretos expuestos a temperaturas iguales o inferiores a 200 °C y que permanecieron en ambientes impregnados por hollín ácido.

Iwama y Maekawa (2022) también realizaron estudios con el objetivo de ampliar la aplicabilidad de la modelización multiescala en la carbonatación durante y después del calentamiento a alta temperatura, pero a temperaturas superiores a 400 °C y evaluadas durante un período de 28 días.

En este sentido, esta publicación buscó verificar la influencia del calor moderado (< 200 °C) y del hollín de incendios en la carbonatación del concreto impregnado por hollín durante un período de 12 meses, con el propósito de aclarar si las piezas de concreto que se reutilizarían en edificaciones afectadas por incendios sufren una disminución de su vida útil en términos de avance del frente de carbonatación en comparación con un concreto que no ha estado expuesto a incendios ni

impregnado de hollín.

Este estudio es relevante porque, en el concreto armado, la parte compuesta por concreto es importante no solo por su función estructural, sino también porque protege las armaduras colocadas en su interior de agentes de corrosión, tanto física como químicamente (Helene, 1993; Ribeiro et al., 2014). La protección física se refiere a la capa de concreto que evita la exposición de las armaduras a diversas variables ambientales, incluidas las llamas de incendios, lo cual varía según el espesor y la calidad del material. La protección química, por su parte, es proporcionada por el elevado pH del concreto, lo que genera una capa de pasivación derivada de la solución acuosa en los poros del concreto (Helene, 1993; Júnior et al., 2019; Oliveira, 2019).

Sin embargo, los fenómenos que reducen el pH del concreto inducen la corrosión de las armaduras debido a la despasivación (Almeida, 2019; Ribeiro et al., 2014), o pérdida de la capa de pasivación. Uno de los procesos más comunes de despasivación es la carbonatación, un fenómeno físico-químico que ocurre principalmente entre los compuestos hidratados del cemento y el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, reduciendo la alcalinidad del concreto. El CO_2 penetra en el concreto mediante un mecanismo de difusión (Helene, 1993).

En un incendio, además de las llamas (luz) y el calor (energía), existe la presencia de humo generado por gases de combustión, compuesto por pequeñas partículas sólidas quemadas de forma parcial y vapor condensado en suspensión en el aire (Rosa, 2015). Según Seito (2008), los gases tóxicos más comunes en los humos de incendio son: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), cianuro (HCN), gas clorhídrico (HCl), óxidos de nitrógeno (NOx), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y oxígeno (O_2).

Es importante destacar que el producto final del humo, el hollín, puede definirse como un conjunto de agregados irregulares de partículas de carbono resultantes de la combustión incompleta de cualquier combustible, que suelen impregnarse en las estructuras de concreto (Souza, 2002).

Por lo tanto, debido a los hechos expuestos, es relevante evaluar si un concreto reutilizado que no sufrió alteraciones en sus propiedades mecánicas ni fue sometido a altas temperaturas durante un incendio, pero que estuvo expuesto a un ambiente con intensa presencia de humo y impregnado de hollín tras el siniestro, presenta un índice de carbonatación perjudicado después de un período prolongado en este ambiente agresivo, mientras se gestionan los recursos y se planifican las reparaciones operativas y burocráticas de la estructura.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El concepto del programa experimental referente al estudio en cuestión tuvo como premisa evaluar, mediante comparación, cuerpos de prueba sometidos a una quema de incendio moderado (temperatura < 200 °C) y al hollín residual de dicha quema durante un período de un año, en relación con cuerpos de prueba similares que no estuvieron expuestos ni a la quema ni a la impregnación de hollín. Cabe destacar que el objetivo del trabajo es determinar si una estructura que sufrió un incendio a temperaturas moderadas y permaneció cubierta de hollín durante 12 meses hasta su recuperación sufrió una disminución en su vida útil en comparación con partes de una edificación que no estuvieron expuestas ni al calor ni al hollín.

Para ello, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- Se fabricaron 40 cuerpos de prueba circulares con un diámetro de 10,0 cm y una altura de 5 cm, en cuatro proporciones diferentes (un total de 160 cuerpos de prueba). Las proporciones empleadas tuvieron relaciones agua/cemento de 0,65; 0,60; 0,55 y 0,45, de acuerdo con lo establecido por la norma ABNT NBR 12655:2015 para las clases de agresividad I, II, III y IV, respectivamente. El cemento utilizado para la confección de los cuerpos de prueba fue CP II-F (conforme a la norma ABNT NBR 16.697: con 76 % de clínker + 5 % de sulfato de calcio + 10 % de material puzolánico + 9 % de material carbonático), por tratarse del insumo de mayor consumo en el país;

