

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

A. Valerio^{1*} , P. Helene² 

* Autor de Contato: allan_cava@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.722>

Recebido: 09/01/2024 | Correções recebidas: 04/12/2024 | Aceito: 23/12/2024 | Publicado: 01/01/2025

RESUMO

O estudo teve como objetivo verificar a influência do calor moderado (< 200°C) 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.

Citar como: Valerio, A., Helene P. (2025), "Avaliação da alteração da frente de carbonatação de estrutura de concreto submetida a fuligem de incêndio", 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.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor A. Valerio contribuiu com a ideia original em 50%, redação do trabalho em 90%, experimentação em 90%, coleta de dados em 100% e discussão dos resultados em 50%. P. Helene contribuiu com a ideia original em 50%, redação do trabalho em 10%, experimentação em 10% e discussão dos resultados em 50%.

Licença Creative Commons

Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no (primeiro, segundo ou terceiro) número do ano AAAA, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do (primeiro, segundo ou terceiro) número do ano de AAAA.

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 ($< 200^{\circ}\text{C}$) 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.

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

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue comprobar la influencia del calor moderado ($< 200^{\circ}\text{C}$) 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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Incêndios são infelizmente muito comuns no país e por todo o mundo, apesar de existir diversas normas e instruções técnicas destinadas à prevenção de ocorrências, elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Corpo de Bombeiros, entre outros institutos. Segundo o Instituto Sprinkler Brasil (2023) em 2022 foram contabilizadas ocorrências de 2.041 incêndios em edificações pelo território nacional, conforme noticiado na imprensa, número um pouco menor, mas semelhante aos dados de 2021, em que foram registrados 2.301 incêndios.

Como os reparos em edificações que foram danificadas por incêndios usualmente tem grande impacto financeiro, a maioria das vezes a captação de recursos é realizada a partir de seguradoras ou financiadoras, o que geralmente, requer um tempo considerável. Além disso o próprio planejamento para reparo da edificação, como elaboração de projetos, cotação de fornecedores, entre outras atividades faz com que o lapso temporal entre incêndio e reparo muitas vezes seja extenso, de vários meses, até anos. Durante esse tempo, os imóveis ficam trancados e com portas e janelas lacradas por motivos de segurança contra invasões e saques, deixando a edificação em condição “sinistrada”, armazenando em si todo o restante dos resíduos do incêndio.

Com a captação de recursos com foco para realização dos reparos destes imóveis, principalmente para estruturas de concreto armado, é muito comum que a atenção das intervenções se volte às peças que sofreram danos por altas temperaturas, uma vez que existem diversas bibliografias a respeito do tema. Porém peças que não apresentam indícios visuais de submissão à altas temperaturas usualmente passam apenas por processo de limpeza e reconstituição dos revestimentos, pois não há referências bibliográficas que relacionem temperaturas inferiores à 200°C com alterações significativas nas propriedades mecânicas do concreto armado. Todavia, o aspecto da durabilidade também deve ser levado em consideração, e estes autores não encontraram bibliografias a respeito deste tema.

Neste sentido, esta publicação buscou verificar a influência do calor moderado ($< 200^{\circ}\text{C}$) e da fuligem de incêndios na carbonatação do concreto que ficou impregnado por fuligem por um período de 12 meses, com a intenção de esclarecer se as peças de concreto que seriam reaproveitadas em edificações assoladas por incêndio sofrem um decréscimo de sua vida útil no que diz respeito à frente de carbonatação, em relação a um concreto que não passou por incêndio e impregnação de fuligem.

Este estudo torna-se relevante pois sabe-se que no concreto armado, a parte composta pelo concreto é importante não somente pela sua função estrutural, mas também porque tem a função de proteger a armadura, que é colocada em seu interior, de agentes de corrosão, tanto de forma física quanto química (Helene, 1993; Ribeiro et al., 2014). A primeira se refere à própria camada física que é composta pelo concreto, evitando a exposição da armadura a diversas variáveis do ambiente, inclusive a eventos de incêndio, o que varia conforme a espessura e qualidade do material. A segunda diz respeito a uma proteção química conferida pelo concreto devido a seu pH elevado, a qual é definida como camada passivadora, sendo proveniente da solução aquosa dos poros do concreto (Helene, 1993; Júnior et al., 2019; Oliveira, 2019).

Porém fenômenos que reduzem o pH do concreto, acabam por induzir a corrosão da armadura devido à desp passivação (Almeida, 2019; Ribeiro et al., 2014), ou perda da camada passivadora. Um dos processos mais comuns para esta desp passivação é a carbonatação, que é um fenômeno físico-químico que ocorre principalmente entre os compostos hidratados do cimento e o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, reduzindo a alcalinidade do concreto. O CO_2 penetra para o interior do concreto por um mecanismo de difusão (Helene, 1993).

Em um incêndio, além da chama (luz) e calor (energia), existe a presença da fumaça que é gerada por gases de combustão, constituídas por pequenas partículas sólidas que foram queimadas de forma parcial e por vapor condensado que se apresenta em suspensão no ar (Rosa, 2015). Segundo

Seito (2008), os gases tóxicos mais comuns nas fumaças de incêndio são: monóxido de carbono (CO), gás carbônico (CO₂), cianeto (HCN), gás clorídrico (HCl), óxidos de nitrogênio (NO_x), gás sulfídrico (H₂S) e gás oxigênio (O₂).

É importante destacar que o produto final da fumaça que é a fuligem, pode ser definida como um conjunto de agregados irregulares de partículas de carbono provenientes da queima incompleta de qualquer combustível, e que usualmente se impregna nas estruturas de concreto (Souza, 2002).

