



**VERIFICAÇÃO DA DIFERENÇA DE VELOCIDADE DA
PROFUNDIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO
SUBMETIDO A FUMAÇA RESIDUAL DE FOGO**

SÃO PAULO

2017



ALLAN CARNEIRO VALÉRIO
EDUARDO DE FREITAS ARANA
RICARDO BERGAMASCHI

**VERIFICAÇÃO DA DIFERENÇA DE VELOCIDADE DA
PROFUNDIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO
SUBMETIDO A FUMAÇA RESIDUAL DE FOGO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Pós
Graduação em Patologia nas Obras Civas para
obtenção do grau de especialista.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

SÃO PAULO

2017

AGRADECIMENTOS

Agradecemos inicialmente ao Professor Luis César Siqueira De Luca, pelas orientações fornecidas, bem como paciência e atenção durante todo o processo de concepção deste trabalho.

Ao Eng^o Dr. Carlos Britez, pelo conhecimento, tempo e dedicação dispendida para que pudéssemos tornar nossas abstratas ideias em material de pesquisa concreto.

Aos professores André Tadeu Figueiró e Ricardo Faria, que com muita atenção, dedicação, discernimento e senso crítico analisaram todo o conteúdo deste trabalho desde a fase embrionária.

Aos familiares dos presentes signatários, que tiveram paciência e compreensão nos momentos ausentes.

À Deus que, pela crença dos signatários, todas as condições e oportunidade para que pudéssemos efetuar este trabalho.

RESUMO

Após a ocorrência de um incêndio, diversos danos prediais devido à temperatura são constatados, como trincas e fissurações na estrutura de concreto armado, deformações de estruturas metálicas, deslocamento de alvenarias, sujidade e impregnação de fuligem em revestimentos, entre outros. Usualmente, grande parte destas avarias são corrigidas: feitos reforços nas estruturas de concreto, substituídas as alvenarias e revestimentos, e assim por diante, conforme a necessidade e viabilidade. Ocorre que em estruturas de concreto onde não são constatados danos visuais de deslocamento e fissuração, seja feito apenas uma limpeza superficial dos elementos, como pilares e vigas, para remoção de sujidade e fuligem. Contudo muitas vezes não se é levado em consideração se existem danos invisíveis à estrutura, em sua microscopia, que apesar de não haver uma avaria imediata, possa acarretar em uma perda de vida útil da edificação. Afinal numa situação de incêndio a parte da estrutura, que não teve contato direto com as chamas e calor, sofre grande impregnação de fuligem proveniente da fumaça, que possui diversos elementos químicos em sua composição, e até que o processo de limpeza seja efetuado nos elementos estruturais, existe um hiato de tempo, para que seja levantada a verba (muitas vezes com seguros), sejam feitos projetos e planejamentos, que pode levar diversos meses. Este trabalho teve por intuito verificar a influência da fumaça residual de fogo na velocidade de avanço da frente de carbonatação, haja vista que a fumaça usualmente é composta por carbono. Para tal foram dispostos corpos de prova à intensa impregnação de fumaça, e foram armazenados ao longo de 7 meses para que fosse possível comparar com corpos de prova do mesmo lote, não submetidos à fuligem. Ao longo destes 7 meses foram realizadas 4 aferições comparativas da frente de carbonatação do concreto impregnado por fuligem, e do não impregnado por fuligem, através da asperção de fnoftaleína, e medição da área carbonatada através de paquímetro.