- De los cuerpos de prueba elaborados para cada proporción, 20 fueron sometidos a una quema limitada a una temperatura de 200°C y humo proveniente de la simulación de materiales combustibles comunes en edificaciones residenciales, durante un período de 90 minutos. En la parte superior del recinto donde se realizó la quema se instaló un termómetro para controlar la temperatura de las muestras. Este dispositivo permitió enfriar los materiales combustibles cuando la temperatura se aproximaba a los 200°C, asegurando que la temperatura de los cuerpos de prueba nunca superara dicho límite. Los 20 cuerpos de prueba restantes para cada proporción fueron preservados sin someterse al incendio;
- Inmediatamente después de la quema y la consecuente impregnación de hollín (momento denominado T0), se midió la profundidad de carbonatación en 4 cuerpos de prueba impregnados de hollín y en 4 cuerpos de prueba no impregnados, para cada proporción. Las condiciones meteorológicas al momento de la exposición al hollín (T0) fueron de 21 °C con una humedad relativa del 82 %, sin precipitaciones;
- Los 16 cuerpos de prueba impregnados de hollín se mantuvieron almacenados en un recipiente sellado, sin contacto con el ambiente externo (atmósfera), con el propósito de preservar el humo, los agentes agresivos y la atmósfera contaminada por los productos de la combustión;
- A los 91, 182, 273 y 364 días desde la fecha inicial (t=0), cada muestra (con y sin hollín) fue seccionada en el centro y sometida a un ensayo de carbonatación. Se aplicó una solución de fenolftaleína mediante aspersión perpendicular a la superficie seccionada;
- La solución de fenolftaleína se preparó con una proporción de 1 g de fenolftaleína en 50 ml de alcohol etílico. La región carbonatada, al no presentar alteración de color, indicaba un pH inferior a 8,3. La región no carbonatada presentaba un color entre rosa y rojo carmín, con un pH entre 8,3 y 9,5, o solo rojo carmín, con un pH superior a 9,5 (Andrade, 1992). Se midió el área carbonatada en cada caso (con y sin hollín);
- Se elaboraron gráficos comparativos y evolutivos entre los cuerpos de prueba expuestos al hollín durante un año y aquellos que no lo fueron;
- En paralelo, se colocó un recipiente con suelo de pH neutro dentro del recinto junto con los cuerpos de prueba impregnados de hollín, y otro recipiente con los cuerpos de prueba no impregnados. Se midió el pH en cada recipiente para verificar si el ambiente impregnado de hollín era más ácido que el ambiente no impregnado y ventilado. Estos ensayos fueron realizados debido a la sospecha de que un ambiente en una edificación que sufrió un incendio, mantenido impregnado de hollín y sellado para evitar robos (como ocurre comúnmente en Brasil en estos casos), es más agresivo (ácido) que un ambiente en una edificación que no sufrió incendio, no está impregnado de hollín y cuenta con ventilación;

A continuación, se presenta un diagrama de flujo (Diagrama de flujo 1) del programa experimental realizado, seguido de una descripción detallada de los materiales utilizados y los procedimientos ejecutados.

Diagrama de flujo 1. Diagrama de flujo del programa experimental.

2.1 Cuerpos de Prueba de Concreto

La fabricación de los cuerpos de prueba se realizó con base en las directrices relacionadas con el procedimiento para moldeado y curado de cuerpos de prueba de concreto establecidas en la norma ABNT NBR 5738. Para cada proporción de concreto, se calcularon las cantidades necesarias de cada material para las relaciones agua/cemento 0,45; 0,55; 0,60; y 0,65. Los cálculos de los materiales utilizados para cada proporción se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Cantidad de material (kg) utilizado para el moldeado de los cuerpos de prueba por proporción.

Material utilizado para el moldeado de los cuerpos – Proporción Unitaria				
Material	**Relación Agua/Cemento (a/c)**			
	0,45	**0,55**	**0,60**	**0,65**
Cemento (kg)	1,00	1,00	1,00	1,00
Arena (kg)	2,05	2,73	3,07	3,41
Grava (kg)	1,95	2,38	2,60	2,82
Agua (kg)	0,45	0,55	0,60	0,65
Aditivo (kg)	variável	variável	variável	variável
Asentamiento medido para cada proporción				
Slump (cm)	18.0	17.0	16.0	16.0

El asentamiento para las piezas de concreto fue de 16 ± 3 cm, y para corregirlo se utilizó un aditivo plastificante, cuya cantidad se presenta en la Tabla 1. Posteriormente, los cuerpos de prueba pasaron por el proceso de curado húmedo sumergido, permaneciendo sumergidos durante 7 días antes de ser retirados.

Los cuerpos de prueba excedentes fueron sometidos a ensayos realizados en el Instituto de Investigaciones Tecnológicas de São Paulo (IPT-SP) para la caracterización de sus propiedades físicas (resistencia a compresión, tracción, dimensiones, masa específica e índice de vacíos). Los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de los cuerpos de prueba fueron coherentes. Para la producción de los discos de concreto, los cuerpos de prueba de tamaño estándar de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud que habían sido moldeados fueron seccionados en cuatro (4) partes iguales, como se muestra en la Fig. 1 a continuación:

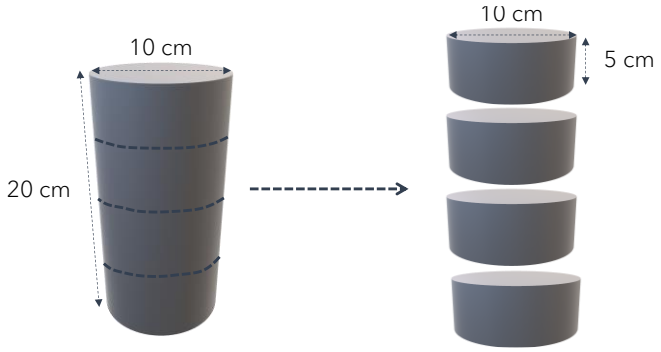


Figura 1. Ilustración del corte de los cuerpos de prueba.

Cabe destacar que los cuerpos de prueba fueron cortados en 4 discos para distribuir mejor el volumen dentro del recinto y aumentar la representatividad de los ensayos. Todos los lados fueron expuestos al ambiente impregnado de hollín, y la medición consideró los 4 lados del disco: superior, inferior y laterales.