Portanto, devido aos fatos expostos, torna-se relevante avaliar se um concreto que será reaproveitado por não ter suas propriedades mecânicas alteradas e que não passou por incêndio de altas temperaturas, porém que ficou submetido a intensa submissão de fumaça durante incêndio, e impregnado por fuligem após a ocorrência, tem índice de carbonatação prejudicado se ficar neste ambiente agressivo por período de tempo elevado, enquanto são angariados recursos, e são feitos planejamentos operacionais e burocráticos para início dos reparos na estrutura.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O conceito do programa experimental referente ao estudo em epígrafe teve como premissa avaliar por comparação corpos de prova que foram submetidos a uma queima de incêndio moderado (temperatura < 200°) e à fuligem residual desta queima por um período de um ano, em relação à corpos de provas semelhantes e que não passaram por queima e impregnação de fuligem., cabendo reforçar que o objetivo do trabalho é avaliar se uma estrutura que sofreu incêndio em temperaturas moderadas e ficou coberta de fuligem por 12 meses até sua recuperação sofreu diminuição em sua vida útil em comparação a partes de uma edificação que não sofreu incêndio.

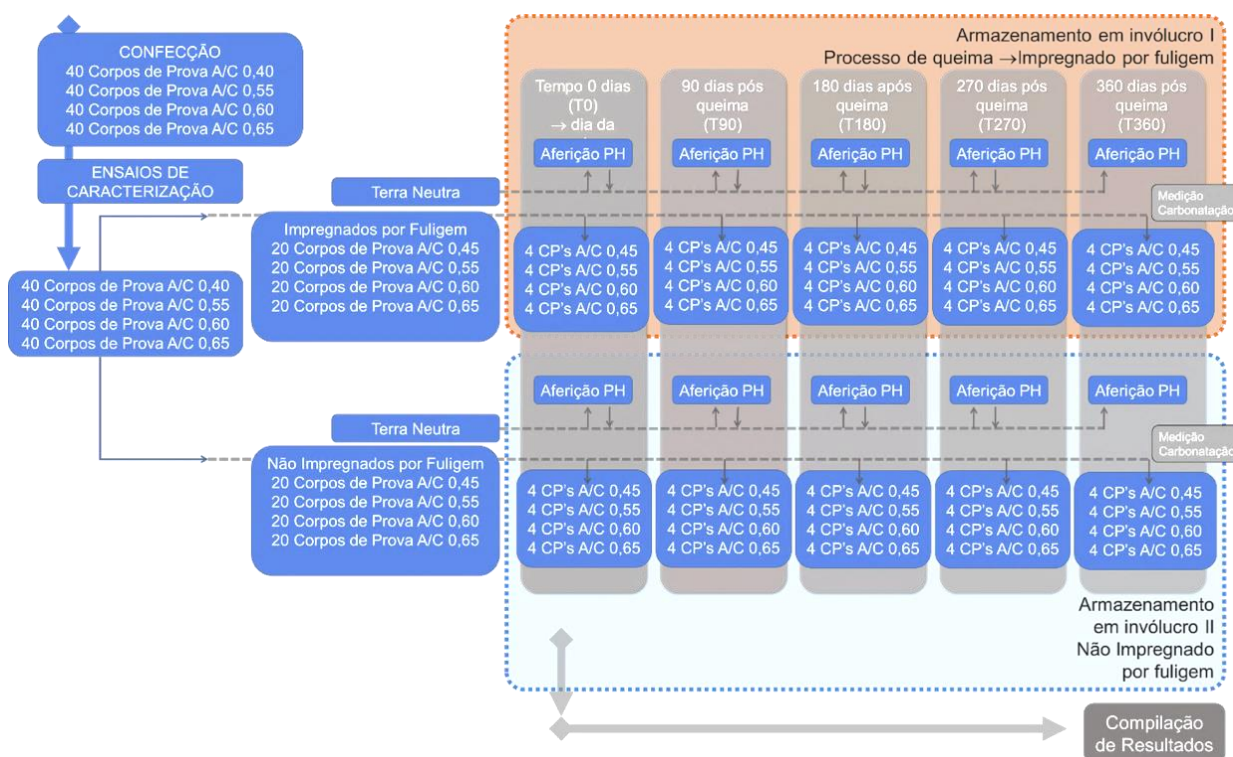
Para isso, foram feitas as seguintes etapas:

- ◆ Primeiramente foram executados 40 corpos de prova, circulares, com diâmetro de 10,0cm com altura de 5cm, em quatro traços diferentes (totalizando 160 corpos de prova), sendo estes com relação água/cimento de 0,65; 0,60; 0,55 e 0,45, conforme preconizado pela ABNT NBR 12655:2015 para as classes de agressividade I, II, III e IV respectivamente. O cimento utilizado para a confecção dos corpos de prova foi o CP II-F (atendendo a ABNT NBR 16.697 com 76% de clínquer + 5% sulfato de cálcio + 10% de material pozolânico + 9% de material carbonático) por se tratar do insumo de maior consumo no país;
- ◆ Dos corpos de prova executados para cada traço, 20 foram submetidos à uma queima limitada à temperatura de 200°C e fumaça proveniente de incêndio simulando materiais combustíveis encontrados em uma edificação residencial, por um período de 90 minutos. No topo do invólucro em que foi feita a queima havia um termômetro que permitia controlar a temperatura em que as amostras eram armazenadas. Com este dispositivo, quando a temperatura se aproximava dos 200°C, foram resfriados os materiais combustíveis para diminuir sua temperatura e, conseqüentemente, o invólucro. Isso garantiu que a temperatura nos corpos de prova não fosse alta. Os 20 corpos de prova restantes para cada traço foram preservados;
- ◆ Logo após a queima e conseqüente impregnação de fuligem, no momento denominado de T₀, foi feita medição da profundidade de carbonatação em 4 corpos de prova impregnados por fuligem, e 4 corpos de prova não impregnados por fuligem, em cada um dos traços. As condições meteorológicas do dia em que o concreto foi submetido à fuligem (T₀) era de 21°C com 82% de umidade relativa do ar e não houve precipitação.
- ◆ Neste momento os 16 corpos de prova impregnados por fuligem foram mantidos e armazenados em recipiente lacrado sem contato com o ambiente externo (atmosfera), sendo que o intuito foi que fumaça, agentes agressivos e atmosfera contaminada com os produtos da queima fossem mantidos;

