

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Allan Carneiro Valério

**Avaliação da frente de carbonatação do concreto submetido à
fuligem de incêndio**

**São Paulo
2023**

Allan Carneiro Valério

Avaliação da frente de carbonatação do concreto submetido à fuligem de incêndio

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia

Data da aprovação ____/____/____

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene
Mestrado Habitação: Planejamento e Tecnologia

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene (Orientador)
Mestrado Habitação: Planejamento e Tecnologia

Prof. Dr. Carlos Britez (Membro)
Britez Consultoria Ltda.

Prof. Dr. Claudio Vicente Mitidieri Filho (Membro)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

Allan Carneiro Valério

Avaliação da frente de carbonatação do concreto submetido à fuligem de incêndio

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia

Área de Concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios - TCE

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

São Paulo
Ago./2023

Ficha Catalográfica
Elaborada pela GITEB – Gerência de Gestão da Informação Tecnológica e Bibliográfica
do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

V164a

Valério, Allan Carneiro

Avaliação da frente de carbonatação do concreto submetido à fuligem de incêndio. /
Allan Carneiro Valério. São Paulo, 2023.
93p.

Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de
Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia em
Construção de Edifícios.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

1. Carbonatação 2. Concreto armado 3. Fuligem residual de incêndio 4. Fumaça de
incêndio 5. Tese I. Helene, Paulo Roberto do Lago, orient. II. IPT. Unidade de Negócios
em Ensino Tecnológico III. Título

2024-03

CDU 691.328(043)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Adilson Marinho Valério e Valquíria Carneiro Spinola, meus avós Antônio Carlos Carneiro e Maria do Carmo de Almeida Carneiro, e à minha esposa, Monique Vidal Rodrigues Valério.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus por guiar a trajetória para que este trabalho sucedesse.

Ao professor e orientador Dr. Paulo Roberto do Lago Helene que auxiliou e abraçou este projeto, compartilhando com seu tempo e sabedoria.

Agradeço à minha família que me apoiou, suportou as ausências e investimentos destinados a este projeto, e que me incentivou a sonhar.

Ao sogro e amigo Paulo Roberto Rodrigues que sempre ajudou este projeto de todas as maneiras possíveis, do começo ao fim.

RESUMO

A ocorrência de incêndios pode causar diversos danos estruturais ao concreto. Entretanto, pouco é estudado sobre como outros fatores além do contato direto do fogo com a estrutura, como a exposição à fumaça e resíduos após um incêndio, pode influenciar no desempenho futuro do concreto. Um dos aspectos importantes é a durabilidade do concreto pós incêndio. O presente estudo tem como objetivo verificar a influência da fuligem residual de incêndios na carbonatação do concreto armado e consequentemente na sua vida útil. Para isso foi realizado um experimento de exposição do concreto armado à fuligem residual de incêndio durante um ano, com a medição da área carbonatada a cada três meses. As limitações deste trabalho englobam o fato de não ser possível aferir a perda de água nos poros do concreto que passou por temperatura superior à 200°C durante a impregnação de fuligem; não ser medido a concentração de CO_2 na atmosfera onde estavam armazenados os corpos de prova submetidos e não submetidos à fuligem, o que pode acarretar variações aos resultados obtidos. Porém este estudo demonstra que a impregnação de fuligem, mesmo sem haver contato direto do concreto com o fogo e sob temperaturas inferiores a 200°C, acarreta um avanço significativo da frente de carbonatação quando comparado ao mesmo concreto não exposto à fuligem.

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

ABSTRACT

Assessment of the carbonation front of concrete subjected to fire soot

The occurrence of fires can cause various structural damages to concrete. However, not many papers has been related about how factors other than the direct contact of the fire with the structure, such as exposure to smoke and residues after a fire, can influence the future performance of concrete. One of the important aspects is the durability of the post-fire concrete. The present study aims to verify the influence of fire soot on the carbonation of reinforced concrete and consequently on its service life. For this purpose, an experiment was carried out to expose reinforced concrete to fire soot for one year, with the carbonate area measured every three months. The limitations of this study include the fact that it is not possible to measure the loss of water in the pores of concrete that has undergone a temperature higher than 200°C during soot impregnation; the concentration of CO₂ in the atmosphere where the soot-subjected and non-soot-submitted specimens were stored, which may lead to variations in the results obtained. However, this study demonstrates that soot impregnation, even without direct contact of the concrete with fire and under temperatures below 200°C, leads to a significant advance of the carbonation front when compared to the same concrete not exposed to soot.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Tríade do incêndio	16
Figura 2	- Tetraedro do Fogo	17
Figura 3	- Vista aérea do Museu da Língua Portuguesa após incêndio	19
Figura 4	- Estrutura do museu da língua portuguesa não danificada pela ação da temperatura, contudo impregnada por fuligem	19
Figura 5	- Esquemático de penetração de frente de carbonatação	31
Figura 6	- Representação do avanço da carbonatação sobre o concreto conforme alteração do pH	32
Figura 7	- Preparação dos corpos de prova	42
Figura 8	- Teste de teste abatimento de tronco de cone	42
Figura 9	- Processo de cura do concreto	43
Figura 10	Ilustração da secção dos corpos de prova	50
Figura 11	- Processo de confecção dos discos	51
Figura 12	- Madeira, do tipo lenha de pinho, utilizada para queima no experimento	54
Figura 13	- Espuma utilizada para queima no experimento	54
Figura 14	- Tecido utilizado para queima no experimento	55
Figura 15	- Plástico utilizado para queima no experimento	55
Figura 16	- Defumador utilizado como invólucro para queima dos corpos de prova	56
Figura 17	- Recipiente de terra colocado no exterior do invólucro (a) e no interior do invólucro (b).	57
Figura 18	- Materiais para queima no interior do invólucro	58
Figura 19	- Corpos de prova dispostos no interior do invólucro	58
Figura 20	- Queima do material com o invólucro fechado	59
Figura 21	- Termômetro disposto na parte superior no invólucro	60
Figura 22	- Ilustração do procedimento de aspersão da solução de fenolftaleína	61
Figura 23	- Medição da área carbonatada com paquímetro.	62
Figura 24	- Ilustração dos momentos de execução dos ensaios	63
Figura 25	- Períodos de medição do pH da terra dos recipientes expostos ou não à fuligem	64
Figura 26	- Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro no período de T0	65
Figura 27	- Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro no período de 90 dias	65

Figura 28	- Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro no período de 180 dias	66
Figura 29	- Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro no período de 270 dias	66
Figura 30	- Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro no período de 360 dias	67
Figura 31	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T0	69
Figura 32	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T90	69
Figura 33	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T180	70
Figura 34	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T270	70
Figura 35	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T360	71
Figura 36	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T0	73
Figura 37	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T90	73
Figura 38	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T180	74
Figura 39	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T270	74
Figura 40	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T360	75
Figura 41	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T0	77
Figura 42	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T90	77
Figura 43	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T180	78
Figura 44	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T270	78
Figura 45	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T360	79
Figura 46	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T0	81
Figura 47	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T90	81
Figura 48	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T180	82

Figura 49	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T270	82
Figura 50	- Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T360	83
Fluxograma 1	- Fluxograma do programa experimental	40
Gráfico 1	- Curva de Evolução do incêndio celulósico	22
Gráfico 2	- Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para o concreto de traço 0.45	71
Gráfico 3	- Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para o concreto de traço 0.55	75
Gráfico 4	- Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para o concreto de traço 0.60	79
Gráfico 5	- Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para o concreto de traço 0.65	83
Gráfico 6	- Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para todos os traços de concreto	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Relação da quantidade de material (kg) utilizado para a moldagem dos corpos de prova por traço	41
Tabela 2	- Identificação dos corpos de prova	43
Tabela 3	- Resultados dos ensaios físicos NBR 9778 (ABNT, 2005)	44
Tabela 4	- Resultados de resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2018)	45
Tabela 5	- Resultados de resistência à tração por compressão diametral NBR 7232 (ABNT, 2011)	46
Tabela 6.1	- Composição química dos corpos de prova por traço de concreto (0.45 e 0.55)	47
Tabela 6.2	- Composição química dos corpos de prova por traço de concreto (0.60 e 0.65)	47
Tabela 7.1	- Quantidade de materiais utilizado para cada traço de concreto (0.45 e 0.55)	48
Tabela 7.2	- Quantidade de materiais utilizado para cada traço de concreto (0.60 e 0.65)	49
Tabela 8	- Tabela comparativa do consumo de cimento em kg/m ³ com base nos resultados obtido no ensaio de recomposição de traço, em relação à pesagem real, utilizada para confecção dos corpos de prova	50
Tabela 9	- Cálculo de materiais combustíveis para queima	53
Tabela 10	- Índice de pH da terra nos diferentes períodos	67
Tabela 11	- Frente de carbonatação, em centímetros (cm), no concreto de traço 0.45 conforme o tempo e exposição à fuligem	68
Tabela 12	- Frente de carbonatação, em centímetros (cm), no concreto de traço 0.55 conforme o tempo e exposição à fuligem	72
Tabela 13	- Frente de carbonatação, em centímetros (cm), no concreto de traço 0.60 conforme o tempo e exposição à fuligem	76
Tabela 14	- Frente de carbonatação, em centímetros (cm), no concreto de traço 0.65 conforme o tempo e exposição à fuligem	80
Tabela 15	- Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para todos os traços de concreto	85
Tabela 16	- Comparação sobre o avanço da carbonatação no concreto impregnado e não impregnado em doze meses	86

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos	15
1.4 Conteúdo da Dissertação	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Incêndio	16
2.1.1 Fases do incêndio	20
2.1.2 Compostos produzidos em incêndios	22
2.2 Concreto armado	24
2.2.1 O uso de concreto armado em edificações	26
2.2.2 O concreto armado e exposição a incêndios	28
2.3 Carbonatação	30
2.3.1 Processos físico-químicos da carbonatação	30
2.3.2 Fatores que influenciam na carbonatação	34
3 METODOLOGIA	38
3.1 Programa Experimental	38
3.2 Materiais e métodos	40
3.2.1 Corpos de prova de concreto	40
3.2.2 Materiais combustíveis	51
3.2.3 Invólucro	55
3.2.4 Terra de pH neutro para medição do pH	56
3.3 Procedimentos efetuados	57
3.3.1 Queima do material	57
3.3.2 Medições	60
3.3.3 Idade do Rompimento dos Corpos de Prova	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1 Medição do PH	64
4.2 Carbonatação	68
4.2.1 Concreto de traço 0.45	68
4.2.2 Concreto de traço 0.55	72
4.2.3 Concreto de traço 0.60	76
4.2.4 Concreto de traço 0.65	80
4.2.5 Comparação dos níveis de carbonatação	84
6 CONCLUSÃO	88
6.1 Considerações finais	88
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	90
REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Diferentes fatores podem contribuir para a ocorrência de um incêndio, sendo que este acarreta consequências adversas, como risco de vida, bem como danos materiais. Por isso, é importante que seja feita a adequação e manutenção de instalações prediais que ofereçam potencial risco de incêndio para prevenir estas ocorrências. Porém em que pese diversas normas e instruções técnicas destinadas a prevenção de ocorrência de incêndios 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 2041 incêndios em edificações pelo território nacional, conforme noticiado na imprensa, número um pouco menor, mas semelhante aos dados de 2021, em que foram registrados 2301 incêndios.

Devido ao impacto financeiro significativo causado por um incêndio, na maioria das vezes o processo de recuperação das edificações é realizado a partir de recursos provenientes de seguradoras ou financiadoras, o que normalmente demanda um tempo considerável. Durante este período, os imóveis ficam em condição “sinistrada”, comumente com portas e janelas lacradas, e o restante dos resíduos do incêndio. Por conta disso, essas edificações que já foram expostas durante o incêndio, continuam submetidas a resíduos que podem continuar afetando sua estrutura. Diante disso, torna-se importante conhecer os possíveis impactos da exposição prolongada a materiais residuais de incêndio, uma vez que não somente o fogo, mas também outros elementos, podem afetar sua estrutura.

Neste sentido, o presente trabalho busca ampliar os conhecimentos obtidos anteriormente em um estudo a respeito da influência da fuligem residual de incêndios no processo de carbonatação do concreto armado (VALÉRIO; ARANA; BERGAMASCHI, 2017). Anteriormente, verificou-se que o concreto exposto à fuligem residual apresentou uma velocidade maior de carbonatação em relação àquele não exposto. Nesta pesquisa, foi aumentado o tempo de exposição a fim de compreender de forma mais aprofundada o comportamento do concreto armado diante desse tipo

de exposição no que tange à frente de carbonatação, e ampliada a quantidade de traços de concreto submetidos à fuligem.

1.2 Justificativa

Um incêndio pode ter consequências adversas em várias áreas. No que diz respeito à estrutura de concreto, pode-se destacar alguns efeitos. O contato do fogo com a estrutura de concreto pode afetar este material de forma intensa causando perda de resistência física, alterações químicas e causar inclusive perda total de sua funcionalidade, colocando em risco a estabilidade de uma edificação (RIBEIRO et al., 2014). Mas além disso, existem efeitos que podem ser causados por outros elementos de um incêndio, como a exposição à fumaça mesmo sem contato direto com o fogo, os quais comumente não recebem o mesmo cuidado como em áreas afetadas diretamente pelo fogo, e muitas vezes passam apenas por processo de limpeza e pintura, sem que sejam feitos estudos para verificar se houve alguma manifestação patológica decorrente do contato com a fuligem.

Neste caso, a exposição à fumaça pode acelerar o processo de carbonatação do concreto, e diminuir o tempo de passivação da armadura da estrutura, uma vez que o resíduo de fuligem usualmente apresenta grande concentração de dióxido e monóxido de carbono, além de possuir substâncias com potencial hidrogeniônico (pH) de baixa alcalinidade.

Estas estruturas que tiveram contato com fuligem e serão reaproveitadas sem que sejam feitas avaliações e tratamentos podem ter sua vida útil reduzida. Dessa forma, tratar apropriadamente as partes da estrutura que foram submetidas à resíduos do incêndio, ainda que não diretamente ao fogo, torna-se relevante para verificar a viabilidade econômica de recuperação da edificação.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar o avanço da frente de carbonatação do concreto submetido à fuligem de incêndio, e que não tenha sido submetido à temperaturas superiores à 200°C, ou seja partes da estrutura próximas ao fogo mas não sob fogo, de forma a entender se o contato de estrutura de concreto com fuligem ao longo do tempo altera a profundidade de carbonatação e consequentemente a vida útil residual dessa estrutura.

1.4 Conteúdo da Dissertação

O conteúdo desta dissertação foi dividido em cinco capítulos, incluindo esta introdução. Esta divisão buscou contextualizar de forma lógica como a pesquisa e programa experimental foram desenvolvidos. A seguir são apresentados os resumos dos conteúdos apresentados na divisão supracitada:

No primeiro capítulo é realizada a introdução e justificativa deste estudo, além de apresentar os objetivos a serem alcançados.

No segundo capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre diferentes temas associados ao objetivo geral do trabalho.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais e procedimentos utilizados nos experimentos.

No quarto capítulo são demonstrados os resultados obtidos através do experimento, que também são discutidos nesta sessão.

Por fim, é apresentada a conclusão deste programa experimental, com sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Incêndio

Os incêndios são um dos maiores desafios enfrentados pela engenharia civil, uma vez que podem causar danos significativos às estruturas de edifícios, colocando em risco a vida dos ocupantes e comprometendo a integridade da construção e da vizinhança. Eles podem ser causados por diversos fatores, como falhas elétricas, vazamentos de gás, negligência humana e outros. Segundo definição da ABNT NBR 13860:1997 “Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio”, o fogo é um processo complexo que envolve a combustão de materiais e a emissão de calor e luz, sendo necessário que estejam presentes alguns fatores para que ocorra a sua deflagração (ROSA, 2015).

Por um tempo, considerou-se que os processos de combustão, apesar de sua complexidade, dependiam de três fatores para ocorrer: combustível, comburente e calor, conforme representado na **Figura 1**.

Figura 1 – Tríade do incêndio.