2.2 Materiales Combustibles

Con el propósito de simular una situación similar a un incendio real en edificaciones, la selección de materiales combustibles se realizó con base en algunas especificaciones, como se describe a continuación. Basándose en la norma ABNT NBR 15575:2013, que especifica la cantidad de mobiliario en cada ambiente de una edificación estándar, se determinó la cantidad de material relacionado con los muebles. Asimismo, el área aproximada de cada ambiente se definió conforme al Anexo I del Decreto nº 57.776, que trata sobre especificaciones relacionadas con el dimensionamiento de ambientes (BRASIL, 2017). Por su parte, se utilizó la norma ABNT NBR 12721:2005 para recolectar las características constructivas de cada edificación según proyectos estándar, y en su Tabla 02 se especifican los materiales y componentes presentes en cada elemento constructivo de la edificación, como tipos de revestimientos, cubiertas, cielos rasos, entre otros.

A partir de estos datos, se calculó la cantidad de elementos constructivos, muebles y utensilios presentes en una edificación estándar, obteniendo así la cantidad de materiales combustibles por metro cuadrado de edificación residencial en kilogramos (kg/m² de material combustible). Con base en esta estimación, se procedió a calcular la cantidad relacionada con el área del recinto (en m²) y a multiplicarla por el "peso promedio" de cada elemento "por metro cuadrado de edificación". Por ejemplo, en un dormitorio se tiene: 517 kg de madera; 9,21 kg de espuma; 38 kg de tejido; 21,40 kg de elementos plásticos; y 377 kg de elementos minerales.

Tras realizar este cálculo para cada ambiente, se obtuvo un total de 75 kg de material combustible/m² de edificación, con una proporción del 24 % de madera; 2 % de espuma y tejido; 2 % de plástico; y 72 % de elementos minerales como cerámicas, yeso y cielos rasos de fibra, que, aunque no son combustibles, pueden contener esmaltes y materiales agregados que influyen en la composición del hollín. Esta cantidad de materiales se ajustó proporcionalmente al área del recinto, definiéndose que se implementarían hasta 17,23 kg de materiales, distribuidos de la siguiente manera: 6,56 kg de madera; 0,13 kg de espuma; 0,38 kg de tejido; 0,63 kg de plástico; y 9,53 kg de materiales minerales, incluyendo cerámicas.

Debido a las limitaciones de espacio en el interior del recinto, las cantidades mencionadas se dividieron en 4 porciones de 4,31 kg, que se introdujeron respetando las proporciones durante todo el período de quema.

2.3 Recinto

Para realizar la quema del material se adquirió un ahumador adaptado, en el cual el humo podía pasar al interior de la parte superior donde se encontraban los cuerpos de prueba, pero el área de quema estaba aislada en la parte inferior del dispositivo, de modo que no había contacto directo de

los cuerpos de prueba con el fuego.
Este ahumador, hecho de acero inoxidable, tenía en su parte superior 5 bandejas perforadas donde podían almacenarse los cuerpos de prueba, y en su parte inferior, una bandeja lisa donde se almacenaban los productos de la quema.
Entre los compartimentos superior e inferior se encontraba una chapa metálica con placas cerámicas que minimizaban la transmisión de calor desde el área de quema hacia la parte superior donde se almacenaban los cuerpos de prueba.
El recinto tenía 50 cm de ancho, 40 cm de profundidad y 1,55 m de altura. Además, contaba con un termómetro en la parte superior para controlar la temperatura, asegurando que no superara los 200 °C. Esto es importante porque, a partir de esta temperatura, comienza la deshidratación del C-S-H, generando silicatos anhidros y provocando pérdida de resistencia (Neville, apud, Costa, Figueiredo, & Silva, 1997).

Figura 2. Ahumador utilizado como recinto para la quema de los cuerpos de prueba.