- ◆ Após 91, 182, 273 e 364 dias a partir da data inicial (t=0), onde os corpos de provas foram lacrados com as fuligens, cada uma das amostras (sem fuligem e com fuligem) foram seccionados no centro do testemunho, e efetuado um ensaio de carbonatação, aplicando solução de aspersão da solução de fenolftaleína ortogonalmente à área seccionada;
- ◆ A solução de fenolftaleína empregada teve a proporção de 1 g da fenolftaleína em 50 ml de álcool etílico. Com esta aplicação foi detectada a região carbonatada do concreto que é aquela que não apresenta alteração de coloração, tendo pH inferior a 8,3. A região não carbonatada assume cor entre rosa a vermelho-carmim, de pH entre 8,3 e 9,5, ou somente vermelho carmim, de pH superior a 9,5 (Andrade, 1992). A área carbonatada foi aferida, e ao fim do processo (medição da área carbonatada nas situações sem presença de fuligem, com fuligem).
- ◆ No final deste procedimento foram construídos gráficos comparativos e evolutivos, entre corpos de prova de concreto que ficaram submetidos a fuligem por um período de um ano, em relação a corpos de prova que não foram submetidos a fuligem.
- ◆ Em paralelo, um recipiente com solo de pH neutro foi inserido no invólucro junto com os corpos de prova, e um segundo recipiente armazenado com os corpos de prova não impregnados por fuligem. O pH em cada um dos recipientes também foi aferido, de forma a verificar se o ambiente impregnado por fuligem era mais ácido em relação a um ambiente não impregnado por fuligem.

Esses testes foram realizados porque havia suspeita de que o ambiente de um prédio que sofreu incêndio, que está impregnado de fuligem e vedado para evitar roubos (como são os edifícios no Brasil quando passam por incêndios por vários meses até o início das obras de recuperação), é mais agressivo (ácido) que o ambiente de uma edificação que não sofreu incêndio, não está impregnado de fuligem e é ventilado.

Segue um fluxograma (Fluxograma 1) do programa experimental efetuado, e na sequência serão detalhados os materiais utilizados e os procedimentos executivos.



Fluxograma 1. Fluxograma do programa experimental.

2.1 Corpos de Prova de Concreto

A confecção dos corpos de prova foi realizada com base nas diretrizes relacionadas ao procedimento para moldagem e cura de corpos de prova de concreto estabelecidas na norma ABNT NBR 5738.

Para cada traço de concreto, foram calculadas as quantidades necessárias de cada material, para as relações água cimento 0,45; 0,55; 0,60; e 0,65. Os cálculos dos materiais utilizados para cada traço estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de material (kg) utilizado para a moldagem dos corpos de prova por traço.

Material utilizado para a moldagem dos corpos – Traço Unitário				
Material	Relação Água/Cimento (a/c)			
	0,45	0,55	0,60	0,65
Cimento (kg)	1,00	1,00	1,00	1,00
Areia (kg)	2,05	2,73	3,07	3,41
Brita (kg)	1,95	2,38	2,60	2,82
Água (kg)	0,45	0,55	0,60	0,65
Aditivo (kg)	variável	variável	variável	variável
Abatimento aferido para cada traço				
Slump (cm)	18.0	17.0	16.0	16.0

O abatimento para as peças de concreto foi de “16+/- 3 cm” e para corrigi-lo foi utilizado aditivo plastificante, sendo que a quantidade utilizada está apresentada na Tabela 1. Em seguida, os corpos de prova passaram pelo processo de cura úmida submersa, ficando submersos por 7 dias e depois foram removidos.

Os corpos de prova excedentes foram submetidos a ensaios realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT-SP) para caracterização de suas propriedades físicas (resistência a compressão, tração, dimensões, massa específica, índice de vazios), sendo que com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos corpos de prova foram coerentes.

Para a produção dos discos de concreto os corpos de prova de tamanho padrão de 10cm de diâmetro por 20cm de comprimento que haviam sido moldados foram seccionados em quatro (4) partes iguais, conforme demonstra a Fig. 1, a seguir:

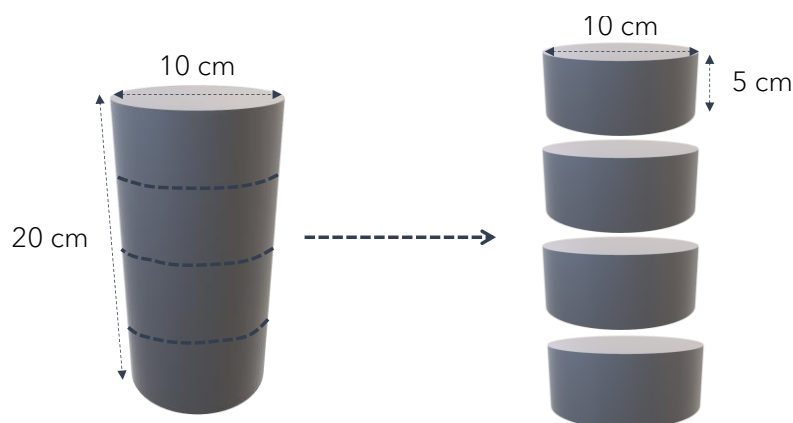


Figura 1. Ilustração do fatiamento dos corpos de prova.

Cabe ressaltar que os corpos de prova foram cortados em 4 discos para ocupar menos espaço no interior do invólucro, não havendo qualquer outra peculiaridade na decisão de fracionar os corpos

de prova de 20cm. Todos os lados foram expostos ao ambiente impregnado de fuligem, e a medição levou em consideração todos os 4 lados do disco: superior, inferior e laterais.