Fonte: Rosa (2015).

Entretanto, diante de problemas na compreensão de fenômenos anômalos que não eram bem explicados por essa relação, com somente os três fatores mencionados, foi adicionado um quarto fator a essa explicação: a existência de reações em cadeia (ROSA, 2015). Assim, foi proposta uma nova representação dos fatores que levam à deflagração do fogo, demonstra a **Figura 2**.

Figura 2 - Tetraedro do Fogo.



Fonte: Rosa (2015).

Dessa forma, a partir da interação entre estes fatores, ocorrendo a combustão e o processo de reação em cadeia, pode-se dar início a um incêndio. Na ABNT:NBR 13860 (ABNT, 1997) é descrito que “O incêndio é o fogo fora de controle”. Por isso, diversas medidas de prevenção são pensadas para evitar incêndios, no entanto, a ocorrência desse evento não é tão baixa (Instituto Sprinkler Brasil, 2023).

Quando estes incêndios ocorrem em edificações, e são constatadas avarias que indicam perda de resistência mecânica ou alterações físico-químicas no comportamento das estruturas, principalmente devido às altas temperaturas, é comum que se faça a investigação para verificar a interferência do calor nas propriedades dos materiais (concreto e aço), por meio de ensaios.

Existem diversas bibliografias e estudos sob a ótica do comportamento de estruturas de concreto submetidas à incêndio, que demonstram que estruturas de concreto quando submetidas às altas temperaturas sofrem alterações que implicam diretamente em perda da resistência mecânica, diminuição da tensão de escoamento e módulo de elasticidade do aço e concreto, atraindo maior atenção em situações pós fogo.

Porém há casos em que a estrutura não foi submetida a altas temperaturas, e que esteve em contato apenas com o resíduo do incêndio, através de fumaça, e que comumente gera uma intensa impregnação de fuligem. Nestes casos não é incomum que seja feita apenas lavagem da estrutura e recomposição dos revestimentos, sendo que peças não atingidas pelo calor são reaproveitadas.

Ocorre que em muitos casos, devido a questões financeiras e burocráticas, as edificações podem ficar por semanas, meses ou anos expostas a diversos resíduos provenientes de um incêndio, incluindo fuligem (material resultante da fumaça). Um exemplo disso, em território nacional, foi o caso do Museu da Língua Portuguesa em São Paulo que foi acometido por um incêndio em dezembro de 2015 (MARCELLI, 2016), em que os serviços emergenciais foram iniciados apenas após dois meses e meio, submetendo a edificação a intensa impregnação de fuligem durante este período. As **Figuras 3 e 4** demonstram a situação do Museu da Língua Portuguesa após o incêndio, externamente e internamente.

Figura 3 – Vista aérea do Museu da Língua Portuguesa após incêndio.



Fonte: Marcelli (2016).

Figura 4 – Estrutura do museu da língua portuguesa não danificada pela ação da temperatura, contudo completamente impregnada por fuligem.



Fonte: Marcelli (2016).

A avaliação das condições de estruturas de concreto armado em edificações após incêndio é um processo complexo e requer conhecimento técnico especializado. É necessário avaliar os danos causados pelo incêndio na estrutura, como usualmente realizado em peças atingidas por calor, como avaliação da perda da resistência mecânica e alterações físico-químicas, mas também pode ser importante avaliar as condições de peças estruturais que serão reaproveitadas, e que não sofreram danos por calor, apenas intensa impregnação de fuligem, para evitar que haja despassivação precoce da armadura, e avaliar se a estrutura continua capaz de suportar as cargas a que está sujeita, ou se não houve um decréscimo da vida útil da edificação que inviabiliza seu reaproveitamento (RIBEIRO et al., 2014).

2.1.1 Fases do incêndio

Compreender as fases do incêndio é essencial para a prevenção e combate a incêndios, bem como para compreender seu impacto em estruturas. O incêndio pode ser dividido em quatro fases distintas: pré-ignição, crescimento, incêndio desenvolvido e decrescimento. Cada uma dessas fases tem suas características e desafios específicos.

A primeira fase do incêndio é a de pré-ignição, que ocorre quando o combustível entra em contato com uma fonte de ignição, como uma chama, faísca ou superfície quente. Nessa fase, o calor gerado pela combustão é suficiente para manter a reação em cadeia e sustentar a chama e a taxa de combustão ainda é baixa, mas pode aumentar rapidamente se as condições forem favoráveis. Assim, essa fase, também chamada de incipiente, é caracterizada pela presença de chamas pequenas, fumaça e altas temperaturas em uma área restrita. Neste momento inicial, o incêndio é facilmente controlável e pode ser extinto com o uso de extintores portáteis ou mangueiras de incêndio. No entanto, se o fogo não for controlado nessa fase inicial, ele pode progredir (OLIVEIRA, 2005; MAXIMIANO, 2018).

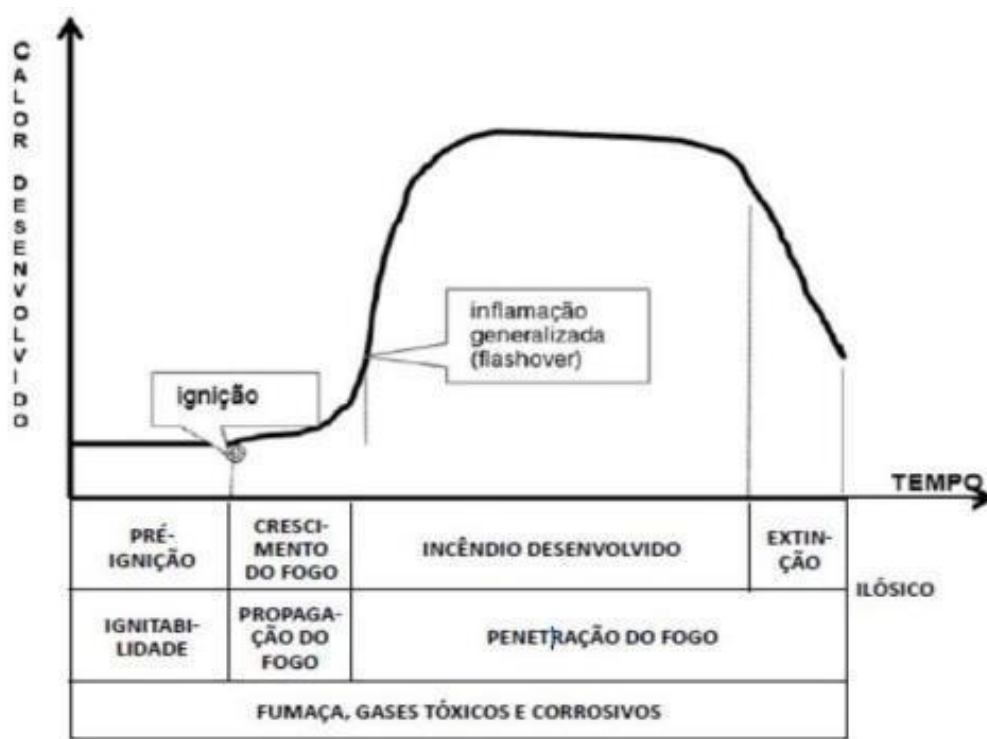
A segunda fase é a de crescimento, na qual a chama e o calor gerado pela combustão se espalham rapidamente pelo combustível. A taxa de combustão aumenta rapidamente nesta fase, pois o calor gerado pela combustão começa a aquecer o combustível circundante, aumentando assim a quantidade de combustível disponível para queimar. Além disso, as correntes de ar podem intensificar a combustão, aumentando a taxa de oxigênio disponível para a chama. Assim, o fogo se espalha para outras áreas do ambiente e começa a produzir fumaça e gases quentes. Nessa fase, o incêndio torna-se muito mais perigoso e difícil de controlar (OLIVEIRA, 2005; MAXIMIANO, 2018).

A terceira fase é a de pleno desenvolvimento, na qual a combustão atinge seu máximo e a chama se estende por toda a área de combustível disponível. Nesta fase, as temperaturas podem exceder 1000°C, o que pode levar à formação de gases tóxicos e à liberação de grandes quantidades de fumaça. Esta fase é a mais perigosa para a segurança dos ocupantes de um edifício, pois há um alto risco de propagação rápida do fogo e de colapso estrutural (OLIVEIRA, 2005; MAXIMIANO, 2018).

Finalmente, a quarta fase é a fase de decrescimento, na qual a quantidade de combustível disponível começa a diminuir e a taxa de combustão diminui. Nesta fase, a chama e a temperatura diminuem gradualmente, até que o fogo se apague completamente. No entanto, mesmo nesta fase, a estrutura pode permanecer extremamente quente e instável, representando um risco potencial para os ocupantes e socorristas (OLIVEIRA, 2005; MAXIMIANO, 2018).

O **Gráfico 1** representa o avanço de diferentes fases de um incêndio, do início ao final.

Gráfico 1 - Curva de Evolução do incêndio celulósico.



Fonte: Seito et al. (2008).

É importante salientar que embora essas fases sigam uma ordem geral, cada incêndio é único e pode se desenvolver de maneira imprevisível, a depender de diversos fatores como por exemplo as características da construção do edifício, a geometria dos cômodos e as aberturas de janelas e portas, a presença de materiais inflamáveis e as condições climáticas, que podem afetar a velocidade e a intensidade do incêndio.

2.1.2 Compostos produzidos em incêndios

Diferentes elementos e reações químicas fazem parte de um incêndio. Diante de um incêndio, gera-se grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2), o principal agente causador da carbonatação, processo que será descrito de forma mais específica em outro capítulo.

Além dos gases, os principais produtos gerados em um incêndio são o calor, a fumaça e a chama (SEITO et al., 2008). Neste estudo tem-se como enfoque a fumaça, uma vez que se tem como objetivo analisar a influência da fuligem no concreto armado.

A fumaça é constituída por gases de combustão, por pequenas partículas sólidas que foram queimadas de forma parcial e por vapor condensado que se apresenta em suspensão no ar. A cor da fumaça pode variar e depende do tipo de combustível, sendo branca na fase inicial devido à umidade dos materiais. Superfícies pintadas e plásticos emitem uma fumaça cinza, enquanto a madeira provoca uma fumaça de tom marrom e os hidrocarbonetos geram uma fumaça preta (ROSA, 2015).

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

A composição química da fumaça é altamente complexa e variável. Existe uma grande variedade de substâncias que podem estar presentes na fumaça e a porcentagem destas pode mudar conforme o estágio do incêndio. Diferentes fatores influenciam na formação das substâncias presentes na fumaça, como a composição química do material em combustão, bem como a oxigenação e nível de energia (calor) no processo (SEITO et al., 2008).

Ainda 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 (NOX), gás sulfídrico (H₂S) e gás oxigênio (O₂).

Dos gases que se tem interesse neste estudo, pode-se destacar:

- CO (monóxido de carbono): é encontrado em todos os incêndios e é este resultado da combustão incompleta dos materiais combustíveis a base de carbono, como a madeira, tecidos, plásticos, líquidos inflamáveis, gases combustíveis, etc (SEITO et al., 2008).
- CO₂ (dióxido de carbono): é encontrado também em todos os incêndios e é resultado da combustão completa dos materiais combustíveis a base de carbono (SEITO et al., 2008).

- O₂ (oxigênio): consumido na combustão dos materiais, diminui a concentração desse gás no ambiente e é um dos fatores de risco à vida das pessoas (SEITO et al., 2008). Presente na atmosfera, também após o incêndio, este reage com CO (monóxido de carbono), gerando CO₂ (gás carbônico).

2.2 Concreto armado

Existem diferentes tipos de concreto, os quais se diferenciam por características na composição de sua estrutura. Segundo MORAIS et al. (2020, p. 4), o "concreto é um dos materiais mais importante e presente na construção civil, sendo constituído basicamente pela junção de cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo, como também pode ser adicionado resíduos e aditivos químicos".

O concreto armado é um material amplamente utilizado na construção civil, sendo um dos materiais mais importantes e revolucionários do século XX. Sua tecnologia foi desenvolvida no final do século XIX e seu uso possibilitou a construção de estruturas mais altas e robustas, permitindo a criação de projetos arquitetônicos arrojados e inovadores. Desde então, este material tem sido utilizado em todo o mundo para a construção de estruturas de diferentes tamanhos e complexidades, como pontes, edifícios, viadutos, barragens, entre outros (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015).

O concreto armado é composto por concreto e barras de aço (armadura). Sua mistura de cimento, água e outros agregados, após endurecer, conferem uma alta resistência mecânica ao material. De forma complementar, as barras de aço que são adicionadas em sua estrutura, conferem maior capacidade de suportar esforços de tração, uma vez que o concreto puro não apresenta uma boa capacidade de resistência a esse tipo de esforço (MORAIS et al. 2020; OLIVEIRA, 2019).

O sucesso do uso deste tipo de concreto se deve principalmente à sua alta resistência à compressão, que é a capacidade de suportar cargas que tendem a comprimi-lo. A capacidade de resistência à compressão do concreto armado pode variar de acordo com a dosagem dos materiais e com o processo de cura. Além disso, este material apresenta certa resistência à tração, que é a capacidade de resistir a cargas que tendem a esticá-lo. No entanto, a resistência à tração do concreto é consideravelmente menor do que a resistência à compressão, o que pode limitar o seu uso em algumas aplicações estruturais (BASTOS, 2019).

O reforço com barras de aço é uma das principais características do concreto armado, as quais são colocadas na posição adequada antes da concretagem, formando uma armadura que irá aumentar a resistência à tração do conjunto. A aderência entre o aço e o concreto é garantida por meio de uma camada de aderência formada durante a concretagem, o que permite que as forças sejam transferidas efetivamente entre os dois materiais. As barras de aço podem ser lisas ou corrugadas, sendo as corrugadas mais utilizadas devido à sua maior aderência ao concreto (BASTOS, 2019; JÚNIOR, 2011).

Além da aderência, a ancoragem das barras de aço é um fator crucial para a resistência e estabilidade das estruturas em concreto armado. A ancoragem é o processo pelo qual as barras de aço são fixadas de forma segura às fundações ou aos elementos estruturais adjacentes. A ancoragem pode ser realizada por meio de chumbadores, soldagem, barras de ancoragem ou outros dispositivos de fixação. O dimensionamento correto da ancoragem é essencial para garantir que a estrutura de concreto armado suporte as cargas e atenda aos requisitos de segurança e estabilidade (BASTOS, 2019).

Este tipo de concreto é utilizado em diferentes tipos de edificações, desde pequenas construções residenciais até grandes empreendimentos comerciais e industriais. Ele pode ser utilizado para a construção de lajes, vigas, pilares e outros elementos estruturais. Além disso, frequentemente, é utilizado em obras de infraestrutura, como pontes e viadutos, devido à sua resistência e durabilidade. Para garantir a qualidade e segurança da estrutura, é importante realizar um projeto detalhado, que leve em consideração as cargas que serão suportadas e as condições de exposição ao ambiente, além de utilizar materiais de qualidade e seguir as normas técnicas e de segurança durante todo o processo de construção (ALMEIDA, 2019).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a responsável pela elaboração das normas técnicas relacionadas ao concreto armado no Brasil. Entre as normas mais importantes, destaca-se a NBR 6118 (ABNT, 2014), que estabelece os requisitos para o projeto de estruturas de concreto armado e define as cargas que devem ser consideradas no dimensionamento da estrutura. Essa norma é fundamental para garantir a segurança da estrutura e evitar problemas como a deformação excessiva e o colapso da edificação.

Outra norma importante é a NBR 14931 (ABNT, 2023), que estabelece os requisitos para a execução de estruturas de concreto armado. Essa norma define procedimentos para a escolha dos materiais utilizados na obra, a preparação das fôrmas, o lançamento do concreto, o adensamento, a cura e a desforma da estrutura. A correta execução dos procedimentos estabelecidos nesta norma é fundamental para garantir a qualidade e a durabilidade da estrutura.

Por fim existe também a NBR 15200 (ABNT, 2012), que estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio de forma que a edificação atenda com as exigências mínimas de resistência ao fogo que viabilize a evacuação da edificação.