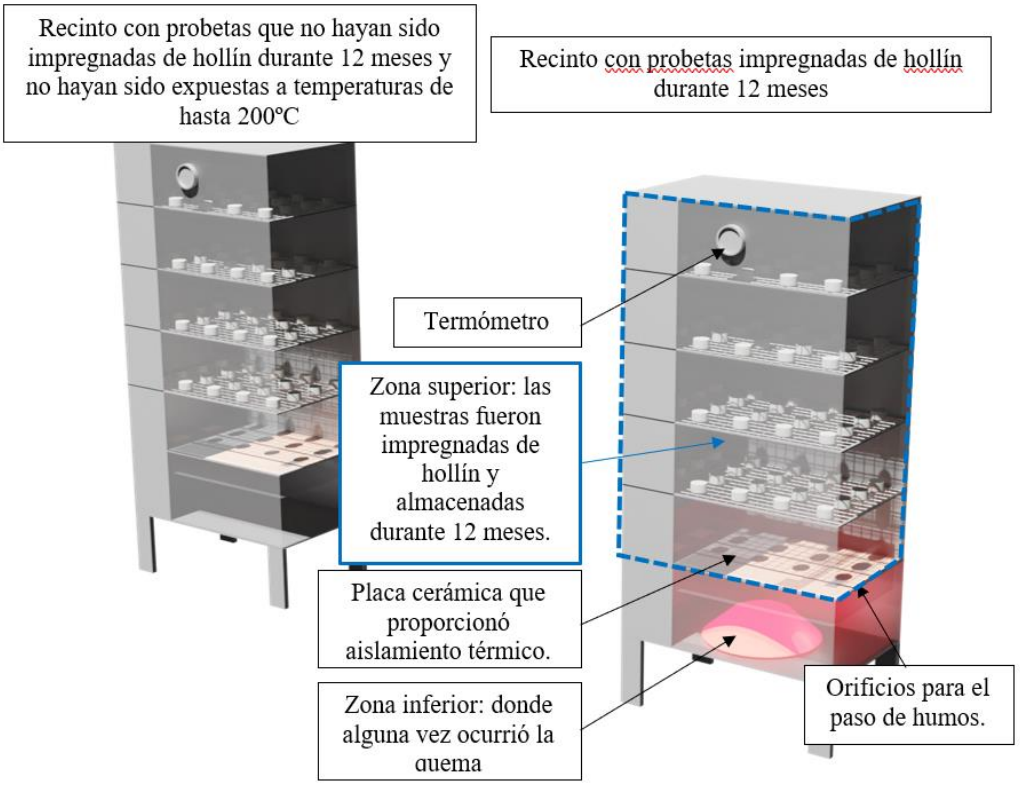


Figura 3. Esquema del ahumador utilizado como recinto para la quema de los cuerpos de prueba.

2.4 Suelo con pH Neutro

Con el propósito de comparar el índice de pH, se colocó un recipiente con suelo (arcilla roja) fuera del recinto, mientras que otro se introdujo dentro del recinto y, en consecuencia, quedó expuesto al humo.

No existe una normativa específica para esta medición, por lo que la definición de esta metodología se realizó de manera empírica, con el objetivo de obtener datos que permitieran evaluar, aunque no de manera precisa, si existen diferencias entre las condiciones atmosféricas de un ambiente impregnado de hollín y un ambiente que no lo está.

Estas pruebas se programaron para representar el ambiente de un edificio que sufrió un incendio, impregnado de hollín y sellado para evitar robos. En estas condiciones, se presume que el ambiente tiende a ser más agresivo (ácido) que el de un edificio que no sufrió un incendio, no está impregnado de hollín y está ventilado.

También se evaluó la alteración del pH en un material neutro y similar, impregnando una muestra con hollín durante 12 meses y dejando otra sin impregnar.

2.5 Proceso de Quema del Material Combustible e Impregnación de Hollín en el Recinto y Cuerpos de Prueba

En la bibliografía consultada, no se encontraron normas técnicas que orientaran ensayos similares para la impregnación de hollín en cuerpos de prueba sin contacto con la temperatura. Por lo tanto, el criterio de quema consistió en realizarla en la parte inferior del recinto, como se muestra en la Figura 4, mientras que los cuerpos de prueba se colocaron en el interior (parte superior) del recinto (Figura 5). Se utilizaron 20 discos de cada proporción, que fueron expuestos al humo sin contacto directo con la llama, junto con un recipiente con tierra colocado dentro del recinto.

Simultáneamente, se dejaron otros 20 discos de cuerpos de prueba de cada proporción y un recipiente con tierra fuera del recinto, los cuales no estuvieron expuestos al humo.

La quema del material se realizó con el recinto cerrado durante 90 minutos, el tiempo máximo de TRRF (Tiempo Requerido de Resistencia al Fuego, Júnior, 2011) según lo establecido por la norma NBR 14432 (ABNT, 2001), que especifica los requisitos de resistencia al fuego para elementos constructivos de edificaciones residenciales de hasta 30 m (edificios de hasta 10 pisos).

Durante la quema, se monitoreó la temperatura para garantizar que no superara los 200°C, ya que a partir de esta temperatura podrían comenzar las primeras modificaciones significativas en la microestructura del concreto.

Figuras 4 y 5. Izquierda: Materiales para quema en el interior del recinto. Derecha: Cuerpos de prueba dispuestos dentro del recinto, con cada proporción ubicada en un nivel del recinto.

2.6 Proceso de Medición del Frente de Carbonatación de los Cuerpos de Prueba

El procedimiento para medir el frente de carbonatación consistió en seccionar los cuerpos de prueba en su centro y aplicar, mediante aspersión, una solución de fenolftaleína perpendicularmente a la superficie seleccionada. La Figura 6 muestra las etapas de este proceso.