2.2 Materiais Combustíveis

Com o intuito de simular uma situação semelhante a um incêndio real em edificações, a seleção de materiais combustíveis foi realizada com base em algumas especificações, conforme descrito a seguir. Com base na ABNT NBR 15575:2013, a qual especifica a quantidade de móveis em cada ambiente de uma edificação padrão, foi determinada a quantidade de material relacionado aos móveis. Já a área aproximada de cada ambiente foi definida conforme o anexo I do decreto nº 57.776, que se trata de especificações relacionadas ao dimensionamento de ambientes (BRASIL, 2017). Por sua vez, foi utilizada a ABNT NBR 12721:2005 para coletar as características construtivas de cada edificação conforme projetos-padrão, e que em sua Tabela 02 apresenta quais os materiais e componentes que existem em cada elemento construtivo da edificação, como tipos de revestimentos, tipo de cobertura, tipo de forro etc.

A partir desses dados foi calculada a quantidade de elementos construtivos, móveis e utensílios em edificação padrão e obteve-se uma quantidade de materiais combustíveis por metro quadrado de edificação residencial em quilos (kg/m^2 de material combustível). Com base nessa estimativa, procedeu-se ao cálculo relacionado à área do invólucro (em m^2) e multiplicar pelo “peso médio” de cada elemento “por metro quadrado de edificação”. Por exemplo, em um dormitório tem-se 517 kg de madeira; 9,21 kg de espuma; 38 kg de tecido; 21,40 kg de elemento plástico; e 377 kg de elemento mineral.

Após fazer esse cálculo para cada ambiente, obteve-se como resultado o total de 75 kg de material combustível/ m^2 da edificação, sendo uma proporção de 24% madeira; 2% espuma e tecido; 2% de plástico e 72% de elemento mineral como cerâmicas, gesso e forro de fibra, que embora não sejam combustíveis, estão sujeitos a possuir esmaltes e materiais agregados que podem influenciar na composição da fuligem. Essa quantidade de materiais foi proporcionalizada para a área do invólucro, e foi definido que seriam implementados até 17,23 kg de materiais, sendo 6,56 kg de madeira; 0,13 kg de espuma; 0,38 kg de tecido; 0,63 kg de plástico; 9,53 kg de materiais minerais constituído por cerâmicas.

Devido à limitação do espaço no interior do invólucro as quantidades citadas no parágrafo anterior foram fracionadas em 4 porções de 4,31 kg, e que foram sendo introduzidas no invólucro respeitando as proporções, durante todo o período de queima.

2.3 Invólucro

Para realizar a queima do material foi adquirido um defumador adaptado, em que a fumaça podia passar ao interior da parte superior onde se encontravam os corpos de prova, porém a área de queima era isolada na parte inferior do objeto, portanto, não havia contato dos corpos de prova diretamente com o fogo.

Este defumador, constituído de aço inox, na parte superior possuía 5 bandejas vazadas onde poderiam ser armazenados os corpos de prova, e em sua parte inferior, uma chapa lisa onde se armazenou os produtos de queima.

Entre os compartimentos superior e inferior havia uma chapa metálica onde foram inseridas placas cerâmicas que minimizavam a transmissão de calor do local de queima para a parte superior onde estariam armazenados os corpos de prova.

O invólucro possuía 50cm de largura, por 40cm de profundidade e altura de 1,55m. Este invólucro também possui um termômetro em seu topo pelo qual era aferida a temperatura da parte superior, a fim de garantir que esta não ultrapassasse a quantidade de 200°C , pois a partir desta temperatura ocorre o Início da Desidratação do C-S-H, gerando silicatos anidros, causando Perda na Resistência (Neville, apud, Costa, Figueiredo, & Silva, 1997).



Figura 2. Defumador utilizado como invólucro para queima dos corpos de prova.