2.2.1 O uso de concreto armado em edificações

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados na construção de edifícios e outras estruturas. Isso ocorre devido à sua capacidade de suportar grandes cargas, além de oferecer durabilidade e resistência a diferentes condições ambientais. Seu uso em edificações é uma prática comum na engenharia civil, tanto para a construção de prédios residenciais quanto comerciais, industriais e governamentais (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015).

Uma das vantagens do uso de concreto armado em edificações é a sua versatilidade e facilidade de execução em canteiro em qualquer região do país. O material permite a criação de diferentes formas e configurações, além de possibilitar a incorporação de elementos arquitetônicos.

Outro ponto importante do uso de concreto armado em edificações é a sua capacidade de resistência a diferentes tipos de cargas. O material é capaz de suportar cargas verticais, como o peso das próprias estruturas e cargas horizontais, como as decorrentes do vento e de terremotos. A resistência do concreto armado também é importante na prevenção e combate a incêndios, uma vez que o material possui propriedades retardadoras de fogo, por ter baixa condutividade térmica (OLIVEIRA, 2019).

É importante destacar que o uso de concreto armado em edificações deve ser realizado com base em um projeto estrutural bem elaborado. Esse projeto deve levar em consideração não apenas as cargas que serão suportadas pela estrutura, mas também as condições de exposição ao ambiente, as características dos materiais utilizados e a durabilidade esperada para a edificação. Com essas medidas, é possível garantir a segurança e a eficiência das estruturas em concreto armado (RIBEIRO et al., 2014).

O projeto de estruturas em concreto armado deve levar em consideração uma série de fatores, como as cargas que serão suportadas, as características dos materiais utilizados, as condições de exposição ao ambiente, entre outros. O processo de criação de estruturas de concreto armado envolve a escolha cuidadosa dos materiais utilizados, como o cimento, a água, o agregado e a armadura (FONSECA; CORRÊA; SILVA, 2013).

O cimento é um material aglomerante utilizado para dar liga ao concreto, enquanto a água é necessária para a hidratação do cimento e a formação da massa. O agregado é composto por pedras, areia e outros materiais granulares, e serve para dar volume ao concreto e reduzir a sua retração. E como já foi dito, a armadura é utilizada para aumentar a resistência à tração do concreto, já que este material apresenta baixa resistência nesse sentido, em relação ao aço (BASTOS, 2019).

O processo de construção de uma estrutura em concreto armado envolve a preparação da fôrma para receber o concreto, a colocação da armadura e o lançamento do concreto, que deve ser vibrado para garantir a eliminação de bolhas de ar e a completa aderência entre os materiais. Após a cura do concreto, é realizada a retirada das fôrmas e a aplicação do acabamento. A resistência do concreto armado é influenciada por diversos fatores, como a qualidade dos materiais utilizados, o tempo

de cura, as condições de exposição ao ambiente e as cargas a que a estrutura será submetida. É importante realizar testes de resistência para garantir a adequação da estrutura às suas finalidades, e realizar manutenções regulares para prevenir danos e desgaste ao longo do tempo (LIMA; SANTOS, 2013).

O concreto armado é um material essencial na construção civil, utilizado em uma variedade de estruturas, desde edifícios e pontes até tanques e reservatórios (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015). O seu uso requer uma compreensão detalhada das propriedades dos materiais utilizados, do processo de construção e das normas técnicas e de segurança aplicáveis. Com o projeto e execução corretos, o concreto armado pode oferecer alta resistência, durabilidade e segurança, garantindo a eficiência da estrutura por muitos anos (RIBEIRO et al., 2014).

2.2.2 O concreto armado e exposição a incêndios

Como foi descrito anteriormente, o uso de concreto armado em edificações deve ser feito a partir de um projeto estrutural bem elaborado a fim de que este atenda às características estruturais necessárias à determinada construção de forma segura. Neste projeto considera-se inclusive as variáveis às quais esta estrutura de concreto será exposta, como por exemplo, a temperatura, umidade, dentre outras. No entanto, um evento excepcional que afeta diretamente a durabilidade das estruturas de concreto armado é a ocorrência de um incêndio.

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 (JÚNIOR et al., 2019; OLIVEIRA, 2019).

Essa proteção conferida pelo concreto pode ser afetada por diversos fatores. No caso de incêndios, pode haver um grande comprometimento dessa estrutura devido à exposição a altas temperaturas (FERNANDES et al., 2017). Conforme Oliveira (2019), “edificações de concreto armado quando sujeitas à ação excepcional de incêndio podem sofrer degradações de vários tipos em função do tempo de duração, temperatura atingida e formas de extinção do fogo, além dos elementos e materiais construtivos utilizados”. Dessa forma, a proteção fornecida pelo concreto à armadura pode ser comprometida não somente de forma física, mas também por reações químicas originadas ou potencializadas por incêndios.

Isto ocorre porque o concreto armado é um material heterogêneo que em temperaturas que variam entre 4 e 80°C, se comporta de forma homogênea, pois seus componentes trabalham juntos. Além disso, a variação de temperatura nessa faixa produz alterações apenas de ordem física, como porosidade e crescimento de fissuras.

Porém, entre 80 e 100°C, começa a ocorrer a evaporação da água que se encontra no interior do concreto que exerce pressão na rede de poros.

Entre 100 e 200°C, a pasta começa a perder estabilidade. A desestruturação química da pasta de cimento começa à 180°C (KALIFA, et al., 2000). Isso ocorre pois aos 100°C surgem fissuras na microestrutura devido a contração do concreto, ocorrida por causa da evaporação da água. Também é nessa faixa de temperatura que começa a decomposição da etringita (por volta de 130°C).

Com o aumento da temperatura, agora entre 200 e 300°C, ocorrem as primeiras modificações físico-químicas, onde a água evaporada diminui a “adesão química” (força de Van der Waals) da Tobermorita (C-S-H) que acentua a fissuração do concreto e provoca uma pequena perda de resistência (NEVILLE, apud, COSTA, FIGUEIREDO, & SILVA, 1997). Além disso, é nessa faixa (mais precisamente à 285°C) que acontece a decomposição dos aluminatos de cálcio.

Essas alterações ocorrem em todo concreto, inclusive na zona de transição. As fissuras localizadas nessa última, colaboram na redução do módulo de elasticidade e da resistência a flexão. Por exemplo, enquanto em 204°C o concreto apresenta um módulo de elasticidade de 70% a 80% do valor inicial, aos 427°C apresentará algo entre 40% e 50%. (NEVILLE, apud, COSTA, FIGUEIREDO, & SILVA, 1997).

Deste modo o concreto, ou seja, sua pasta hidratada, é um material que se deteriora a temperaturas relativamente elevadas, como podem ser aquelas atingidas durante um episódio de incêndio.

Ainda convém ressaltar que, para além da exposição direta ao fogo e altas temperaturas durante um incêndio, em muitos casos as edificações também ficam submetidas a resíduos do incêndio durante um longo período. Isso porque, comumente, um incêndio gera inúmeras consequências negativas, como risco de vida e danos à integridade física dos usuários, possíveis perdas de lucratividade ou impossibilidade de uso do edifício, pelo menos de forma temporária, dentre outras. Por conta disso, em muitos casos, os proprietários de imóveis acometidos por um incêndio encontram-se sem as condições financeiras necessárias para iniciar um processo de recuperação imediato, recorrendo geralmente a seguradoras ou financiadoras, o que prolonga o tempo de restauração das estruturas, quando isto é possível. Assim, torna-se relevante também investigar possíveis efeitos da exposição a resíduos do incêndio na estrutura do concreto armado, uma vez que é possível que estes também influenciam em alterações químicas neste material.

2.3 Carbonatação

2.3.1 Processos físico-químicos da carbonatação

Segundo Oliveira (2019) a carbonatação 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).

Essa penetração e reação de carbonatação ocorre gradualmente, fazendo com que exista uma camada carbonatada que aumenta de espessura no decorrer do tempo, essa camada carbonatada é chamada de frente de carbonatação (CARMONA, 2005).

A penetração do CO_2 ocorre preponderantemente por difusão (PAULETTI, 2004). Outras formas de penetração do CO_2 como absorção capilar e migração de

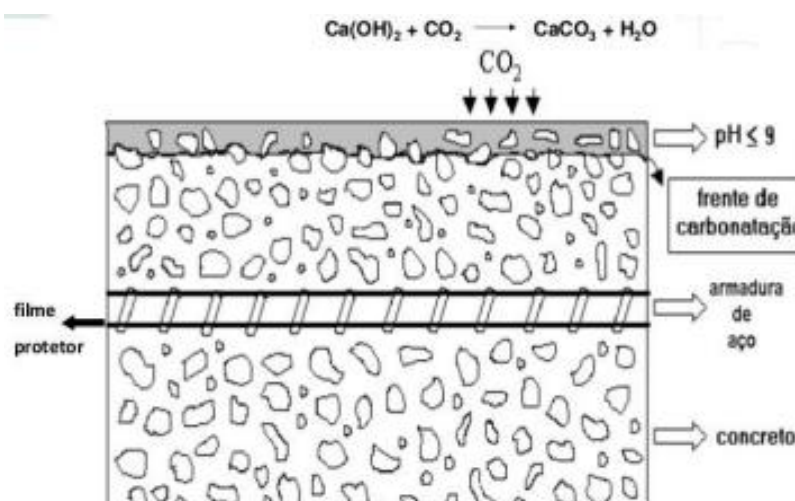
íons não se aplicam ao caso e dificilmente haverá gradientes de pressão que justifiquem permeabilidade (HELENE, 1993). Segundo Helene (1993) o concreto possui poros e capilares com diâmetros variando de alguns angstroms até milímetros, e esses poros estão parcialmente preenchidos por água. O gás carbônico terá então que difundir-se no concreto atravessando os poros com ar e com água.

A carbonatação é um fenômeno que pode ocorrer de forma natural, uma vez que o concreto fica exposto ao CO_2 presente na atmosfera. No entanto, a velocidade de avanço da carbonatação em condições naturais de exposição (0,03% em alto mar a 1% de CO_2 em certos ambientes industriais) é relativamente baixa, dessa forma, para que este fenômeno em condições naturais atinja uma profundidade que comprometa a durabilidade do concreto armado pode demorar anos (COSTA, 2012) e vai depender muito da qualidade do concreto e das condições do micro clima local.

Os compostos não hidratados também podem reagir com o CO_2 quando presente em altas concentrações, mas não em condições normais (PAULETTI, 2007).

No processo de carbonatação, o dióxido de carbono que está presente na atmosfera penetra na estrutura do concreto, se dissolvendo nas águas dos poros. A partir dessa interação é produzido um ácido carbônico (H_2CO_3), o qual sofre uma dissociação e passa a reagir com o hidróxido de cálcio e com hidratos de silicato de cálcio. Isso leva à precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), o que altera substancialmente o pH do concreto, tornando-o menor. Este processo é apresentado na **Figura 5**.

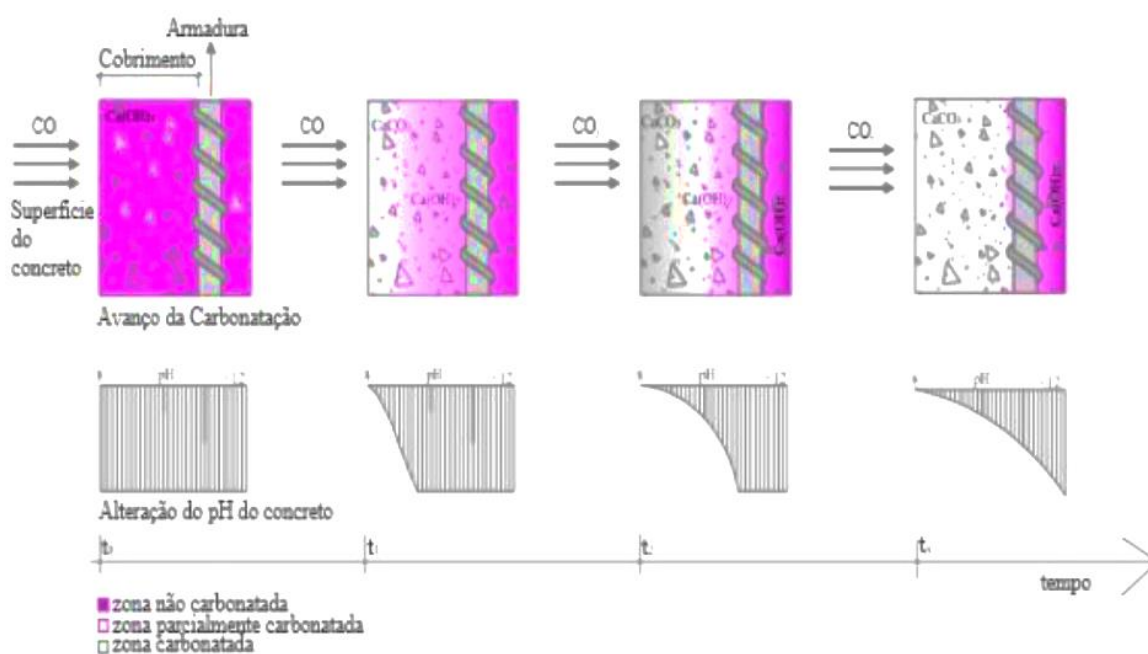
Figura 5 – Esquemático de penetração de frente de carbonatação.



Fonte: Araújo (2013).

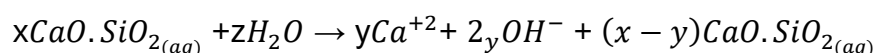
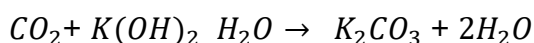
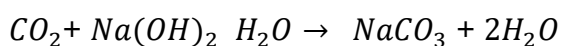
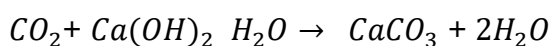
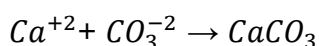
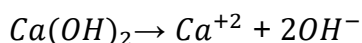
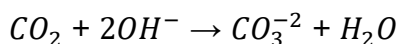
Conforme foi explicado no item 2.2.2 desta dissertação, o concreto protege a armadura de duas formas, tanto física, quanto química. A barreira química se constitui devido à alta alcalinidade do concreto, o que gera um filme protetor denominado como camada passivadora, o que protege a armadura, evitando sua corrosão (CARMONA, 2005; HELENE, 1993). A diminuição do pH, devido a reação explicada anteriormente, favorece o avanço da carbonatação da parte externa para o interior do concreto, o que pode comprometer a armadura ao gerar a despassivação (OLIVEIRA, 2019), conforme demonstrado na **Figura 6**. Cunha e Helene (2001) apontam que essa mudança no pH pode variar de uma média próxima de 12,6, nas primeiras idades em que o concreto possui alta alcalinidade, para valores próximos a 8 que ainda é alcalino mas pode estar carbonatado.

Figura 6 - Representação do avanço da carbonatação sobre o concreto conforme alteração do pH.



Fonte: Silva e Melo (2020).

Segundo Oliveira (2019), a “corrosão das armaduras devido à carbonatação do concreto ocorre de forma generalizada”. A armadura fica, portanto, em contato direto com a umidade presente no interior do concreto. Os diferentes processos físico-químicos que ocorrem na carbonatação estão demonstrados de forma detalhada nas equações a seguir, conforme apresentado por Costa (2012).



A velocidade e a profundidade em que um processo de carbonatação pode ocorrer depende de fatores relacionados tanto às próprias características finais do concreto endurecido, quanto de aspectos relacionados ao ambiente. Diferentes autores desenvolveram modelos de previsão da carbonatação, nos quais buscam explicar, através de fórmulas, o comportamento deste fenômeno, conforme descrito de forma mais aprofundada por Andrade (2001) e Costa (2012). Apesar de existirem vários modelos, eles se diferenciam pouco, sendo mais ou menos complexos (FIALHO; SEIBT; CARRIJO, 2019).