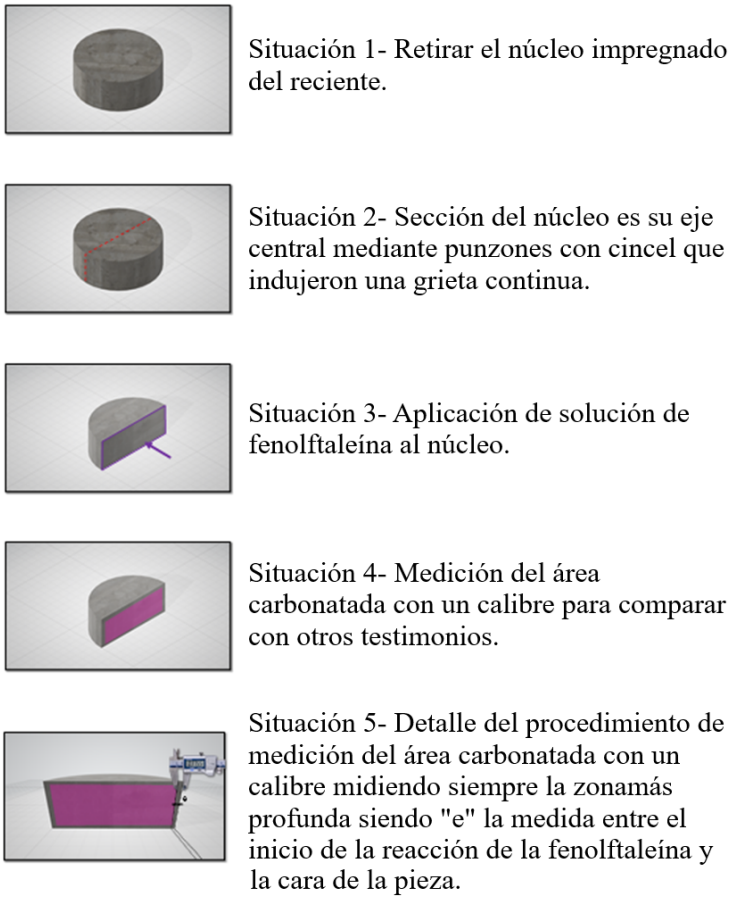


Figura 6. Ilustración del procedimiento de aspersión de la solución de fenolftaleína.

Figura 7. Medición del área carbonatada.

La medición del área carbonatada se realizó en cuerpos de prueba con y sin impregnación de hollín. Se determinó el espesor carbonatado y, al final del proceso, se elaboró un gráfico comparativo entre

las mediciones realizadas en los cuerpos de prueba dentro del recinto y aquellos fuera del recinto, para identificar si existía una alteración en el frente de carbonatación que pudiera disminuir la vida útil del concreto.
El mismo procedimiento se llevó a cabo en cuerpos de prueba no impregnados con hollín, con la finalidad de comparar los resultados con aquellos impregnados.
La medición del frente de carbonatación en los cuerpos de prueba impregnados con hollín se realizó en los siguientes períodos: 0 días (inmediatamente después de la quema), 91, 182, 273 y 364 días después de la quema de los materiales combustibles (3, 6, 9 y 12 meses, respectivamente). Estos materiales permanecieron almacenados dentro del recinto donde se llevó a cabo la impregnación de hollín, manteniendo las condiciones posteriores a la quema, es decir, sin ninguna intervención de limpieza.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Medición del pH en los Recipientes con Suelo de pH Inicialmente Neutro

La diferencia de pH en los recipientes con suelo fue medida en recipientes dispuestos dentro y fuera del envoltorio, comparándose estos resultados en los mismos periodos en que se retiraron las muestras impregnadas y no impregnadas con hollín.
Los resultados de la medición del pH del suelo en los recipientes colocados fuera o dentro del envoltorio mostraron que se verificó un pH más bajo en la muestra colocada dentro del envoltorio (expuesta al hollín residual), en el orden de 5,5, mientras que la muestra almacenada en un envoltorio no impregnado con hollín alcanzó niveles de pH que variaron entre 6,0 y 7,0.

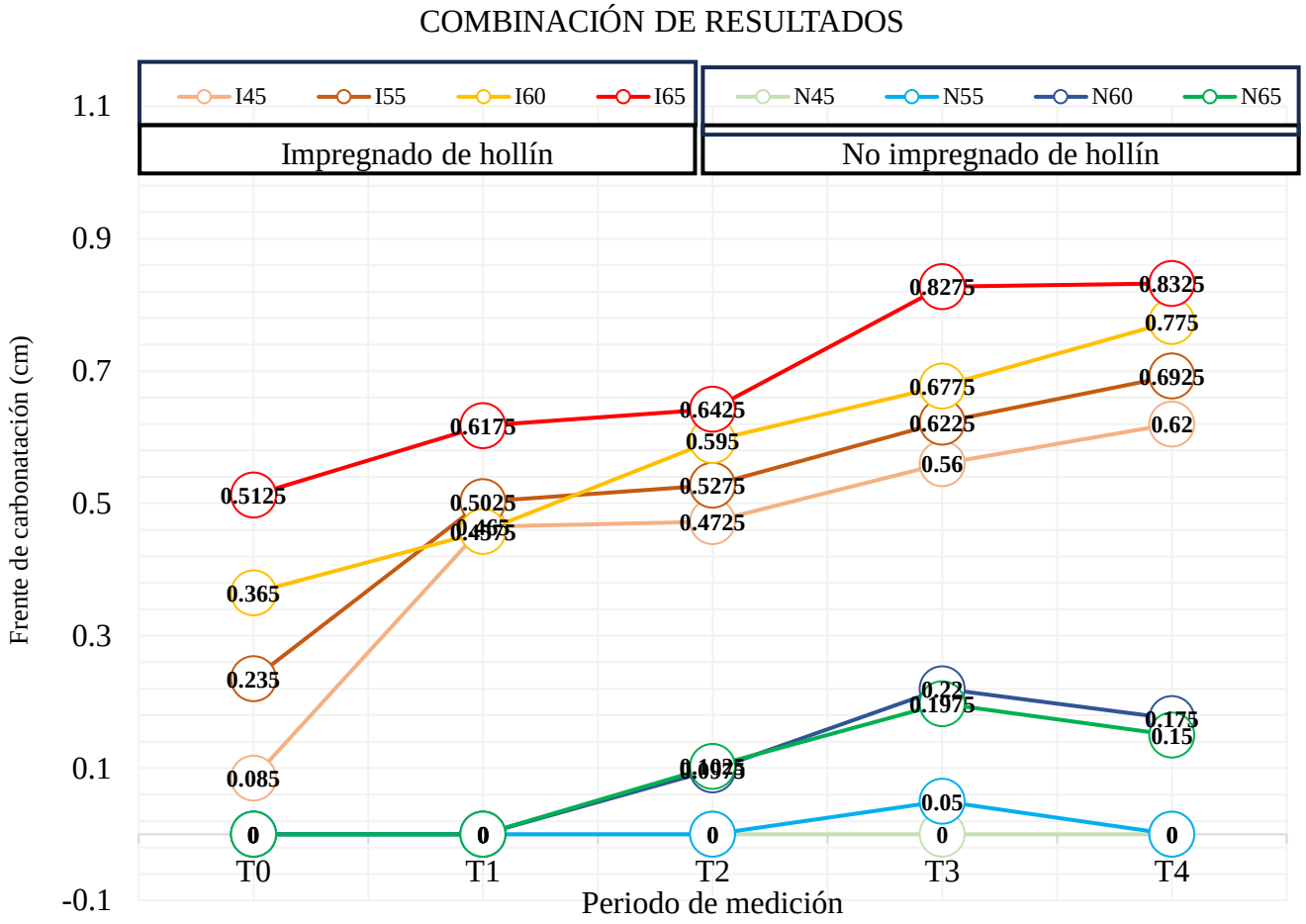
Tabla 2. Resultados de la medición del pH en los recipientes con suelo inicialmente neutro, en cada envoltorio