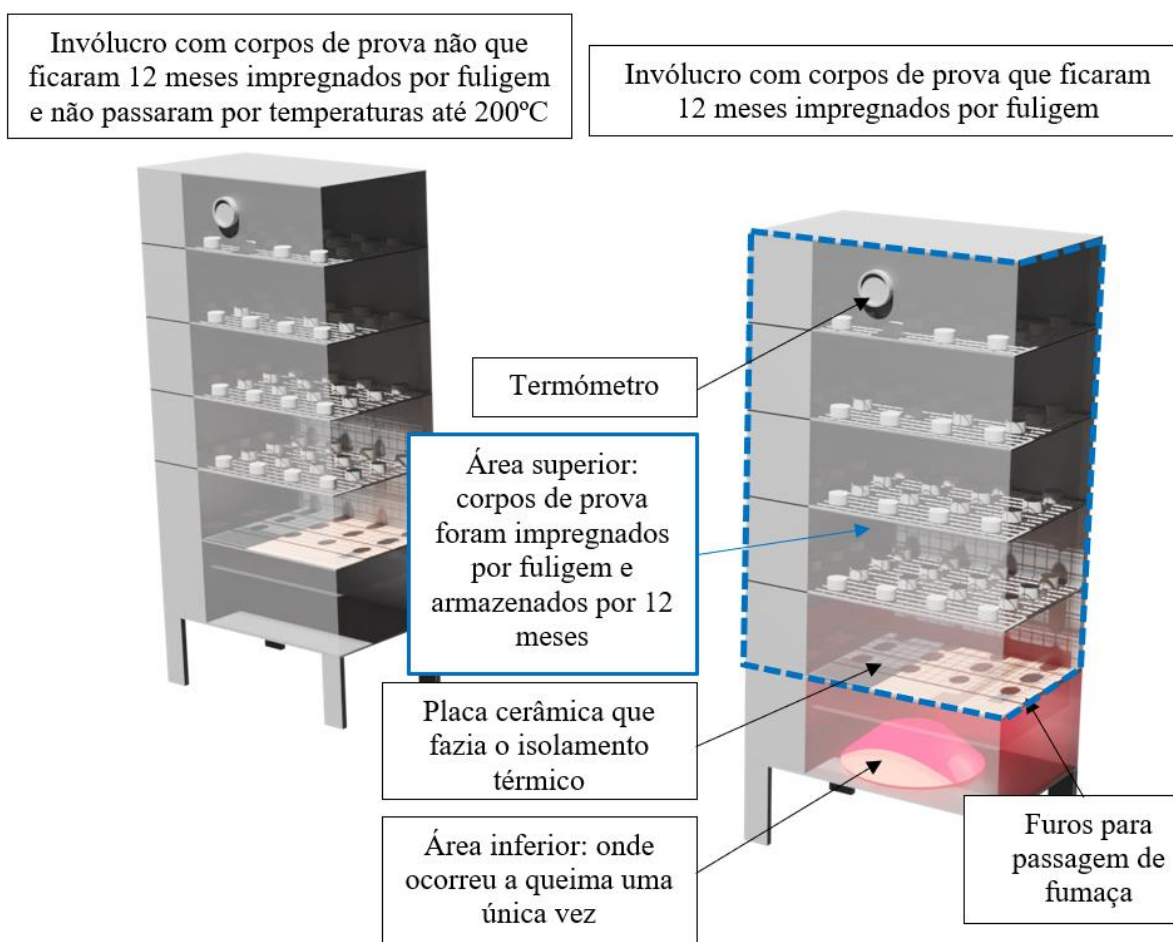


Figura 3. Esquemático de defumador utilizado como invólucro para queima dos corpos de prova.

2.4 Solo com pH Neutro

Para efeito comparativo do índice de pH, um recipiente com solo (argila vermelha) colocado fora do invólucro, enquanto outro foi adicionado no interior do invólucro e, conseqüentemente, exposto à fumaça.

Não existe normalização para esta medição, sendo a definição desta metodologia realizada de forma empírica com intuito de obter dados que permitam avaliar, ainda que não precisamente, se há diferença entre as condições atmosféricas do ambiente impregnado por fuligem e o ambiente que não foi impregnado por fuligem.

Esses testes foram assim programados para representar o ambiente de um prédio que sofreu incêndio, que está impregnado de fuligem e vedado para evitar roubos (como são os edifícios no Brasil quando passam por incêndios por vários meses até o início das obras de recuperação). Nestas condições é mais agressivo (ácido) que o ambiente de uma edificação que não sofreu incêndio, não está impregnado de fuligem e é ventilada.

Também foi avaliada a alteração de pH em material neutro e similar, impregnando uma amostra com fuligem por 12 meses e a outra não.

2.5 Processo de Queima do Material Combustível e Impregnação de Fuligem no Invólucro e Corpos de Prova

Na bibliografia consultada não foram constatadas normas técnicas que orientem ensaios semelhantes, para impregnação de fuligem em corpos de prova, sem que haja contato com temperatura. Desta forma o critério de queima consistiu na queima do material realizada na parte inferior do invólucro, conforme demonstrado na Figura 3, enquanto os corpos de prova foram dispostos no interior (parte superior) do invólucro (Figura 4), sendo equivalentes a 20 discos de cada traço, os quais foram, então, submetidos à fumaça sem contato direto com a chama, bem como o recipiente com terra disposto no invólucro. Também foram deixados 20 discos de corpos de prova de cada traço e um recipiente com terra fora do invólucro, os quais não foram submetidos à fumaça. A queima do material foi feita com o invólucro fechado durante 90 minutos, o qual é determinado como o tempo máximo de TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo [TRRF], Júnior, 2011) conforme preconizado pela NBR 14432 (ABNT, 2001), que se refere às exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações para edificações residenciais de até de 30m (edifícios de até 10 andares).

Ao longo da queima foi feito o monitoramento da temperatura para que esta não ultrapassasse 200° C, temperatura está a partir da qual poderiam começar as primeiras modificações significativas na micro-estrutura dos concretos.



Figuras 4 e 5. Esquerda: Materiais para queima no interior do invólucro. Direita: Corpos de prova dispostos no interior do invólucro, sendo que cada traço foi disposto em um nível do invólucro.

2.6 Processo de Aferição da Frente de Carbonatação dos Corpos de Prova

O procedimento para medição da frente de carbonatação consistiu na secção no centro dos testemunhos e aplicação, via aspersão, da solução de fenolftaleína ortogonalmente à área seleccionada. A Figura 5, a seguir, representa as etapas deste processo.