Para analisar os índices de carbonatação em uma estrutura de concreto armado, são utilizadas determinadas soluções, como a fenolftaleína e a timolftaleína, as quais funcionam como indicadores químicos que possibilitam medir a frente de carbonatação. Ao entrar em contato com a solução alcalina do concreto, essas substâncias adquirem colorações típicas a partir de um determinado pH da solução. A fenolftaleína, por exemplo, atinge uma coloração vermelha carmim com pH superior a 9,5, enquanto a timolftaleína adquire uma coloração azulada para um valor de pH da ordem de 10,5 (RIBEIRO et al., 2014).

Sendo um fenômeno que afeta de forma significativa o concreto armado, a carbonatação tem sido um tema bastante pesquisado na área de durabilidade e vida útil dessas estruturas, por se tratar de um processo que pode iniciar a corrosão da armadura devido à despassivação (ALMEIDA, 2019; RIBEIRO et al., 2014). Assim, torna-se relevante investigar os fatores que podem influenciar na sua velocidade e profundidade.

2.3.2 Fatores que influenciam na carbonatação

Diferentes fatores podem influenciar na velocidade e profundidade do processo de carbonatação do concreto armado. Estes fatores serão explicados de forma separada para otimizar a compreensão acerca da influência de cada um deles na carbonatação. Entretanto, é importante observar que, na prática, há uma influência dinâmica, em que estes diferentes aspectos influenciam em conjunto, seja em maior ou menor grau.

2.3.2.1 Relação Água/Cimento

Conforme foi descrito inicialmente, o concreto é composto principalmente por água, cimento e alguns agregados. A relação água/cimento é um dos fatores mais importantes na composição do concreto, uma vez que influencia diretamente em sua capacidade de resistência e durabilidade do material. Concretos com grande quantidade de água apresentam um aumento na dimensão de seus poros, os quais influenciam na permeabilidade do material, deixando-o mais exposto a agentes naturais e, portanto, diminuindo sua durabilidade (ALMEIDA, 2019; CARTAXO et al., 2020).

Dessa forma, pode-se dizer que a relação água/cimento é inversamente proporcional à resistência do concreto. Segundo Carmona (2005), a “redução desta relação provoca uma alteração significativa na dimensão dos poros e capilares, dificultando a difusão do gás carbônico através do concreto” e, por conseguinte, influencia a profundidade do processo de carbonatação.

No Brasil, a NBR 12655 (ABNT, 2022) define os valores para a relação água/cimento em massa de 0,65 a 0,45 como requisito para concretos convencionais, com a variação dependendo da classe de agressividade e qualidade do concreto.

De acordo com Soretz (apud. Helene, 1993, p.109) em trabalho clássico de observação de estruturas reais submetidas à atmosfera industrial, com diferentes relações água cimento, variando de 0,5 a 1,1 expostas durante 20 anos a ambiente externo, foi identificada profundidade carbonatada variando de 10 a 25 mm para

relação água/cimento de 0,95 e profundidade carbonatada inferior à 5mm para concretos de relação água/cimento de 0,60.

2.3.2.2 Tipo de Cimento e Adições

O tipo de cimento utilizado também é um fator central em relação à profundidade e velocidade de carbonatação. Mesmo com diferentes tipos de cimento, se a relação água/cimento for baixa com períodos de cura prolongados, o concreto tende a apresentar diferenças porém sempre com uma boa resistência à carbonatação (CARMONA, 2005).

No caso dos cimentos com adições, como por exemplo, de escória, filler calcário e fly-ash, pode-se obter uma menor alcalinidade no concreto e consequentemente maiores profundidades de carbonatação. Tuutti (1982) realizou experimentos que demonstram a difusão de oxigênio neste tipo de cimento, confirmando a hipótese descrita. Todavia, alguns pesquisadores não estão de acordo com a previsão de Tuutti (1982), questionando seu método de análise deste fator. Carmona (2005) aponta que pode ser arriscado comparar diferentes resultados da literatura a respeito deste fator, uma vez que há uma diferença nos ensaios produzidos para obter essa resposta (HELENE, 1993; CARMONA, 2005).

2.3.2.3 Concentração de CO₂ no Ambiente

A carbonatação é um processo diretamente relacionado à concentração do dióxido de carbono, uma vez que a difusão de CO₂ na estrutura do concreto é um fator central na ocorrência deste fenômeno (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007). Dessa forma, ambientes com maior concentração deste gás tendem a aumentar a velocidade e, portanto, a profundidade de carbonatação do concreto (CARTAXO et al., 2020). Conforme Carmona (2005), “considera-se normalmente que a concentração de CO₂ no ar pode variar de 0,03 a 0,05% em atmosferas rurais, de 0,1 a 1,2% em atmosferas de tráfego intenso e garagens a até 1,8% em atmosferas

viciadas (industriais)". Deste modo, ambientes urbanos parecem estar mais sujeitos a profundidades de carbonatação superiores que ambientes rurais.

2.3.2.4 Cura e Compactação do Concreto

Problemas na cura e na compactação produzem um aumento da porosidade na superfície externa do concreto, o que propicia a penetração de agentes dispostos no ambiente, como por exemplo o CO_2 , o que influencia bastante na velocidade de carbonatação (CARMONA, 2005; CARTAXO et al., 2020).

2.3.2.5 Umidade

Em ambientes com maior umidade, os poros presentes no concreto apresentam-se cheios de água, fazendo com que a velocidade de difusão de CO_2 seja menor do que em ambientes secos (ALMEIDA, 2019). Todavia, conforme visto anteriormente, na carbonatação há uma reação do CO_2 com a água, assim, embora em ambientes secos haja maior difusão, o CO_2 não apresenta reações devido a ausência da água. Nestes casos, uma situação intermediária - na qual há uma relativa quantidade de água que permite a reação, mas não é grande o suficiente para inviabilizar a difusão - promove maior velocidade de carbonatação (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007).

2.3.2.6 Temperatura

Alguns pesquisadores consideram que o incremento da temperatura favorece a penetração do CO_2 no concreto, como em qualquer processo de difusão (FIGUEIREDO, 2005; POSSAN, 2010), como também afirmado pela Lei de Arrhenius, criador da teoria de dissociação iônica, na qual determina-se que o aumento da temperatura provoca o incremento da velocidade das reações químicas segundo uma lei exponencial. Entretanto, outros autores apontam que a temperatura não influencia

de forma significativa o aumento na velocidade de carbonatação (ALMEIDA, 2019; DAL MOLIN, 2007), considerando oscilações de temperatura entre 20 e 40°C. Processos construtivos que utilizam cura acelerada com temperaturas de até 75 graus Celsius não apresentam riscos de aceleração descontrolada da carbonatação. Para temperaturas superiores a 100° C não foram encontrados registros na literatura consultada.

2.3.2.7 Fissuração

A influência da fissuração no processo é discutida por diferentes autores. Para Tuutti (1982), embora a fissuração favoreça a difusão de agentes externos na estrutura e, portanto, a carbonatação, durante a própria fissuração são gerados determinados produtos devido a corrosão, os quais começam a vedar aquela fissura, diminuindo o efeito deste fator sobre a carbonatação. Este autor ainda afirma que devido a estas reações, o concreto fissurado que foi submetido à carbonatação pode ser tratado como não fissurado. Já outros autores (CARMONA; HELENE, 1986) discutem que as fissuras influenciam sim neste processo, aumentando a carbonatação e os riscos de corrosão precoce da armadura em uma estrutura de concreto armado (CARMONA, 2005).

3 METODOLOGIA

3.1 Programa Experimental

O conceito macro do programa experimental referente ao estudo em epígrafe tem como premissa avaliar de forma comparativa corpos de prova que seriam submetidos à fuligem por um período de um ano, em relação à corpos de provas semelhantes e que não seriam submetidos à fuligem, também pelo período de um ano. 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 por se tratar do insumo de maior consumo no país.

Dos corpos de prova executados para cada traço, 20 foram submetidos à fumaça proveniente de incêndio simulando materiais combustíveis encontrados em uma edificação residencial, por um período de 90 minutos, porém sem que fossem submetidos a temperaturas acima de 200°C, e os 20 restantes dos corpos de prova foram preservados.

Logo após a queima e consequente impregnação de fuligem, no momento denominado de tempo 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.

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 90, 180, 270 e 360 dias a partir da data inicial (T=0), onde os corpos de provas foram lacrados com as fuligens nas condições à que foram compelidos, 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 perpendicularmente à área seccionada.

A solução de fenolftaleína empregada obteve 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 com paquímetro, e ao fim do processo (medição da área carbonatada nas situações sem presença de fuligem, com fuligem), foi executado um gráfico comparativo entre as medições, identificando se houve alteração na frente de carbonatação comparando os que foram submetidos a fuligem e os que ficaram fora do invólucro.

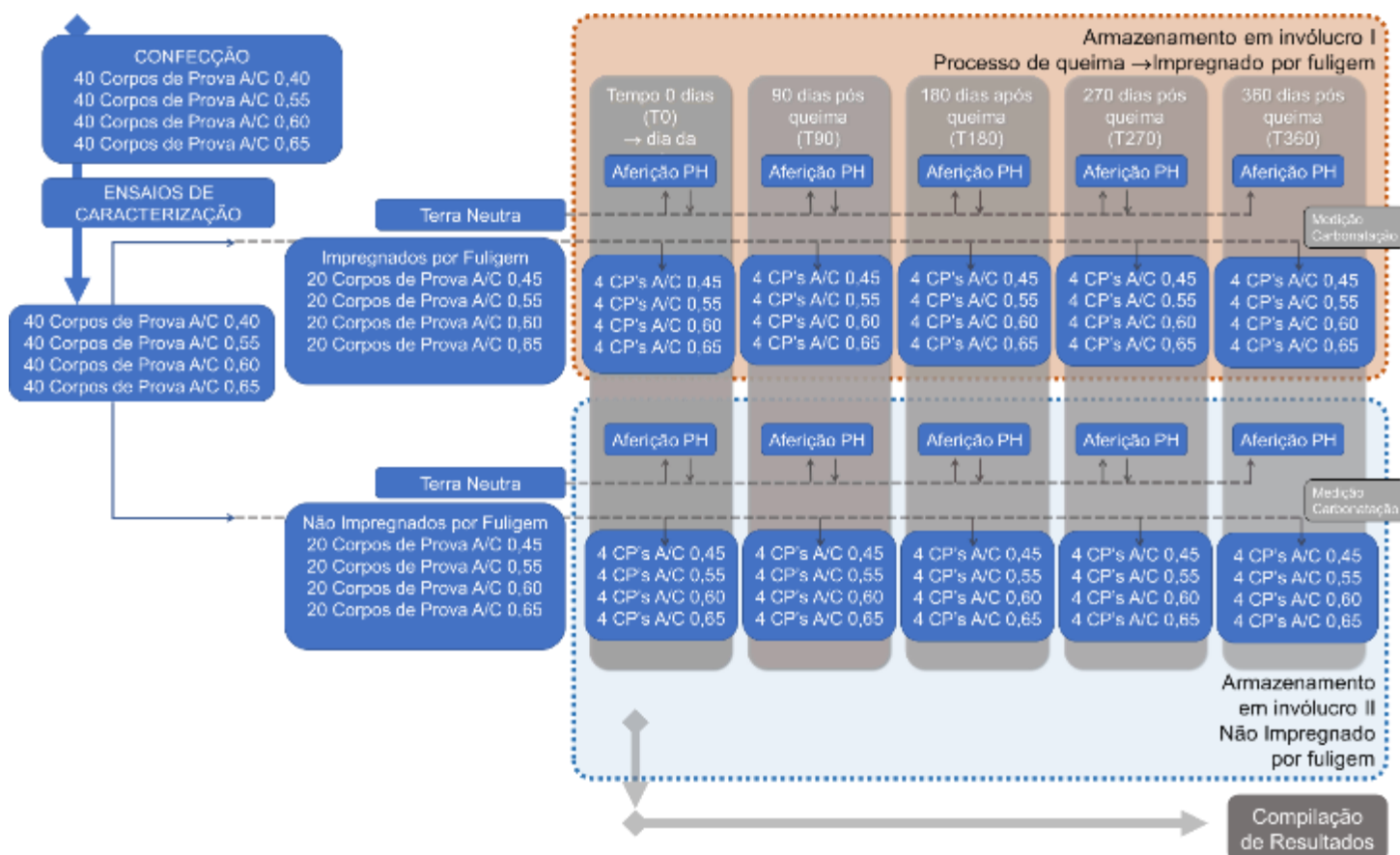
No final deste procedimento foram coletados gráficos comparativos e evolutivos, entre corpos de prova de concreto que ficaram submetidos a fuligem por um período de um ano, em relação a corpos de prova que não foram submetidos a fuligem.

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.

A lógica esperada com este programa experimental foi verificar: (1) se a frente de carbonatação avançou mais em corpos de prova impregnados por fuligem em comparação a corpos de prova não impregnados por fuligem, e (2) verificar se ambientes impregnados por fuligem tendem a ser mais agressivos do que ambientes não impregnados por fuligem.

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



Fonte: autor.

Serão detalhados na sequência os materiais e procedimentos utilizados e realizados neste programa experimental.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 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 NBR 5738 (ABNT, 2015). Os materiais utilizados para a produção das amostras de concreto foram: cimento tipo CP II-F marca *Votoran*; areia

média ensacada marca *AB Areias*; brita 1; água; aditivo fluidificante marca *Flumais* produzido pela empresa *Aditive*.

Os materiais foram adquiridos em depósitos de materiais de construção, dias antes do procedimento de confecção.

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 - Relação da quantidade de material (kg) utilizado para a moldagem dos corpos de prova por traço.

Material utilizado para a moldagem dos corpos				
Material	Relação Água/Cimento (a/c)			
	0,45	0,55	0,60	0,65
Cimento (kg)	19.4	15.8	14.5	13.3
Areia (kg)	39.8	43.1	44.3	45.4
Brita (kg)	37.8	37.7	37.6	37.5
Água (kg)	8.7	8.7	8.7	8.7
Aditivo (kg)	0,200	0,100	0,100	0,000
Slump (cm)	18.0	17.0	16.0	16.0

Fonte: autor.

Para analisar as variáveis de interesse deste estudo, foram produzidos 160 discos de concreto de 5cm de altura por 10cm de diâmetro, em 4 traços de concreto [relação água/cimento (a/c):0,45; 0,55; 0,60 e 0,65], conforme preconiza a NBR 12655

(ABNT, 2015). A **Figura 7** demonstra a moldagem dos corpos de prova durante a fase de confecção.

Figura 7 - Preparação dos corpos de prova.



Fonte: autor.

Após essa etapa, foi realizado o teste abatimento de tronco de cone (Slump Test) para avaliar a consistência do concreto no estado fresco, com base nos critérios estabelecidas pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998). O abatimento para as peças de concreto foi de “16+/- 2 cm” e para corrigi-lo foi utilizado aditivo plastificante, sendo a quantidade utilizada está especificada na Tabela de traços. A **Figura 8** demonstra esse processo.

Figura 8 - Teste de teste abatimento de tronco de cone.



Fonte: autor.

Em seguida, os corpos de prova passaram pelo processo de cura (**Figura 9**) úmida submersa, ficando submersos por 7 dias e depois foram removidos.

Figura 9 - Processo de cura do concreto.



Fonte: autor.

Os corpos de prova excedentes foram submetidos a ensaios para caracterização de suas propriedades físicas (resistência a compressão, tração, dimensões, massa específica, índice de vazios), além de suas composições químicas. Os resultados destes ensaios estão apresentados nas tabelas seguintes.

A **Tabela 2** apresenta a identificação dos corpos de prova.

Tabela 2 - Identificação dos corpos de prova.

Identificação do Cliente	Dados do IPT
	LMPC N°
"Amostra 1 - Concreto 45"	249-22
"Amostra 2 - Concreto 55"	250-22
"Amostra 3 - Concreto 60"	251-22
"Amostra 4 - Concreto 65"	252-22

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2023)

A **Tabela 3** apresenta os resultados dos ensaios físicos realizados conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), com o intuito de verificar os principais índices físicos das amostras.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios físicos NBR 9778 (ABNT, 2005).