Medición del pH en los recipientes con suelo inicialmente neutro, en cada envoltorio						
Momento		**T0**	**T90**	**T180**	**T270**	**T360**
Fecha		**19/6/22**	**24/9/22**	**16/12/22**	**16/3/23**	**14/6/23**
PH Suelo	**Impregnado**	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
	No Impregado	6,00	6,00	6,00	6,00	7,00

3.2 Frontera de Carbonatación en los Cuerpos de Prueba a lo Largo del Tiempo

El Gráfico 1 muestra la frontera de carbonatación del concreto, en diferentes proporciones, tanto impregnadas (tonos rojos) como no impregnadas (tonos azules). Basándose en estos datos, se puede observar, de forma general, que el transcurso del tiempo (0 a 364 días) está relacionado con el aumento de la carbonatación, tanto para los cuerpos de prueba impregnados como no impregnados. Esto demuestra una tendencia natural de carbonatación —aunque relativamente lenta en condiciones naturales— debido a las condiciones comunes del ambiente, como la exposición a los gases presentes en la atmósfera, según lo ya descrito en la literatura (Costa, 2012).
Sin embargo, es posible observar que la frontera de carbonatación avanzó a mayor velocidad en los cuerpos de prueba que fueron sometidos a temperaturas de hasta 200ºC en el proceso de combustión y que posteriormente estuvieron 365 días sometidos a intensa impregnación de hollín y a un ambiente agresivo post-incendio.

Gráfico 1. Frontera de carbonatación a lo largo del tiempo entre los cuerpos de prueba no impregnados e impregnados para todas las proporciones de concreto.



Se presentan también los resultados compilados en formato de tabla (Tabla 3), para una mejor comprensión:

Tabla 3. Frontera de carbonatación a lo largo del tiempo entre los cuerpos de prueba no impregnados e impregnados para todas las proporciones de concreto, con una barra de datos correspondiente al avance de la frontera de carbonatación. (fuente: autor)

Caja	Traza basada en la relación agua-cemento	Resultados promedio obtenidos (en cm)				
		T0	T90	T180	T270	T360
		19/6/22	24/9/22	16/12/22	16/3/23	14/6/23
Impregnado por hollín	0,45	0,09	0,47	0,47	0,56	0,62
	0,55	0,24	0,50	0,53	0,62	0,69
	0,6	0,37	0,46	0,60	0,68	0,78
	0,65	0,51	0,62	0,64	0,83	0,83
No impregnado por hollín	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,55	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
	0,6	0,00	0,00	0,10	0,22	0,18
	0,65	0,00	0,00	0,10	0,20	0,15

A continuación, se presentan imágenes de los cuerpos de prueba después de la medición de la frontera de carbonatación con fenolftaleína.

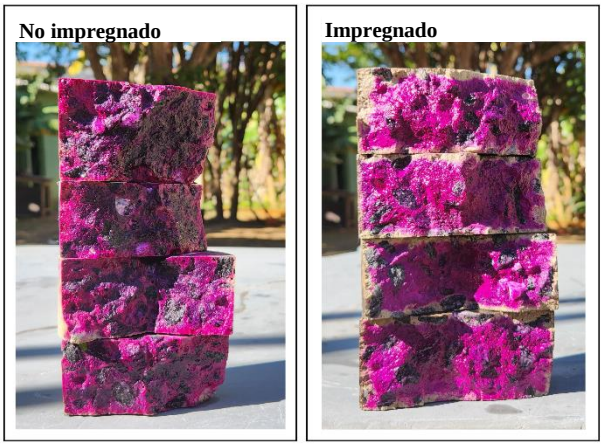


Figura 8. Comparación de la medición de la frontera de carbonatación con fenolftaleína, en la proporción de relación agua/cemento 0,45, al final de los 360 días del experimento.

Figura 9. Comparación de la medición de la frontera de carbonatación con fenolftaleína, en la proporción de relación agua/cemento 0,55, al final de los 360 días del experimento.