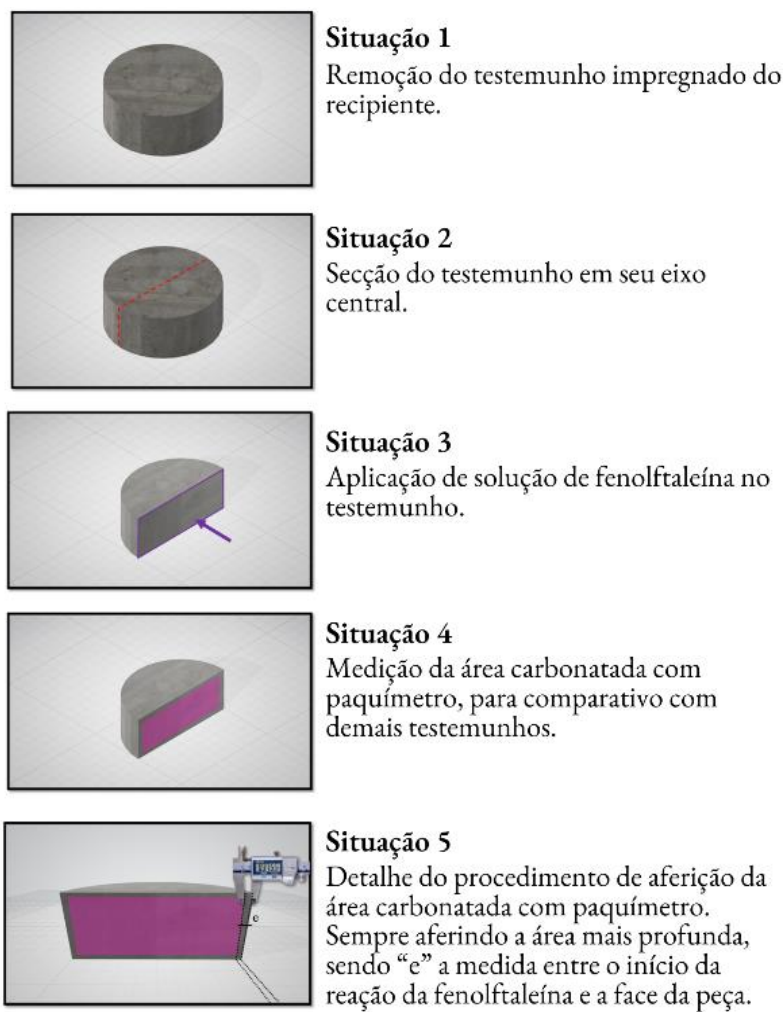


Figura 6. Ilustração do procedimento de aspersão da solução de fenolftaleína.



Figura 7. Aferição da área carbonatada

A medição da área carbonatada foi realizada nos corpos de prova com e sem impregnação de fuligem. A espessura carbonatada foi aferida e ao fim do processo foi construído um gráfico comparativo entre as aferições do que estava no interior do invólucro e o que ficou fora do invólucro, para identificar se há alteração na frente de carbonatação, diminuindo assim a vida útil do concreto.

Este mesmo processo foi efetuado em corpos de prova não impregnados por fuligem, com a finalidade de comparar os resultados em relação aos impregnados por fuligem.

A medição da frente de carbonatação nos corpos de prova impregnados por fuligem foi efetuada nos seguintes períodos: 0 (ou seja, logo após término da queima), 91, 182, 273 e 364 dias após a queima dos materiais combustíveis (3, 6, 9 e 12 meses respectivamente). Estes materiais ficaram armazenados no interior do invólucro onde houve a impregnação de fuligem, em condições preservadas da situação pós queima, ou seja, sem que fosse feita qualquer intervenção de limpeza.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Medição do pH nos Recipientes com solo de pH Inicialmente Neutro

A diferença de pH nos recipientes com terra foi aferida nos recipientes dispostos dentro e fora do invólucro, sendo feita uma comparação entre estes resultados, nos mesmos períodos em que foram retiradas as amostras impregnadas e não impregnadas por fuligem.

Os resultados da medição de pH da terra nos recipientes colocados fora ou dentro do invólucro mostraram que foi verificado um pH mais baixo na amostra que foi colocada dentro do invólucro (exposta à fuligem residual), na ordem de 5,5, enquanto a amostra que ficou armazenada em invólucro que não foi impregnado por fuligem atingiu patamares de pH que variavam entre 6,0 e 7,0.

Tabela 2. Resultado da medição do pH nos recipientes com terra inicialmente neutro, em cada invólucro

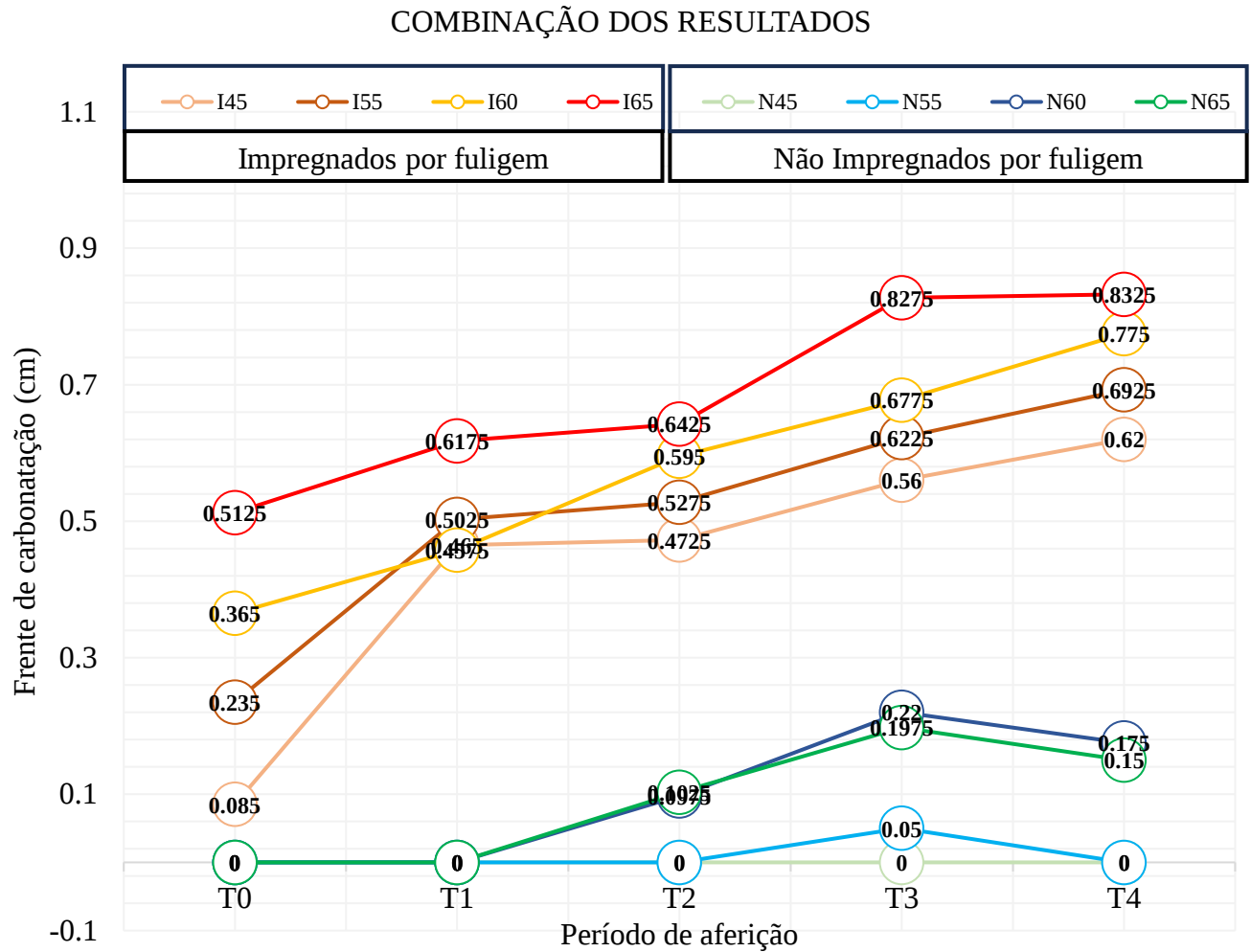
Medição do pH nos recipientes com terra Inicialmente Neutro, em cada invólucro						
Momento		T0	T90	T180	T270	T360
Data		19/6/22	24/9/22	16/12/22	16/3/23	14/6/23
PH Terra	Impregnado	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
	Não Impregnado	6,00	6,00	6,00	6,00	7,00