Amostra N°	C. P. N°	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica da amostra seca (g/cm³)	Massa específica da amostra saturada (g/cm³)	Massa específica real (g/cm³)
249-22	1	6,4	13,8	2,17	2,31	2,51
	2	6,2	13,5	2,17	2,31	2,52
	3	6,4	13,7	2,16	2,30	2,51
	Média	6,3	13,7	2,17	2,31	2,51
250-22	1	7,1	15,2	2,17	2,32	2,55
	2	7,4	15,8	2,13	2,31	2,57
	3	7,4	15,8	2,14	2,30	2,55
	Média	7,3	15,6	2,15	2,31	2,56
251-22	1	6,9	15,0	2,16	2,31	2,55
	2	8,0	17,1	2,15	2,31	2,55
	3	7,5	16,0	2,15	2,31	2,56
	Média	7,5	16,0	2,15	2,31	2,55
252-22	1	7,4	15,9	2,15	2,31	2,55
	2	8,3	17,8	2,14	2,32	2,61
	3	8,3	17,6	2,12	2,30	2,57
	Média	8,0	17,1	2,14	2,31	2,58

Realização dos ensaios: período entre 14.04.2022 a 25.04.2022.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2023)

A **Tabela 4** apresenta os resultados de resistência à compressão axial realizados conforme NBR 5739 (ABNT, 2018), bem como a medição de suas dimensões médias.

Tabela 4 - Resultados de resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2018).

Amostra N°	CP n°	Dimensões médias (mm)		Resistência à compressão (MPa)
		Altura (h)	Diâmetro (d)	
249-22	4	198,6	99,7	51,4
	5	197,8	98,8	52,1
	6	198,5	99,2	52,2
250-22	4	195,4	100,1	43,0
	5	196,1	99,5	42,8
	6	195,8	100,9	42,3
251-22	4	198,0	99,4	36,8
	5	197,9	100,5	38,3
	6	196,4	101,4	37,0
252-22	4	198,7	99,3	34,2
	5	197,6	99,3	34,3
	6	198,6	99,2	35,6

Realização dos ensaios: 19.04.2022.

Máquina de ensaio: Classe 1.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2023)

A **Tabela 5** apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011), com o intuito de verificar a resistência à tração dos corpos de prova.

Tabela 5 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral NBR 7232 (ABNT, 2011).

Amostra N°	CP n°	Dimensões médias (mm)		Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
		Altura (h)	Diâmetro (d)	
249-22	7	200,0	100,2	4,39
	8	200,3	99,9	4,73
	9	199,8	100,1	4,64
250-22	7	197,4	99,3	3,52
	8	197,1	99,8	3,82
	9	198,2	98,8	3,93
251-22	7	199,4	99,6	3,70
	8	199,5	99,9	3,57
	9	199,0	100,4	3,98
252-22	7	200,0	100,1	3,55
	8	200,5	100,0	3,52
	9	200,5	100,2	3,62

Realização dos ensaios: 26.04.2022.

Máquina de ensaio: Classe 1.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2023)

As **Tabelas 6.1 e 6.2** apresentam os resultados da composição química dos concretos, com o intuito de verificar a quantidade de cada um dos principais componentes químicos de cada amostra.

Tabela 6.1 - Composição química dos corpos de prova por traço de concreto (0.45 e 0.55).

Determinações	Resultados, em %			
	"Amostra 1 - Concreto 45" (LMPC N° 249-22)		"Amostra 2 - Concreto 55" (LMPC N° 250-22)	
	BO	BNV	BO	BNV
Umidade	5,99	---	5,92	---
Perda ao fogo	6,32		5,49	
Resíduo insolúvel	64,5	73,6	69,5	78,4
Anidrido silícico (SiO ₂)	5,60	6,39	4,68	5,28
Óxidos de ferro e alumínio (R ₂ O ₃)	3,01	3,43	2,60	2,93
Óxido de cálcio (CaO)	13,2	15,0	10,8	12,2
Óxido de magnésio (MgO)	0,99	1,13	0,81	0,91
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,06	0,07	0,03	0,03
Anidrido carbônico (CO ₂)	1,97	---	1,78	---
Sulfeto (S ²⁻)	0,08	---	0,07	---

BO: base original; BNV: base de não voláteis.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2023)

Tabela 6.2 - Composição química dos corpos de prova por traço de concreto (0.60 e 0.65).

Determinações	Resultados, em %			
	"Amostra 3 - Concreto 60" (LMPC N° 251-22)		"Amostra 4 - Concreto 65" (LMPC N° 252-22)	
	BO	BNV	BO	BNV
Umidade	6,91	---	5,66	---
Perda ao fogo	4,90		4,70	
Resíduo insolúvel	71,3	80,8	73,5	82,0
Anidrido silícico (SiO ₂)	4,10	4,65	3,84	4,28
Óxidos de ferro e alumínio (R ₂ O ₃)	2,31	2,62	2,23	2,49
Óxido de cálcio (CaO)	9,57	10,8	8,99	10,0
Óxido de magnésio (MgO)	0,72	0,82	0,68	0,76
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	0,06	0,07	0,04	0,04
Anidrido carbônico (CO ₂)	1,43	---	1,42	---
Sulfeto (S ²⁻)	0,07	---	0,05	---

BO: base original; BNV: base de não voláteis.

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2023)

As **Tabelas 7.1 e 7.2** demonstram a quantidade de cada material utilizado em cada traço.

Tabela 7.1 – Quantidade de materiais utilizado para cada traço de concreto (0.45 e 0.55).

Parâmetros calculados, em massa		Resultados	
		"Amostra 1 - Concreto 45" (LMPC Nº 249-22)	"Amostra 2 - Concreto 55" (LMPC Nº 250-22)
Cálculo do traço a partir do resíduo insolúvel (RI)	Cimento, em %	26,4	21,6
	Agregado silicoso, em %	73,6	78,4
	Traço (cimento : agregados)	1 : 2,8	1 : 3,6
	Consumo de cimento, em kg/m ³	461	373
Cálculo do traço a partir do anidrido silício (SiO ₂)	Cimento, em %	24,2	24,2
	Agregado silicoso, em %	73,6	78,4
	Traço (cimento : agregados)	1 : 2,8	1 : 3,6
	Consumo de cimento, em kg/m ³	461	375
Cálculo do traço a partir do óxido de cálcio (CaO)	Cimento, em %	26,0	21,2
	Agregado silicoso, em %	73,6	78,4
	Traço (cimento : agregados)	1 : 2,8	1 : 3,7
	Consumo de cimento, em kg/m ³	457	368
Valores médios	Cimento, em %	26,3	21,5
	Agregado silicoso, em%	73,6	78,4
	Traço (cimento : agregados)	1 : 2,8	1 : 3,6
	Consumo de cimento, em kg/m ³	460	372

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2023)

Tabela 7.2 – Quantidade de materiais utilizado para cada traço de concreto (0.60 e 0.65).

Parâmetros calculados, em massa		Resultados	
		"Amostra 3 - Concreto 60" (LMPC Nº 251-22)	"Amostra 4 - Concreto 65" (LMPC Nº 252-22)
Cálculo do traço a partir do resíduo insolúvel (RI)	Cimento, em %	19,2	18,0
	Agregado silicoso, em %	80,8	82,0
	Traço (cimento : agregados)	1 : 4,2	1 : 4,6
	Consumo de cimento, em kg/m ³	328	319
Cálculo do traço a partir do anidrido silícico (SiO ₂)	Cimento, em %	19,2	17,7
	Agregado silicoso, em %	80,8	82,0
	Traço (cimento : agregados)	1 : 4,2	1 : 4,6
	Consumo de cimento, em kg/m ³	328	315
Cálculo do traço a partir do óxido de cálcio (CaO)	Cimento, em %	18,8	17,4
	Agregado silicoso, em %	80,8	82,0
	Traço (cimento : agregados)	1 : 4,3	1 : 4,7
	Consumo de cimento, em kg/m ³	325	312
Valores médios	Cimento, em %	19,1	17,7
	Agregado silicoso, em%	80,8	82,0
	Traço (cimento : agregados)	1 : 4,2	1 : 4,6
	Consumo de cimento, em kg/m³	327	315

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2023)

Comparando o consumo de cimento obtido no ensaio de recomposição de traço, em relação à pesagem real, utilizada para confecção dos corpos de prova, constatamos variações que vão de 0,5% a 4,3% conforme tabela comparativa (**Tabela 8**) apresentada a seguir:

Tabela 8 – Tabela comparativa do consumo de cimento em kg/m³ com base nos resultados obtido no ensaio de recomposição de traço, em relação à pesagem real, utilizada para confecção dos corpos de prova

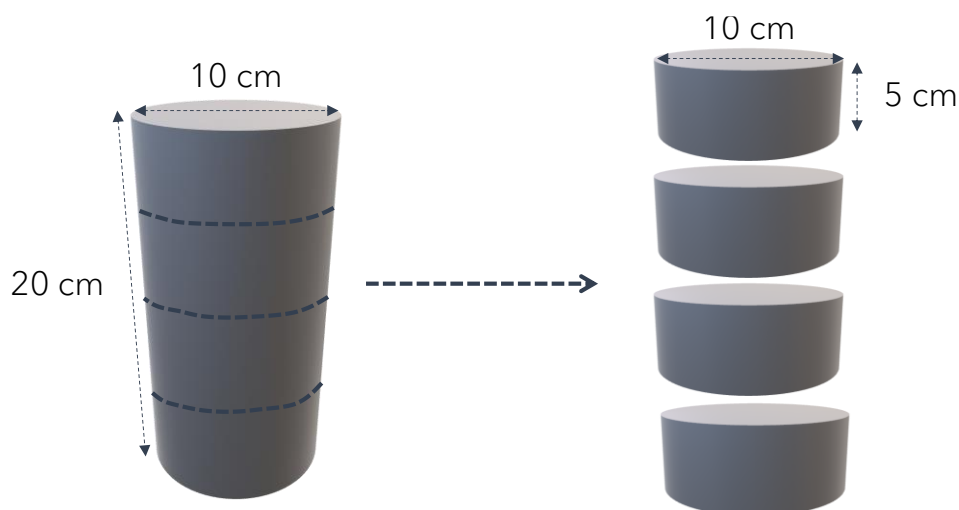
Comparativo - Consumo de Cimento (kg/m ³) - Ensaio x Utilizado para Confecção				
Consumo de Cimento Verificado em Ensaio de Caracterização	460	372	327	315
Consumo de cimento utilizado para confecção dos corpos de prova	441	359	329	303
Variação (%)	4,3458	3,5889	-0,5012	3,9785

Fonte: autor.

A partir disso, os corpos de prova foram cortados em discos de 5cm de altura por 10cm de diâmetro, como demonstrado na **Figura 10**.

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 figura a seguir:

Figura 10 – Ilustração da secção dos corpos de prova.



Fonte: autor.

Figura 11 - Processo de secção dos discos.



Fonte: autor.

3.2.2 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 NBR 15575 (ABNT, 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 NBR 12721 (ABNT, 2005) para coletar as características construtivas de cada edificação conforme projetos-padrão.

A partir desses dados foi calculado, aproximadamente, 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/m² de material combustível). Com base nessa estimativa, pode-se fazer um cálculo relacionado à área do invólucro (em m²) 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. Os resultados deste cálculo são demonstrados na **Tabela 9**.

Após fazer esse cálculo para cada ambiente, obteve-se como resultado o total de 75 kg de material combustível/m² 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. São apresentados a seguir o registro fotográfico da pesagem dos materiais fracionados para cada uma das formas que foram introduzidas no invólucro.

Tabela 9 – Cálculo de materiais combustíveis para queima.

Ambiente	Modelo e Fonte	Qtd.	Unidade	Elementos Combustíveis (kg)					Total Geral
				Madeira	Espuma	Tecido	Elemento Plástico	Mineral (Cerâmica/Forro Mineral)	
Dormitório de Casal									
Revestimento Piso	Cerâmico	9	m²	-	-	-	-	108,00	108,00
Revestimento Parede	Pintura	30	m²	-	-	-	-	-	-
Forro	Forro	9	m²	-	-	-	-	90,00	90,00
Esquadria	Madeira	10,6	m²	212,00	-	-	-	-	212,00
Cama de casal	MasterBox - King Size Full - Bipartido	1	un	82,89	9,21	-	-	-	92,10
Guarda Roupa	Guarda-roupa Casal Com Espelho 6 Portas E 4 Gavetas 7000-araplaç - Imbuia	1	un	164,00	-	-	-	-	164,00
Roupas	Base - Consul	2	pessoa	-	-	38,00	-	-	256,10
Televisor	Modelo KD-65X755F - Sony	1	un	-	-	-	21,40	-	21,40
Criado Mudo	Criado-Mudo Espelhado com 2 Gavetas Dalla Costa Branco	2	un	59,00	-	-	-	-	59,00
Sub-Total - Dormitório - Casal				517,89	9,21	38,00	21,40	198,00	1.002,60
Dormitório Solteiro 1									
Revestimento Piso	Cerâmico	9	m²	-	-	-	-	108,00	108,00
Revestimento Parede	Pintura	30	m²	-	-	-	-	-	-
Forro	Forro	9	m²	-	-	-	-	90,00	90,00
Esquadria	Madeira	3	m²	90,00	-	-	-	-	90,00
Cama Solteiro	MasterBox - Solteiro	2	un	63,18	7,02	-	-	-	70,20
Guarda Roupa	Guarda-roupa Casal Com Espelho 6 Portas E 4 Gavetas 7000-araplaç - Imbuia	1	un	164,00	-	-	-	-	164,00
Roupas	Base - Consul	2	pessoa	-	-	38,00	-	-	38,00
Televisor	Modelo KD-65X755F - Sony	1	un	-	-	-	21,40	-	21,40
Criado Mudo	Criado-Mudo Espelhado com 2 Gavetas Dalla Costa Branco	2	un	29,50	-	-	-	-	29,50
Sub-Total - Dormitório - Solteiro 1				346,68	7,02	38,00	21,40	198,00	611,10
Dormitório Solteiro 2									
Revestimento Piso	Cerâmico	9	m²	-	-	-	-	108,00	108,00
Revestimento Parede	Pintura	30	m²	-	-	-	-	-	-
Forro	Forro	9	m²	-	-	-	-	90,00	90,00
Esquadria	Madeira	10,6	m²	212,00	-	-	-	-	212,00
Cama Solteiro	MasterBox - Solteiro	2	un	63,18	7,02	-	-	-	70,20
Guarda Roupa	Guarda-roupa Casal Com Espelho 6 Portas E 4 Gavetas 7000-araplaç - Imbuia	1	un	164,00	-	-	-	-	164,00
Roupas	Base - Consul	2	pessoa	-	-	38,00	-	-	38,00
Televisor	Modelo KD-65X755F - Sony	1	un	-	-	-	21,40	-	21,40
Criado Mudo	Criado-Mudo Espelhado com 2 Gavetas Dalla Costa Branco	2	un	29,50	-	-	-	-	29,50
Sub-Total - Dormitório - Solteiro 2				468,68	7,02	38,00	21,40	198,00	733,10
Sala									
Revestimento Piso	Cerâmico	35	m²	-	-	-	-	420,00	420,00
Revestimento Parede	Pintura	59	m²	-	-	-	-	-	-
Forro	Gesso	35	m²	-	-	-	-	350,00	350,00
Esquadrias	Madeira	10,6	m²	212,00	-	-	-	-	212,00
Sofá	Sofá 3 Lugares 1,98m Evolution Requite	2	un	64,00	16,00	-	-	-	80,00
Televisor	Modelo KD-65X755F - Sony	1	un	-	-	-	21,40	-	21,40
Criado Mudo	Criado-Mudo Espelhado com 2 Gavetas Dalla Costa Branco	2	un	29,50	-	-	-	-	29,50
Sub-Total - Sala				305,50	16,00	-	21,40	770,00	1.112,90
Cozinha									
Revestimento Piso	Cerâmico	35	m²	-	-	-	-	420,00	420,00
Revestimento Parede	Cerâmico	59	m²	-	-	-	-	708,00	708,00
Forro	Gesso	35	m²	-	-	-	-	350,00	350,00
Esquadrias	Madeira	10,6	m²	212,00	-	-	-	-	212,00
Ármários Cozinha	Armário Aéreo 2 Portas Para Cozinha Altura: 0,62 mt Largura: 0,60 mt Profundidade: 0,27 mt Peso: 10,50 Kg	10	un	105,00	-	-	-	-	105,00
Geladeira	Geladeira / Refrigerador Electrolux, Duplex, Frost Free, 553L, Branco - DF82	1	un	-	-	-	101,65	-	-
Sub-Total - Cozinha				317,00	-	-	101,65	1.478,00	1.795,00
Total				1.955,75	39,25	114,00	187,25	2.842,00	5.138,25
Área (m²)									106,44
Peso / m²				18,37	0,37	1,07	1,76	26,70	48,27
Peso no Invólucro				6,56	0,13	0,38	0,63	9,53	17,23
Peso por Fôrma				1,64	0,03	0,10	0,16	2,38	4,31

Fonte: autor.