Figura 10. Comparación de la medición de la frontera de carbonatación con fenolftaleína, en la proporción de relación agua/cemento 0,60, al final de los 360 días del experimento.

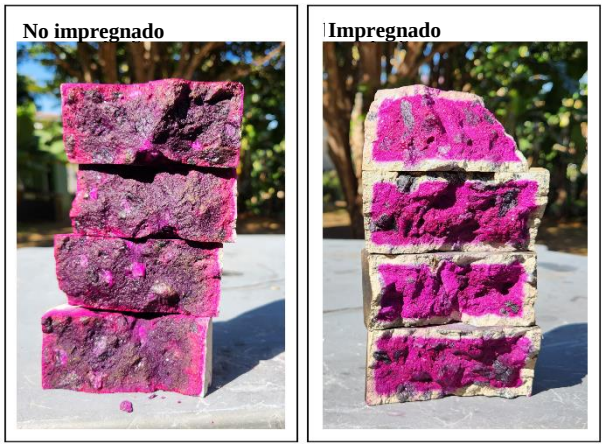


Figura 11. Comparación de la medición de la frontera de carbonatación con fenolftaleína, en la proporción de relación agua/cemento 0,65, al final de los 360 días del experimento.

De inmediato, fue posible observar que los valores de carbonatación presentes en la columna T0 del gráfico demuestran que el avance de la frontera de carbonatación inmediatamente después de la quema del material y la impregnación de hollín fue de 0,085 cm para la proporción a/c 0,45; 0,235 cm para la proporción a/c 0,55; 0,365 cm para el panel a/c 0,60; y 0,5125 cm para el panel a/c 0,65.

Existen valores que parecen negativos, ya que la medición se realizó con un pie de rey. Si se analizan las diferencias que aparecen como negativas, estas son del orden de 0,02 cm, lo cual está sujeto a variaciones debido a errores de lectura, diferencias en la penetración de la frontera de carbonatación de una muestra a otra, entre otras imprecisiones inherentes al método.

Desde el punto de vista de los autores, lo importante es comprender que existe una tendencia que indica que el concreto impregnado con hollín y expuesto durante 12 meses en un ambiente agresivo presenta un mayor avance de la frontera de carbonatación en comparación con el concreto que no fue sometido a incendios.

En la Tabla 3 aún es posible verificar una diferencia significativa entre los índices de carbonatación de los especímenes expuestos o no al hollín (impregnados / no impregnados). El concreto impregnado presentó un índice mayor de carbonatación para todas las proporciones, conforme a la hipótesis propuesta al inicio de este estudio, mientras que el concreto no impregnado mostró un nivel más bajo a lo largo del tiempo. Esta diferencia entre los grupos (impregnados / no impregnados) se mantuvo durante todo el período analizado, demostrando de manera más consistente la tendencia ya observada anteriormente respecto a la influencia de la exposición al hollín y a una temperatura moderada, incluso sin contacto con el fuego, en el avance del frente de carbonatación.

Con base en la ecuación desarrollada por Tuutti (1982), se calculó el índice de carbonatación (k) para el frente de carbonatación de los especímenes impregnados con hollín y no impregnados. La ecuación mencionada se representa a continuación:

$$Xc = k \,.\sqrt{t}$$

Donde:

Xc = espesor carbonatado en mm (milímetros);

t = tiempo en años;

k = depende de la difusividad efectiva de CO_2 a través del concreto y de la presencia de agua (TUUTTI, 1982).

A partir de estos cálculos, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4. Comparación sobre el avance de la carbonatación en el concreto impregnado y no impregnado en doce meses. (fuente: autor)

ID		COMPARACIÓN ENTRE ADVANCE IMPREGNADO Y NO IMPREGNADO				Tiempo estimado para alcanzar 2 cm o 20 mm (años)	Vida útil residual (años)
		Xc (mm)	t (ano)	K (cm/ano)	Carbonatación comparativa (Impregnado / No Impregnado)		
45	Impregnado	6,20	1,00	6,20	620%	10,41	9,41
	No impregnado	1,00	1,00	1,00		400,00	399,00
55	Impregnado	6,93	1,00	6,93	693%	8,34	7,34
	No impregnado	1,00	1,00	1,00		400,00	399,00
60	Impregnado	7,75	1,00	7,75	443%	6,66	5,66
	No impregnado	1,75	1,00	1,75		130,61	129,61
65	Impregnado	8,33	1,00	8,33	555%	5,77	4,77
	No impregnado	1,5	1,00	1,50		177,78	176,78

De esta manera, es posible evaluar que los concretos que fueron sometidos a una temperatura moderada y quedaron impregnados con hollín residual de esta combustión durante un período de 12 meses tienen un índice de difusividad efectiva de carbonatación hasta 6,93 veces mayor que los concretos que no fueron impregnados y estuvieron expuestos a ambientes con concentración de hollín.

4. CONCLUSIONES

A partir del experimento realizado en este estudio, queda evidente que la acción combinada de temperaturas moderadas (inferiores a 200ºC) con la impregnación de hollín durante largos períodos (en este caso, 12 meses) está relacionada con la aceleración del avance del frente de carbonatación. Esta información es relevante para el planeamiento y ejecución de la recuperación de estructuras que han sido sometidas a incendios y que se reutilizarán.

Con base en la medición del pH, aunque imprecisa debido a las limitaciones del equipo utilizado, queda claro que el ambiente impregnado con hollín tiene una mayor acidez en comparación con un ambiente que no está impregnado.