3.2 Frente de Carbonatação nos Corpos de Prova no Decorrer do Tempo

O Gráfico 1 demonstra a frente de carbonatação do concreto, em diferentes traços, tanto impregnados (tons de vermelhos) como não impregnados (tons de azul). Com base nestes dados, pode-se observar, de forma geral, que o decorrer do tempo (0 a 364 dias) está relacionado ao aumento da carbonatação, tanto para os corpos de prova impregnados quanto não impregnados. Isso demonstra uma tendência natural de carbonatação - ainda que relativamente lenta em condições naturais - devido a condições comuns do ambiente, como a exposição aos gases presentes na atmosfera, conforme já descrito na literatura anteriormente (Costa, 2012).

Porém é possível ser verificado que a frente de carbonatação avançou em maior velocidade nos corpos de prova que foram submetidos a temperaturas de até 200°C no processo de queima e posteriormente ficaram 365 dias submetidos à intensa impregnação de fuligem e ambiente agressivo pós incêndio.

Gráfico 1. Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para todos os traços de concreto.



Apresenta-se também, os resultados compilados em formato de tabela (Tabela 3), para melhor entendimento:

Tabela 3. Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para todos os traços de concreto, com barra de dados correspondente ao avanço da frente de carbonatação. (fonte: autor)

Invólucro	Traço com Base em Relação Água Cimento	Média dos Resultados Obtidos (em cm)				
		T0	T90	T180	T270	T360
		19/6/22	24/9/22	16/12/22	16/3/23	14/6/23
Impregnado por Fuligem	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
Não Impregnado por Fuligem	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

Serão apresentadas a seguir imagens dos corpos de prova após medição da frente de carbonatação com fenolftaleína.

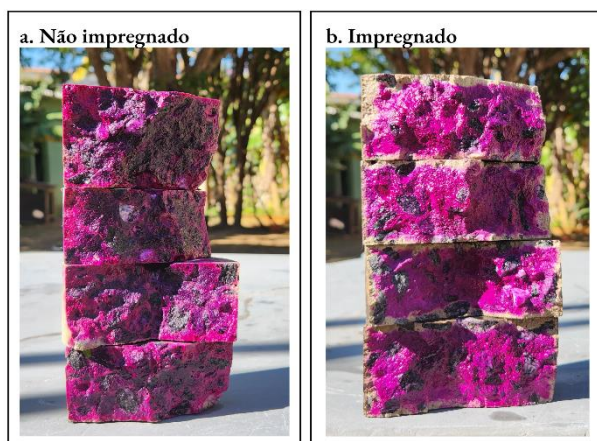


Figura 7. Comparação da aferição da frente de carbonatação com fenolftaleína, no traço de relação água/cimento 0,45, ao final dos 360 dias de experimento



Figura 8. Comparação da aferição da frente de carbonatação com fenolftaleína, no traço de relação água/cimento 0,55, ao final dos 360 dias de experimento

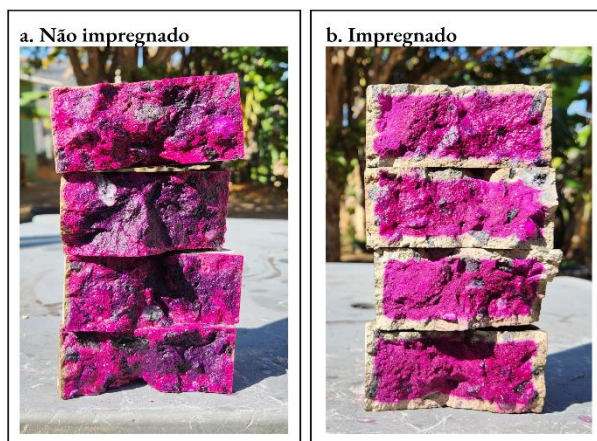


Figura 9. Comparação da aferição da frente de carbonatação com fenolftaleína, no traço de relação água/cimento 0,60, ao final dos 360 dias de experimento