A quantidade de materiais utilizados para queima conforme a área do invólucro são demonstradas a seguir (**Figura 12**, **Figura 13**, **Figura 14** e **Figura 15**).

Figura 12 – Madeira, do tipo lenha de pinho, utilizada para queima no experimento.



Fonte: autor.

Figura 13 - Espuma utilizada para queima no experimento.



Fonte: autor.

Figura 14 - Tecido utilizado para queima no experimento.



Fonte: autor.

Figura 15 - Plástico utilizado para queima no experimento.



Fonte: autor.

3.2.3 Invólucro

Em busca por invólucros específicos para ensaios similares ao proposto neste programa de trabalho, que fossem normatizados, onde poderíamos introduzir fuligem nos corpos de prova, sem que estes sofressem por calor, não foi obtido êxito.

Neste sentido para realizar a queima do material foi adquirido um defumador adaptado (**Figura 16**), 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 era constituído de aço inox, a 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 termómetro 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 16 - Defumador utilizado como invólucro para queima dos corpos de prova.



Fonte: autor.

3.2.4 Terra de pH neutro para medição do pH

Para efeito comparativo do índice de pH, um recipiente com terra colocado fora do invólucro, enquanto outro foi adicionado no interior do invólucro e, conseqüentemente, exposto à fumaça, conforme mostrado na **Figura 17**.

Não existe normalização para esta medição, sendo a definição desta metodologia realizada de forma empírica com intuito a se obter dados que permitam

avaliar, se há diferença entre as condições atmosféricas do ambiente impregnado por fuligem e o ambiente que não foi impregnado por fuligem.

Figura 17 - Recipiente de terra colocado no exterior do invólucro (a) e no interior do invólucro (b).



Fonte: autor.

3.3 Procedimentos efetuados

3.3.1 Queima do material

Em pesquisa bibliográfica 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 foi desenvolvido conforme descrito no parágrafo a seguir.

A queima do material foi realizada na parte inferior do invólucro, conforme demonstrado na **Figura 18**, enquanto os corpos de prova foram dispostos no interior (parte superior) do invólucro (**Figura 19**), 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.

Figura 18 – Materiais para queima no interior do invólucro.



Fonte: autor.

Figura 19 - Corpos de prova dispostos no interior do invólucro, sendo que cada traço foi disposto em um nível do invólucro.



Fonte: autor.

A queima do material foi feita com o invólucro fechado (**Figura 20**) 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).

Figura 20 - Queima do material com o invólucro fechado.



Fonte: autor.

Ao longo da queima foi feito o monitoramento da temperatura para que esta não ultrapassasse 200° C, temperatura esta em que se começam as primeiras modificações físico-químicas. Para não causar estas alterações no concreto devido a temperaturas muito elevadas, quando esta chegava a aproximadamente 150°C, conforme verificado no termômetro disposto na parte superior no invólucro (**Figura 21**), iniciava-se um processo de resfriamento externo, com água e ventilação. Dessa forma, foi possível resfriar o invólucro na parte externa superior, evitando que a temperatura passasse do valor esperado (máximo 200°C, a qual não foi atingida no experimento).

Figura 21 - Termômetro disposto na parte superior no invólucro.



Fonte: autor.

3.3.2 Medições

O procedimento para medição da frente de carbonatação consistiu na secção no centro dos testemunhos e aplicação, via aspersão, da solução de fenolftaleína perpendicularmente à área selecionada. A **Figura 22**, a seguir, representa as etapas deste processo.

Figura 22 – Ilustração do procedimento de aspersão da solução de fenolftaleína.



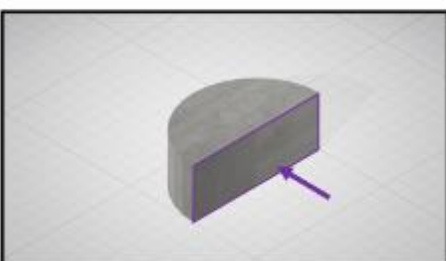
Situação 1

Remoção do testemunho impregnado do recipiente.



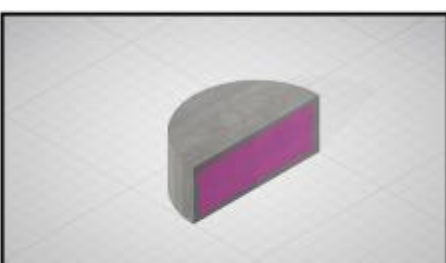
Situação 2

Secção do testemunho em seu eixo central.



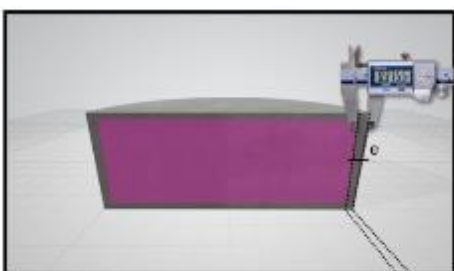
Situação 3

Aplicação de solução de fenolftaleína no testemunho.



Situação 4

Medição da área carbonatada com paquímetro, para comparativo com demais testemunhos.



Situação 5

Detalhe do procedimento de aferição da área carbonatada com paquímetro. Sempre aferindo a área mais profunda, sendo “e” a medida entre o início da reação da fenolftaleína e a face da peça.

Fonte: autor.

A solução de fenolftaleína empregada contém a proporção de 1g da fenolftaleína em 50 ml de álcool etílico. Com esta aplicação é 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 uma variação de cor entre rosa a vermelho-carmim, de pH entre 8,3 e 9,5, ou somente vermelho carmim, de pH superior a 9,5 (RIBEIRO et al. 2014).

A medição da área carbonatada foi realizada nos corpos de prova com e sem impregnação de fuligem. A área carbonatada foi aferida com paquímetro (**Figura 23**) em todas essas condições 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.

Figura 23 – Medição da área carbonatada com paquímetro.



Fonte: autor.

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.

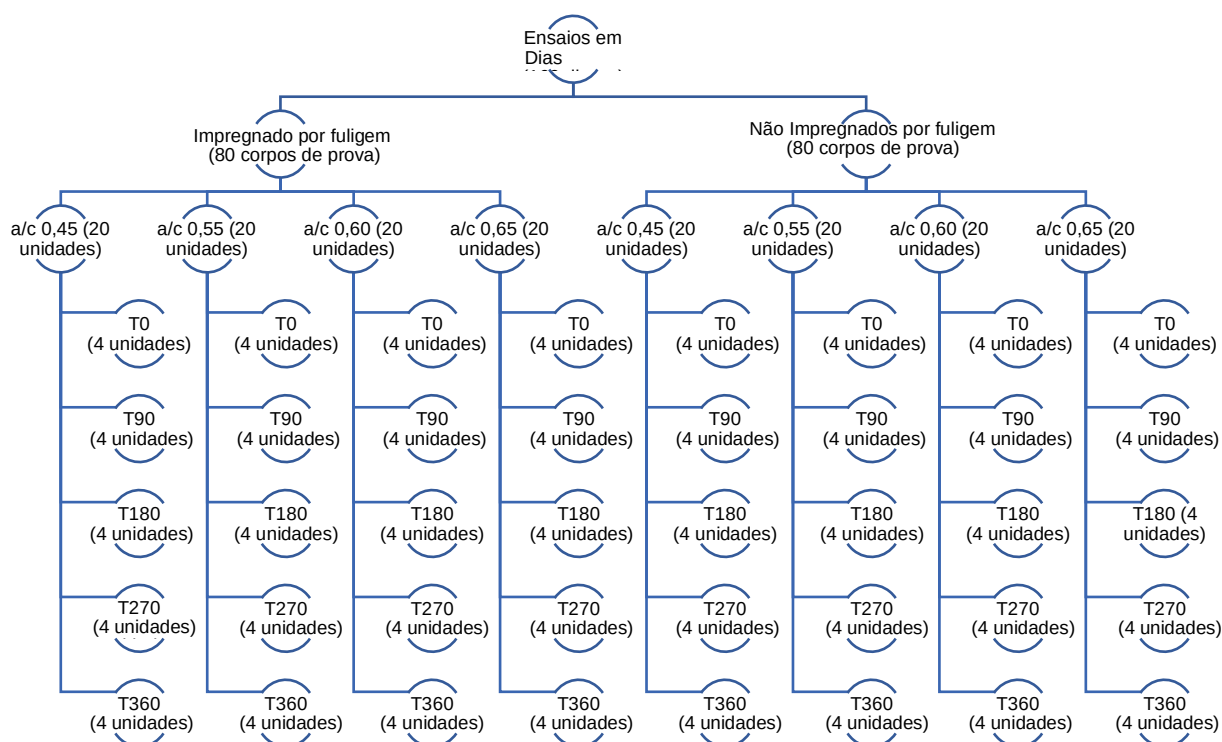
3.3.3 Idade do Rompimento dos Corpos de Prova

A medição da frente de carbonatação nos corpos de prova impregnados por fuligem foi efetuada nos seguintes períodos: 0, 90, 180, 270 e 360 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.

Medição semelhante e comparativa foi feita nos mesmos períodos para os corpos de prova não impregnados por fuligem, estes ficaram armazenados em invólucro que não passou por processo de queima e consequente impregnação de fuligem, protegido contra precipitações, e luz solar.

A **Figura 24** apresenta um esquema sobre o período de realização dos ensaios.

Figura 24 - Ilustração dos momentos de execução dos ensaios.



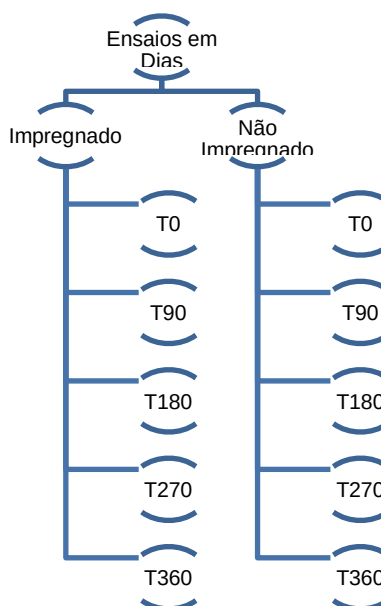
Fonte: autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Medição do pH

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. A **Figura 25** demonstra os períodos de medição do pH da terra.

Figura 25 - Períodos de medição do pH da terra dos recipientes expostos ou não à fuligem.



Fonte: autor.

Os resultados da medição de pH da terra nos recipientes colocados fora ou dentro do invólucro são demonstrados nas figuras a seguir para o período de T0 (inicial, **Figura 26**), 90 dias (**Figura 27**), 180 dias (**Figura 28**), 270 dias (**Figura 29**) e 360 dias (**Figura 30**).

Figura 26 - Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro impregnado por fuligem no período de T0.



Fonte: autor.

Figura 27 - Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro impregnado por fuligem no período de 90 dias.



Fonte: autor.

Figura 28 - Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro impregnado por fuligem no período de 180 dias.



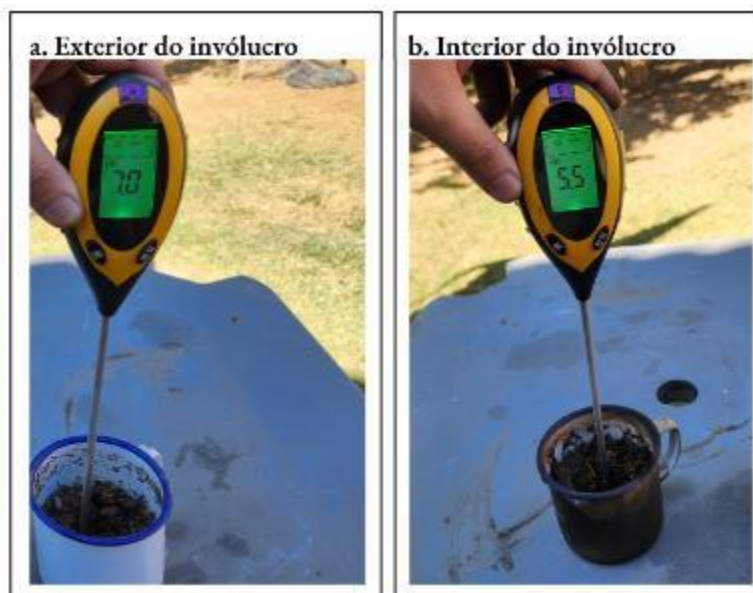
Fonte: autor.

Figura 29 - Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro impregnado por fuligem no período de 270 dias.



Fonte: autor.

Figura 30 - Diferença de pH nos recipientes dispostos fora (a) e dentro (b) do invólucro no período de 360 dias.



Fonte: autor.

Estes dados estão sumarizados na **Tabela 10**. Como pode-se observar, em todas as aferições, ou seja, nos diferentes períodos, foi verificado um pH mais baixo na amostra que foi colocada dentro do invólucro (exposta à fuligem residual), conforme esperado neste estudo.

Tabela 10 – Índice de pH da terra nos diferentes períodos.

	Situação	Potencial Hidrogeniônico (pH)				
		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

Fonte: autor.

4.2 Carbonatação

4.2.1 Concreto de traço 0.45

A **Tabela 11** demonstra a penetração de carbonatação obtida para os corpos de prova de traço 0.45, impregnados ou não impregnados, conforme o tempo de exposição à fuligem.

Tabela 11 – Frente de carbonatação, em centímetros (cm), no concreto de traço 0.45 conforme o tempo e exposição à fuligem.

		T0	T90	T180	T270	T360
		19/6/22	24/9/22	16/12/22	16/3/23	14/6/23
0,45	Impregnado	0,14	0,44	0,51	0,52	0,9
		0	0,45	0,48	0,6	0,7
		0,1	0,47	0,46	0,55	0,46
		0,1	0,5	0,44	0,57	0,42
		0,085	0,465	0,4725	0,56	0,62
	Não Impregnado	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0

Fonte: autor.

A seguir é demonstrada a comparação entre as áreas de frente de carbonatação para os corpos de prova de traço 0.45 nos diferentes períodos de exposição à fuligem: T0 (**Figura 31**); T90 (**Figura 32**); T180 (**Figura 33**); T270 (**Figura 34**) e T360 (**Figura 35**).

Figura 31 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T0.



Fonte: autor.

Figura 32 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T90.



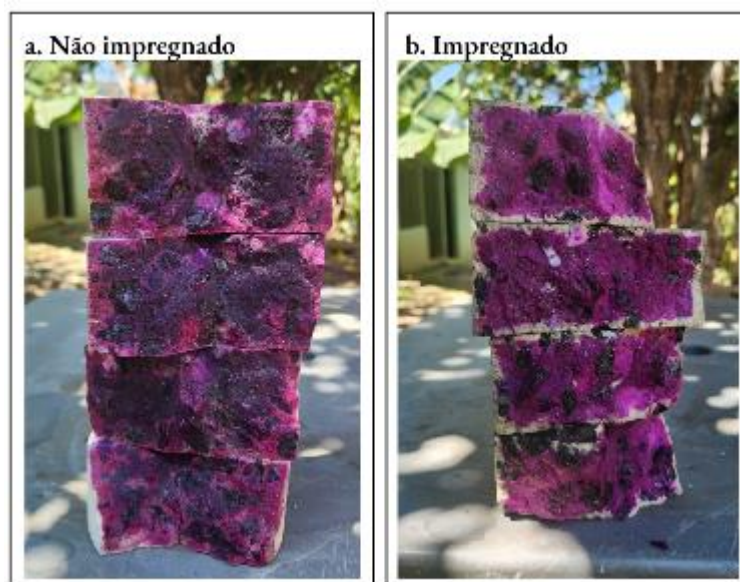
Fonte: autor.