La microfisuración y la dilatación de los poros residuales a temperaturas limitadas a 200ºC, sumadas al hecho de un ambiente más agresivo, resultan en un avance del frente de carbonatación en concretos impregnados con hollín durante un período de 12 meses, que puede ser hasta más de 6 veces mayor que en concretos que no han sido impregnados con hollín y no han estado expuestos a temperaturas de hasta 200ºC.

Por lo tanto, para concretos que han sufrido daños por altas temperaturas, existen diversas bibliografías que indican la extensión de los daños y cómo tratar estos elementos constructivos. Sin embargo, para concretos que no han estado expuestos a altas temperaturas pero han sido impregnados con hollín, se recomienda una limpieza y remoción del hollín para no comprometer la vida útil de la estructura remanente.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Investigaciones Tecnológicas de São Paulo (IPT-SP), representado por el Profesor Dr. Cláudio Mitidieri Filho, y a PhD Engenharia.

6. REFERENCIAS

Andrade, J. J. O. **(**2001), *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos.* Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 277 f.

Araújo, A. (2013), *Estudo de corrosão em estruturas de concreto.* Reunião do Grupo de Gestão e Controle de Corrosão do E&P - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Rio de Janeiro.

Bastos P. S. (2019), *Fundamentos do Concreto Armado.* Universidade Estadual Paulista. Bauru, 96 p.

BRASIL (2017), *Decreto nº 57.776 de 7 de julho de 2017.* Regulamenta a Lei nº 16.642, de 9 de maio de 2017, que aprovou o Código de Obras e Edificações do Município de São Paulo; define os membros da Comissão de Edificações e Uso do Solo - CEUSO. Câmara Municipal de São Paulo.

Britez, C. A. (2011), *Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas*. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 252 f.

Costa, V. C. M. (2012), *Influência da corrosão generalizada na aderência e comportamento estrutural de elementos de concreto armado.* Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 180 f.

Cunha, A. C. Q., Helene, P. R. L. (2001), *Despassivação das Armaduras de Concreto por Ação da Carbonatação.* Boletim Técnico - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

Fernandes, B., Gil, A. M., Bolina, F. L., Tutikian, B. F. (2017), *Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: pHysico-chemical changes and analysis techniques.* Revista IBRACON de Estruturas e Materiais 10(4):838-863. https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000400004

Fialho, R. F., Seibt, B. H., Carrijo, S. A. (2019), *Um estudo sobre a despassivação da armadura com ênfase na causada por carbonatação do concreto.* In: Anais Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar & Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar.

Figueiredo, E. P. (2005), *Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: Isaia, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações.* São Paulo: Ibracon, V.2, cap. 27, p.829 – 855.

Fonseca, L. A. C., Corrêa, M. R., Silva, R. M. (2013), *Projeto de edifícios em concreto armado*. Volume 1. Oficina de Textos.

Helene, P. R. L. (1986), *Corrosão em armaduras para concreto armado*. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Helene, P. R. L. (1993), *Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armadura de Concreto Armado*. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 231.

Instituto Sprinkler Brasil [s. d.], *Estatísticas*. Disponível em <https://sprinklerbrasil.org.br/instituto-sprinkler-brasil/estatisticas/>. Acesso em 20 mar 2023.

Júnior, F. B., Pereira, J. E., Ádria A., Nobre, G. G., Coelho Junior, R. S., de Oliveira, I. P. (2019). Avaliação de estrutura de concreto armado após situação de incêndio: estudo de caso em Brasília / Evaluation of reinforced concrete structure after fire situation: a case study in Brasília. *Brazilian Journal of Development*, *5*(11), 23870–23888. https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-085

Júnior, K. O. (2011), *Pilares de concreto armado em situação de incêndio submetidos à flexão normal composta*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.

Ribeiro, D. V., Sales, A., Sousa, C. A. C., Almeida, F. C. R., Cunha, M- P. T., Lourenco, M. Z., Helene, P. (2014), *Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise.* Campus, Elsevier.

Rosa, R. C. (2015), *Prevenção e Combate à Incêndios e Primeiros Socorros.* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – RS, Campus Porto Alegre, RS, Brasil.

Seito, A. I., Gill, A. A., Pannoni, F. D., Ono, R., Silva, S. B., Carlo, U., Silva, V. P. (2008), *A Segurança Contra Incêndio no Brasil.* Projeto Editora: São Paulo.

Feng, M., Li, M., Qu, H., Tian, D., Lu, M., Gui, T., Li, G. (2023), *Degradation mechanism and evaluation of the carbonation resistance of concrete after high-temperature exposure.* Structures, v. 58, p. 105621, http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105621.

Liu, T., Wang, H., Zou, D., Long, X., Miah, M-J., Li, Y. (2023), *Strength recovery of thermally damaged high-performance concrete subjected to post-fire carbonation curing.* Cement And Concrete Composites, v. 143, p. 105273, http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105273.

Oliveira, J. A., Ribeiro, J. C. L., Pedroti, L. G., Faria, C. S.; Nalon, G. H., Oliveira Júnior, A. L. (2019), *Durability of Concrete After Fire Through Accelerated Carbonation Tests.* Materials Research, v. 22, n. 1, 2019. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2019-0049.

Iwama, K., Maekawa, K. (2022), *Modeling of carbonation, de-carbonation and re-carbonation processes of structural concrete subjected to high temperature heating*. Cement And Concrete Composites, v. 129, p. 104493. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104493