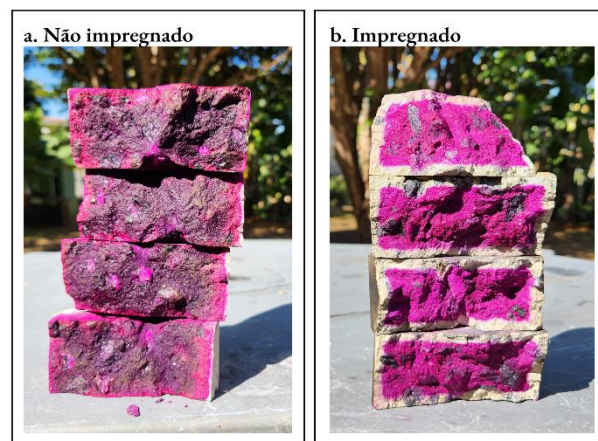


Figura 10. Comparação da aferição da frente de carbonatação com fenolftaleína, no traço de relação água/cimento 0,65, ao final dos 360 dias de experimento

De imediato foi possível observar que os valores de carbonatação presentes na coluna T0 do gráfico, demonstra que o avanço da frente de carbonatação imediatamente após a queima do material e a impregnação da fuligem foi de 0,085 cm para o traço a/c. 45; 0,235 cm para traço a/c. 55; 0,365 cm para o painel a/c. 60 e 0,5125 cm para o painel a/c. 65

Existem valores que parecem negativos, pois a medição foi feita com paquímetro. Se analisadas as diferenças que aparecem negativas, elas são da ordem de 0,02 cm, que estão sujeitas a variações por erros de leitura, variações na penetração da frente de carbonatação de uma amostra para outra, entre outras imprecisões que o método possui.

O importante do ponto de vista dos autores é entender que existe uma linha de tendência que mostra que o concreto impregnado de fuligem e deixado sujo por 12 meses em ambiente agressivo, tem um avanço maior da frente de carbonatação em relação ao concreto que não passou por incêndios.

Na Tabela 3 ainda é possível verificar uma diferença significativa entre os índices de carbonatação dos corpos de prova expostos ou não à fuligem (impregnado / não impregnado). O concreto impregnado apresentou um índice maior de carbonatação para todos os traços, conforme hipótese proposta no início deste estudo, enquanto o não impregnado apresentou um nível mais baixo ao longo do tempo. Essa diferença entre os grupos (impregnado / não impregnado) se manteve ao longo de todo o período analisado, demonstrando de forma mais consistente a tendência já observada anteriormente a respeito da influência da exposição à fuligem e moderada temperatura, mesmo sem contato com o fogo, no avanço da frente de carbonatação.

Com base na equação desenvolvida por Tuutti (1982), foi calculado o índice de carbonatação (**k**) para a frente de carbonatação dos corpos de prova impregnados por fuligem e não impregnados. A equação citada é representada a seguir:

$$X_c = k \cdot \sqrt{t}$$

Onde:

X_c = espessura carbonatada em mm (milímetro);

t = tempo em anos;

k = depende da difusividade efetiva de CO_2 através do concreto e da presença de água (TUUTTI, 1982).

A partir destes cálculos, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 4. Comparação sobre o avanço da carbonatação no concreto impregnado e não impregnado em doze meses. (fonte: autor)

ID		COMPARATIVO ENTRE AVANÇO DE IMPREGNADO E NÃO IMPREGNADO				Tempo Estimado para Atingir 2cm ou 20mm (anos)	Tempo de Vida Residual (anos)
		X_c (mm)	t (ano)	K (cm/ano)	Carbonatação Comparativa (Impregnado / Não Impregnado)		
45	Impregnado	6,20	1,00	6,20	620%	10,41	9,41
	Não Impregnado	1,00	1,00	1,00		400,00	399,00
55	Impregnado	6,93	1,00	6,93	693%	8,34	7,34
	Não Impregnado	1,00	1,00	1,00		400,00	399,00
60	Impregnado	7,75	1,00	7,75	443%	6,66	5,66
	Não Impregnado	1,75	1,00	1,75		130,61	129,61
65	Impregnado	8,33	1,00	8,33	555%	5,77	4,77
	Não Impregnado	1,5	1,00	1,50		177,78	176,78

Dessa forma é possível avaliar que concretos que foram submetidos a temperatura moderada e ficaram impregnados por fuligem residual desta queima por período de 12 meses, tem índice de difusidade efetiva de carbonatação até 6,93 vezes maior do que concretos que não foram impregnados e submetidos a ambientes apresentando concentração de fuligem.

4. CONCLUSÕES

A partir do experimento realizado neste estudo, fica evidente que a ação combinada de moderadas temperaturas (abaixo de 200°C) com a impregnação de fuligem por longos períodos (no caso deste estudo, 12 meses) estão relacionadas com a aceleração do avanço da frente de carbonatação, sendo esta informação relevante para o planejamento e execução da recuperação de estruturas que foram submetidas à incêndios e que serão reaproveitadas.

Com base na medição do pH, ainda que imprecisa por conta da limitação do aparelho utilizado, fica claro que o ambiente impregnado por fuligem possui acidez maior em relação a um meio ambiente não impregnado por fuligem.

A microfissuração e dilatação de poros residuais às temperaturas limitadas à 200°C, somadas ao fato de um ambiente mais agressivo, resulta no avanço da frente de carbonatação em concretos impregnados por fuligem no período de 12 meses, que pode ser de até mais de 6 vezes que concretos que não foram impregnados por fuligem e não passaram por temperaturas de até 200°C.

Portanto, para concretos que sofreram danos por altas temperaturas, existem diversas bibliografias que indicam a extensão dos danos e como tratar estes elementos construtivos. Porém, para concretos que não sofreram altas temperaturas e foram impregnados por fuligem, é recomendável uma limpeza e remoção da fuligem para não comprometer a vida útil da estrutura remanescente.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT-SP), representado pelo Professor Dr. Cláudio Mitidieri Filho, e à PhD Engenharia.

6. REFERÊNCIAS

- 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>