Figura 33 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T180



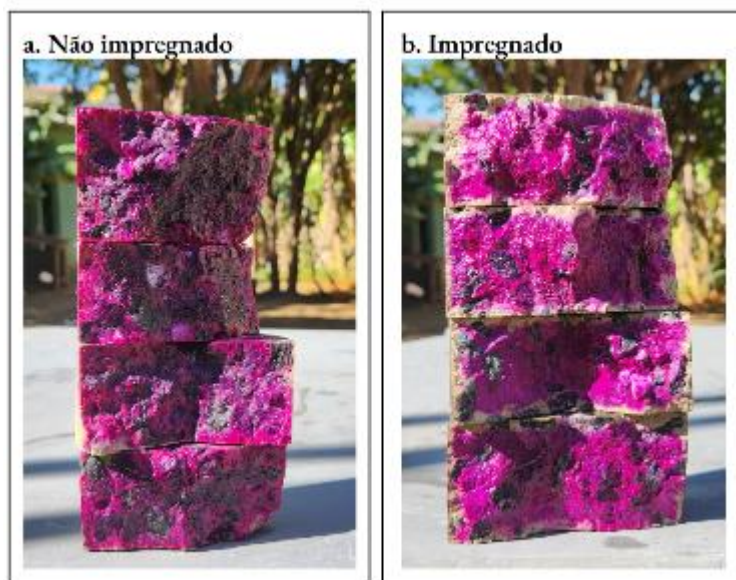
Fonte: autor.

Figura 34 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T270.



Fonte: autor.

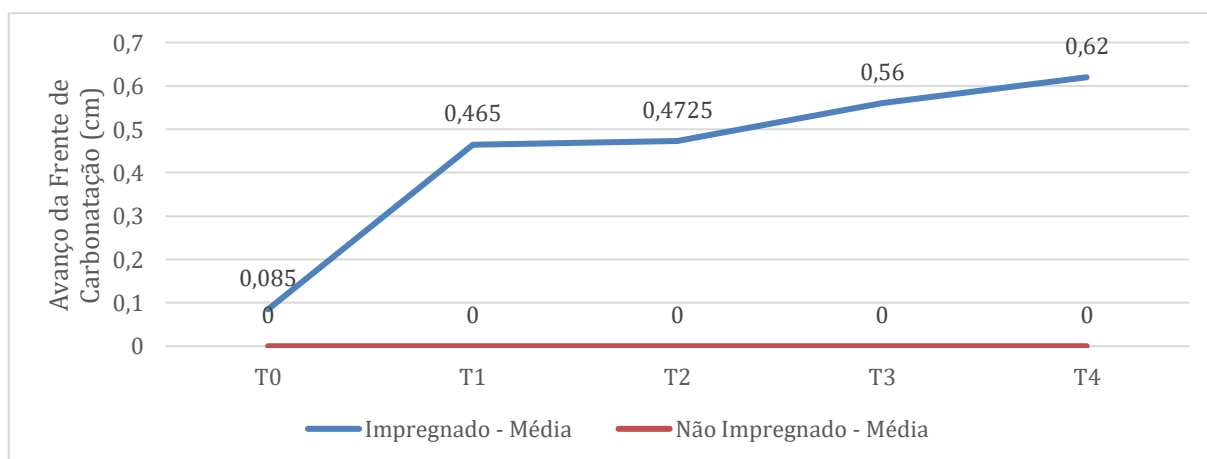
Figura 35 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 no período de T360.



Fonte: autor.

A diferença da frente de carbonatação no concreto de traço 0.45 dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado, ao longo do tempo, é demonstrada no **Gráfico 2**.

Gráfico 2 - Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para o concreto de traço 0.45.



Fonte: autor.

4.2.2 Concreto de traço 0.55

A **Tabela 12** demonstra a frente de carbonatação obtida para os corpos de prova de traço 0.55, impregnados ou não impregnados, conforme o tempo de exposição à fuligem.

Tabela 12 - Frente de carbonatação, em centímetros (cm), no concreto de traço 0.55 conforme o tempo e exposição à fuligem.

		T0	T90	T180	T270	T360
		19/6/22	24/9/22	16/12/22	16/3/23	14/6/23
		T0	90	180	270	360
0,55	Impregnado	0,33	0,65	0,65	0,53	0,8
		0,25	0,63	0,63	0,66	0,74
		0,16	0,28	0,45	0,8	0,63
		0,2	0,45	0,38	0,5	0,6
		0,235	0,5025	0,5275	0,6225	0,6925
	Não Impregnado	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
		0	0	0	0,2	0
		0	0	0	0,05	0

Fonte: autor.

A seguir é demonstrada a comparação entre as áreas de frente de carbonatação para os corpos de prova de traço 0.55 nos diferentes períodos de exposição à fuligem: T0 (**Figura 36**); T90 (**Figura 37**); T180 (**Figura 38**); T270 (**Figura 39**) e T360 (**Figura 40**).

Figura 36 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T0.



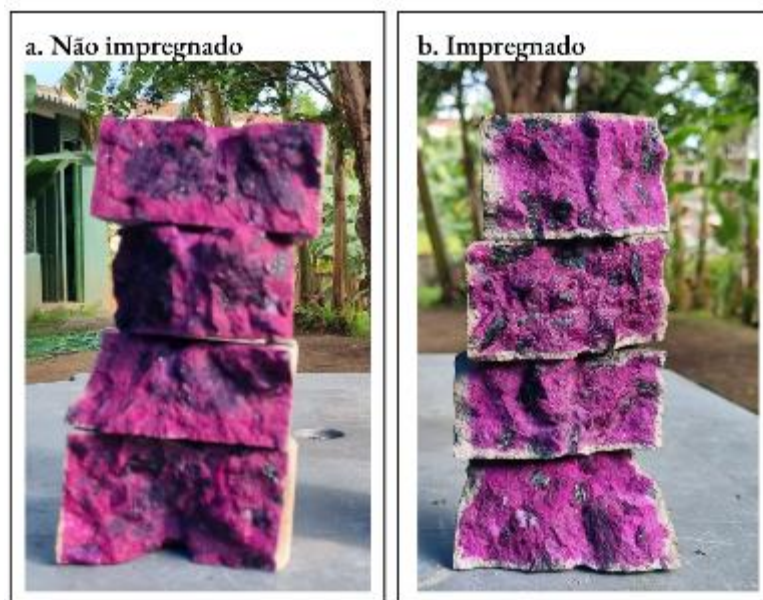
Fonte: autor.

Figura 37 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T90.



Fonte: autor.

Figura 38 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T180.



Fonte: autor.

Figura 39 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T270.



Fonte: autor.

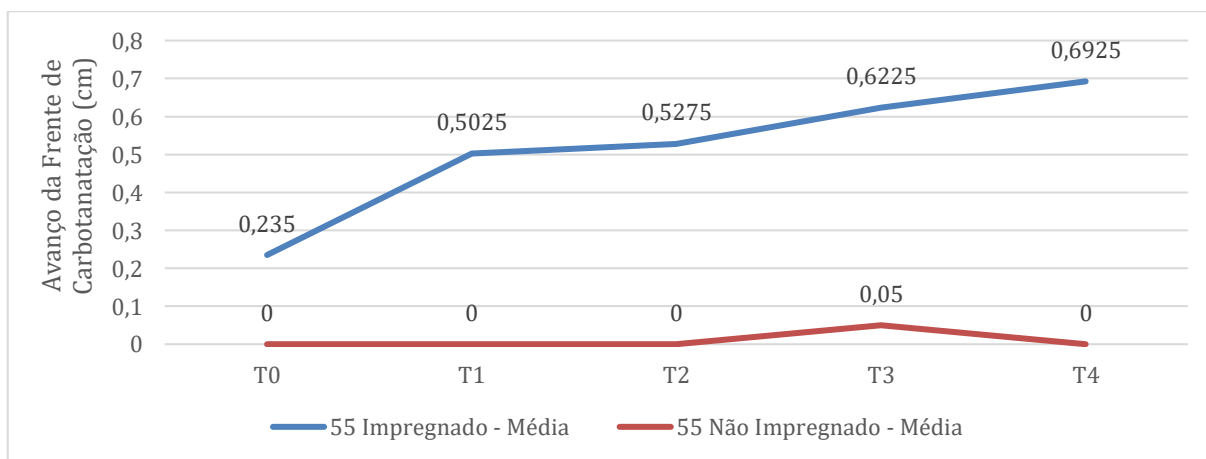
Figura 40 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.55 no período de T360.



Fonte: autor.

A diferença da frente de carbonatação no concreto de traço a/c 0.55 dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado, ao longo do tempo, é demonstrada no **Gráfico 3**.

Gráfico 3 - Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para o concreto de traço 0.55.



Fonte: autor.

4.2.3 Concreto de traço 0.60

A **Tabela 13** demonstra a frente de carbonatação obtidos para os corpos de prova de traço 0.60, impregnados ou não impregnados, conforme o tempo de exposição à fuligem.

Tabela 13 - Frente de carbonatação, em centímetros (cm), no concreto de traço 0.60 conforme o tempo e exposição à fuligem.

		T0	T90	T180	T270	T360
		19/6/22	24/9/22	16/12/22	16/3/23	14/6/23
		T0	90	180	270	360
0,6	Impregnado	0,48	0,5	0,73	0,76	0,9
		0,37	0,49	0,6	0,7	0,88
		0,33	0,48	0,55	0,7	0,75
		0,28	0,36	0,5	0,55	0,57
		0,365	0,4575	0,595	0,6775	0,775
	Não Impregnado	0	0	0,21	0	0,25
		0	0	0,18	0,3	0,23
		0	0	0	0,3	0,22
		0	0	0	0,2	0
		0	0	0,0975	0,22	0,175

Fonte: autor.

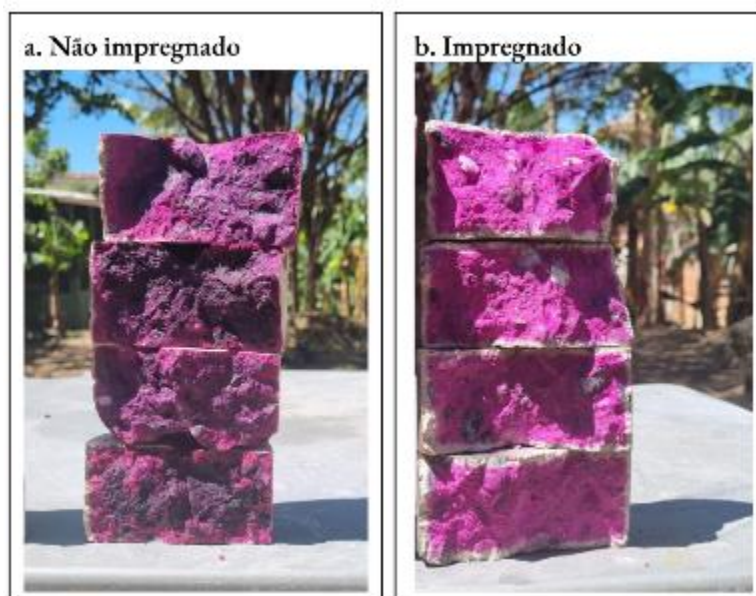
A seguir é demonstrada a comparação entre as áreas de frente de carbonatação para os corpos de prova de traço 0.55 nos diferentes períodos de exposição à fuligem: T0 (**Figura 41**); T90 (**Figura 42**); T180 (**Figura 43**); T270 (**Figura 44**) e T360 (**Figura 45**).

Figura 41 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T0.



Fonte: autor.

Figura 42 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T90.



Fonte: autor.

Figura 43 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T180.



Fonte: autor.

Figura 44 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T270.



Fonte: autor.

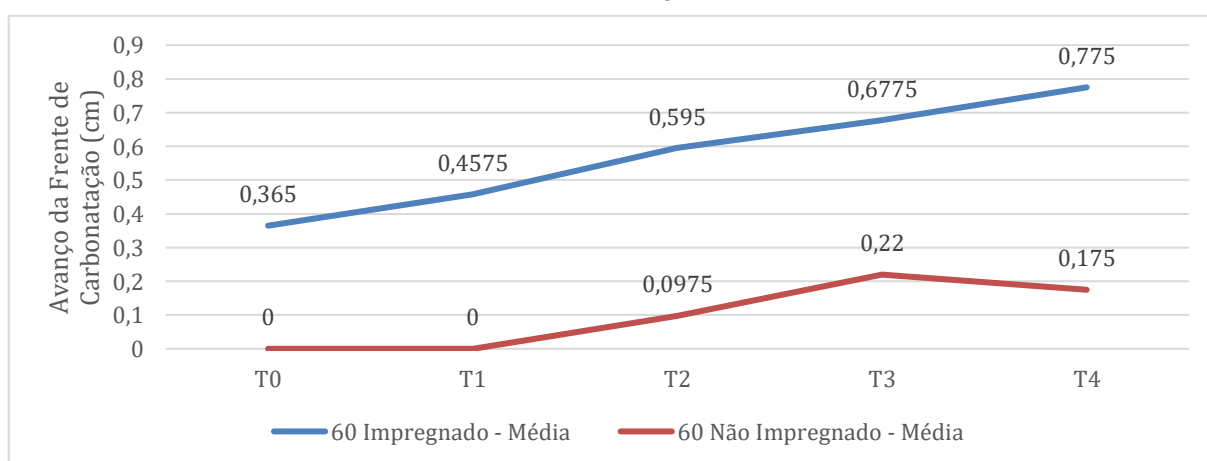
Figura 45 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 no período de T360.



Fonte: autor.

A diferença da frente de carbonatação no concreto de traço 0.60 dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado, ao longo do tempo, é demonstrada no **Gráfico 4**.

Gráfico 4 - Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para o concreto de traço 0.60.



Fonte: autor.

4.2.4 Concreto de traço 0.65

A **Tabela 14** demonstra a frente de carbonatação obtidos para os corpos de prova de traço 0.65, impregnados ou não impregnados, conforme o tempo de exposição à fuligem.

Tabela 14 - Frente de carbonatação, em centímetros (cm), no concreto de traço 0.65 conforme o tempo e exposição à fuligem.

		T0	T90	T180	T270	T360
		19/6/22	24/9/22	16/12/22	16/3/23	14/6/23
		T0	90	180	270	360
0,65	Impregnado	0,6	0,77	0,8	1	0,9
		0,55	0,6	0,6	0,6	0,88
		0,45	0,55	0,62	0,91	0,85
		0,45	0,55	0,55	0,8	0,7
		0,5125	0,6175	0,6425	0,8275	0,8325
	Não Impregnado	0	0	0,21	0,15	0,22
		0	0	0,2	0,2	0,2
		0	0	0	0,14	0,18
		0	0	0	0,3	0
		0	0	0,1025	0,1975	0,15

Fonte: autor.

A seguir é demonstrada a comparação entre as áreas de frente de carbonatação para os corpos de prova de traço 0.65 nos diferentes períodos de exposição à fuligem: T0 (**Figura 46**); T90 (**Figura 47**); T180 (**Figura 48**); T270 (**Figura 49**) e T360 (**Figura 50**).

Figura 46 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T0.



Fonte: autor.

Figura 47 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T90.



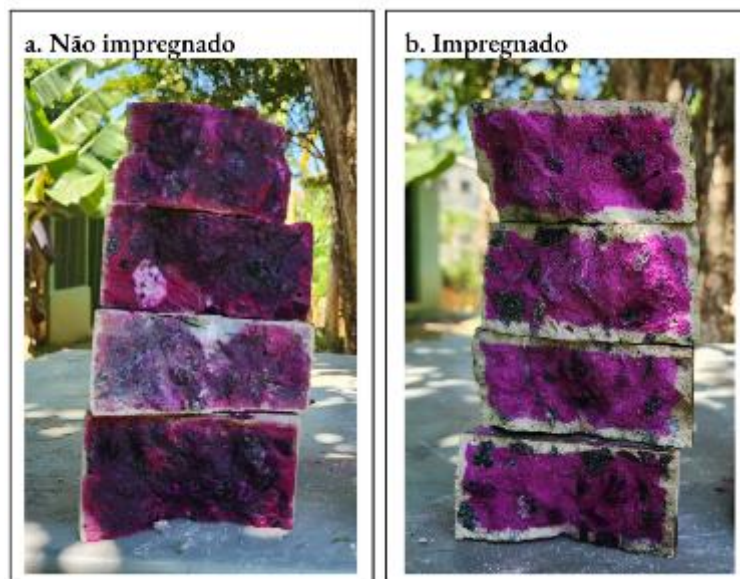
Fonte: autor.

Figura 48 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T180.



Fonte: autor.

Figura 49 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T270.



Fonte: autor.

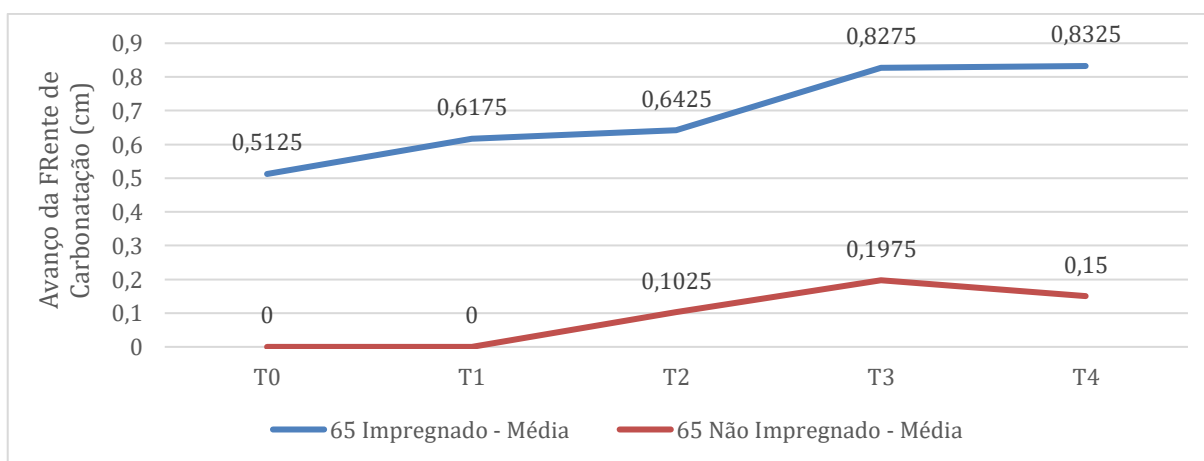
Figura 50 - Área de frente de carbonatação no concreto de traço 0.65 no período de T360.



Fonte: autor.

A diferença nos índices de carbonatação no concreto de traço 0.65 dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado, ao longo do tempo, é demonstrada no **Gráfico 5**.

Gráfico 5 - Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para o concreto de traço 0.65.

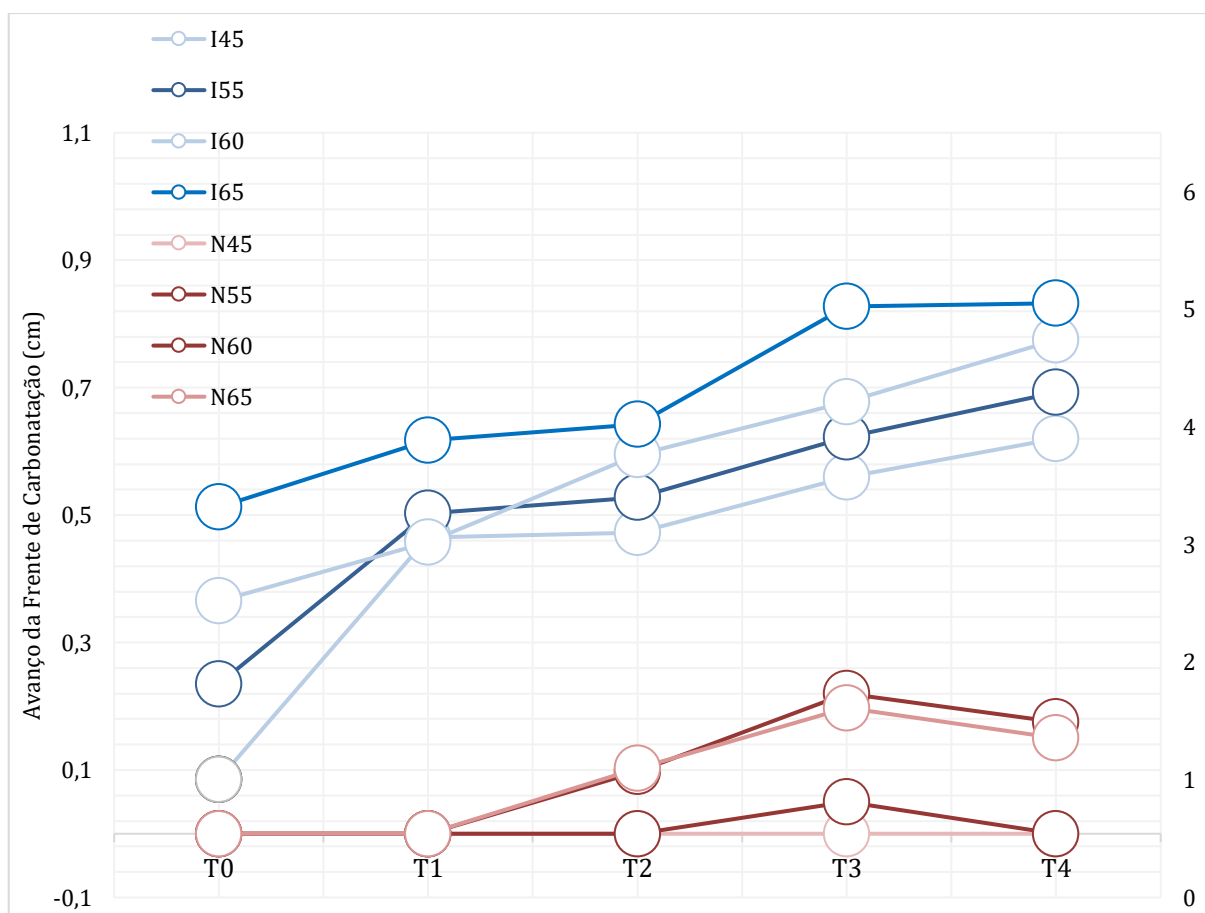


Fonte: autor.

4.2.5 Comparação dos níveis de carbonatação

O **Gráfico 6** demonstra a frente de carbonatação do concreto, em diferentes traços, tanto impregnados (tons de azul) como não impregnados (tons de vermelho). Com base nestes dados, pode-se observar, de forma geral, que o decorrer do tempo (0 a 360 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 (sem exposição a altas temperaturas) - devido a condições comuns do ambiente, como a exposição aos gases presentes na atmosfera, conforme já descrito na literatura anteriormente (COSTA, 2012).

Gráfico 6 - Frente de carbonatação ao longo do tempo dentre os corpos de prova não impregnados e impregnado para todos os traços de concreto.



Fonte: autor.

Apresenta-se também, os resultados compilados em formato de tabela (**Tabela 15**), para melhor entendimento:

Tabela 15 - 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.

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

Fonte: autor.

Na **Tabela 15** 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 (VALÉRIO; ARANA; BERGAMASCHI, 2017) a respeito da influência da exposição à fuligem, mesmo sem contato com o fogo, no avanço da frente de carbonatação.

Com base na equação comentada 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:

$$X_c = K\sqrt{t}$$

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 16 - Comparação sobre o avanço da carbonatação no concreto impregnado e não impregnado em doze meses.

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

Fonte: autor.

Dessa forma é possível avaliar que concretos impregnados por fuligem que não passaram por processo de limpeza, tem índice de difusividade efetiva de carbonatação até 6,93 vezes mais rápida do que concretos que não foram impregnados e submetidos a ambientes apresentando concentração de fuligem.

Concretos com maior concentração de cimento (como relação água/cimento 0,45 e 0,55) apresentaram penetração inicial da frente de carbonatação, no momento T0 (dia da impregnação de fuligem) inferior a concretos com menor teor de cimento (como relação água/cimento 0,60 e 0,65), comparando peças impregnadas e não impregnadas.

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi investigada a influência da fuligem residual de incêndios no processo de carbonatação do concreto armado.

6.1 Considerações finais

- A partir do experimento realizado neste estudo, fica evidente que a ação combinada de baixas 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 de baixa temperatura 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 ação combinada de baixas temperaturas (abaixo de 200°C) com a impregnação de fuligem por longos períodos (no caso deste estudo, 12 meses), resulta no avanço da frente de carbonatação em concretos impregnados por fuligem em até 6,93 vezes mais profunda, em relação a concretos que não foram impregnados por fuligem e não passaram por temperaturas de até 200°C.
- Para concretos que não sofreram altas temperaturas (até 200°C) e foram impregnados por fuligem, é possível entender que a limpeza imediata e a avaliação da camada superficial quanto à carbonatação para que não haja

comprometimento da vida útil da estrutura são procedimentos de suma importância.

Cabe ressaltar, a respeito das considerações citadas na página anterior, que houve limitações ao estudo e que podem ressaltar as conclusões por hora apresentadas, sendo estas:

- Há ausência de padronização procedimentos realizados, desde a seleção dos materiais empregados, até mesmo para os procedimentos de queima e medição da carbonatação. Este trabalho utilizou de metodologias e admissões empíricas para realizar a comparação entre um concreto exposto a temperaturas inferiores a 200°C e que sofreu por impregnação de fuligem.
- Não foi feita a avaliação da concentração de CO₂ no interior dos invólucros, o que impossibilita pormenorizarmos as conclusões quanto às condições dos cenários impregnado ou não por fuligem;
- Não foram feitos ensaios no que diz respeito à efeitos da temperatura (limitada a 200°C) principalmente que estejam relacionados à perda de água nos corpos de prova que foram submetidos ao processo de impregnação de fuligem e temperaturas limitadas há 200°C.

A perda de água provocada no concreto armado em situações de incêndio, mesmo em baixas temperaturas (abaixo dos 200°C) nas camadas superficiais das peças, pode dar início à desestruturação química da pasta de cimento e decomposição da etringita, além de elementos físicos como microfissuração das camadas externas do corpo de prova, e dilatação dos poros.

O efeito desta baixa temperatura não fez parte do presente trabalho, porém pode exercer influência na frente de carbonatação do concreto, principalmente nas idades iniciais (T0 – imediatamente após a queima dos combustíveis e impregnação de fuligem – e T1);

- Complementarmente ao tópico anterior, em que pese tenha sido limitada a temperatura a 200°C, não foram feitas análises a respeito de possíveis desidratações de hidróxido de cálcio (que é grande responsável por garantir o pH do concreto elevado – entre 12,5 e 13).

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de estimular e orientar trabalhos futuros que ampliem os conhecimentos relacionados ao processo de carbonatação em contextos de pós incêndio, sugere-se os pontos a seguir.

- Realização de ensaio prático similar, com mesmo intervalo de tempo de exposição do concreto à fuligem, alterando a quantidade e a composição de materiais combustíveis. Deste modo, pode-se verificar se a variação da concentração do CO₂ pode trazer resultados diferentes do que encontrado neste trabalho, analisando assim, a influência deste fator no processo de carbonatação.
- Realização de procedimento experimental similar, porém com a utilização de corpos de prova de mesma característica, em que metade da amostra estaria protegida por uma camada de pintura (acrílica, verniz ou similar) e a outra na condição normal, para verificar se uma barreira protetora pode impedir ou amenizar o avanço da carbonatação.
- Realização de procedimento experimental similar, porém com a adição de uma etapa de limpeza para a remoção da fuligem, logo após a exposição do corpo de prova de concreto à queima. Assim, durante o mesmo período de análise deste estudo, pode-se verificar se o processo de limpeza tem influência sobre o avanço da carbonatação com o tempo, com a hipótese de uma amenização deste processo devido à limpeza.

- Elaboração de procedimentos e normalizações para experimentos semelhantes, como por exemplo para estudos em que se queiram realizar impregnações de fluidos em corpos de prova de concreto.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. J. O. **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., 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721:** Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13860:** Glossário de Termos Relacionados à Segurança Contra Incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 14432:** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14931:** Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15575:** Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739:** Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7222:** Concreto e Argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ALMEIDA, D. M. **Análise de variáveis que influenciam na carbonatação natural de amostras de laboratório e de estruturas de concreto.** Dissertação (Mestre em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, 146 f., 2019.

ARAÚJO, A. **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. 2013.

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

BRASIL. **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. 2017.

BRITEZ, C. A. **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., 2011.

CARMONA, T.C. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 103 f., 2005.

CARTAXO, A. E. et al. Carbonatação do concreto: Fatores que influenciam este fenômeno. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 101056-101064, 2020.

COSTA, V. C. M. **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., 2012.

CUNHA, A.C.Q.; HELENE, P.R.L. **Despassivação das Armaduras de Concreto por Ação da Carbonatação**. Boletim Técnico - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

FERNANDES et al. Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, vol.10, n.4 , p. 838 – 863, 2017.

FIALHO, R. F.; SEIBT, B. H.; CARRIJO, S. A.. 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**. 2019.

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

FONSECA, L. A. C.; CORRÊA, M. R.; SILVA, R. M. **Projeto de edifícios em concreto armado**. Volume 1. Oficina de Textos, 2013.

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

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

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

JÚNIOR, J. E. F. et al. Avaliação de estrutura de concreto armado após situação de incêndio: estudo de caso em Brasília. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 23870-23888, 2019.

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

LIMA, J. J.; SANTOS, I. T. A.. **Elementos de concreto armado: projeto estrutural**. São Paulo, Oficina de Textos, 2013.

MARCELLI, L. **Relatório “L4257C-15”**. Critério Engenharia. 2016.

MORAIS, João Marcos Pereira de et al. Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e759974964-e759974964, 2020.

OLIVEIRA, J. A. **Análise experimental dos efeitos da carbonatação e migração de íons cloretos em concretos pós incêndio**. Dissertação (Magister Scientiae) - Universidade Federal de Viçosa. 61 f. 2019.

OLIVEIRA, M. **Estudo sobre incêndios de progresso rápido**. Monografia (Especialista em Planejamento e Gestão em Defesa Civil) - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, Universidade Federal de Santa Catarina. 88 f. 2005.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente construído: revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Porto Alegre. vol. 7, n. 4 (Out./Dez. 2007), p. 7-20, 2007.

MAXIMIANO, D. P. **Análise numérica avançada de estruturas de aço e de concreto armado em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 218 f., 2018.

RIBEIRO et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. Elsevier, 2014.

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

SEITO A. I. et al. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SILVA, H. C.; MELO, F. P. **Carbonatação do concreto: Análise comparativa da profundidade de carbonatação em concretos com agregados convencionais e reciclados**. Centro Universitário do Sul de Minas, 2020.

SOARES, A. P. F.; VASCONCELOS, L. T.; NASCIMENTO, F. B. C. **Corrosão em armaduras de concreto**. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 3, n. 1, p. 177-188, 2015.

SOUZA, M. A. G. **Inspeção, Regulação e Engenharia de Incêndio**. Glossário de Termos. Fundação Escola Nacional de Seguros. 2002.

VALÉRIO, A. C.; ARANA, E. F.; BERGAMASCHI, R. **Verificação da diferença de velocidade da profundidade da frente de carbonatação do concreto submetido a fumaça residual de fogo**. Trabalho de Conclusão do Curso (Pós-Graduação - Patologia nas Obras Cíveis) - IDD Educação Avançada. São Paulo, 60 f., 2017.