Palavras chave: concreto, fuligem, frente de carbonatação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
1.1. PROBLEMA DA PESQUISA.....	8
1.2. OBJETIVOS	8
1.2.1. OBJETIVO GERAL	8
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.3. HIPÓTESE.....	9
1.4. JUSTIFICATIVAS	9
1.4.1. TECNOLÓGICAS	9
1.4.2. ECONOMICAS	9
1.4.3. SOCIAIS	10
1.4.4. ECOLÓGICAS.....	10
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	10
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1. INCÊNDIO:.....	12
2.1.1. FASES DO INCÊNDIO:.....	13
2.1.2. FUMAÇA PROVENIENTE DE INCÊNDIO:	14
2.2. ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO:	16
2.2.1. DESPASSIVAÇÃO DA ARMADURA POR CARBONATAÇÃO:... 17	
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	23
3.1.1. CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO:	23
3.1.2. MATERIAIS COMBUSTÍVEIS:	24
3.1.3. INVÓLUCRO	26

3.2. PROCEDIMENTOS EFETUADOS	27
3.2.1. QUEIMA DO MATERIAL:	27
3.2.2. AFERIÇÃO DAS FRENTES DE CARBONATAÇÃO:.....	30
3.2.3. IDADE DOS ROMPIMENTOS DOS CORPOS DE PROVA:.....	33
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	34
4.1. AFERIÇÃO T0.....	34
4.1. AFERIÇÃO T30	36
4.2. AFERIÇÃO T90	40
4.3. AFERIÇÃO T180	45
4.4. RESUMO DOS DADOS OBTIDOS.....	50
4.5. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS.....	51
4.6– OBSERVAÇÕES EFETUADAS	52
4.7– ANÁLISE DOS DADOS	53
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	55
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

O foco principal deste trabalho é verificar se a estrutura de concreto armado de uma edificação submetida à incêndio e que não tenha sido danificada pela temperatura, não apresentará intensificação da frente de carbonatação, durante o período que tenha ficado impregnada por fuligem residual, durante a etapa de levantamento de verba e planejamento dos reparos, que pode perdurar por meses.

O Instituto Sprinkler Brasil, aponta que em 2014 foram contabilizados 1.275 ocorrências de incêndios em edificações pelo território nacional, com uma média de 106 sinistros deste porte por mês, já em 2015, foram contabilizadas 1349 ocorrências de incêndio, uma média de 112 incêndios por mês. O dióxido de carbono (CO₂) é o gás proveniente deste evento, bem como o principal agente causador do início do processo de carbonatação.

Um evento de incêndio que geram transtornos como danos à integridade física dos usuários, eventuais perdas de lucratividade, impossibilidade de habitabilidade, fazem com que muitos proprietários destes imóveis, não possuam viabilidade financeira para que seus imóveis sejam submetidos à reparos de forma emergencial e em um curto espaço de tempo.

Diante deste cenário, verifica-se em muitos casos para que recursos financeiros sejam conseguidos através de seguradoras, financiadoras, entre outros, o imóvel permanece em condição “sinistrada”, impregnado por fuligem, muitas vezes com janelas e portas lacradas, visando evitar atos de vandalismo, e com entulhos e detritos provenientes do incêndio deixadas de maneira intacta, até que a recuperação seja viabilizada e efetuada.

Com isto, gera-se um ambiente com grande intensidade de resíduos, incluindo fuligem (material resultante da fumaça), que assola as estruturas das edificações por semanas, meses e anos, em alguns casos, até que remoções de entulho e limpezas sejam efetuadas. Como por exemplo no caso do Museu da Língua Portuguesa em São Paulo, que foi assolado por incêndio em dezembro de

2015, e iniciou os serviços emergenciais apenas após dois meses e meio (WEBSITE EBC, 10/03/2016 17h27).

Está apresentada a seguir nas figuras 1 e 2 a situação pós incêndio do Museu da Língua Portuguesa.



Figura 1 – Vista aérea do Museu da Língua Portuguesa após incêndio (fonte: relatório “L4257C-15 – FINAL – REV.00” elaborado pela empresa Critério Engenharia, Marcelli, L., 2016)



Figura 2 – Estrutura do museu da língua portuguesa não danificada pela ação da temperatura, contudo completamente impregnada por fuligem (fonte: relatório “L4257C-15 – FINAL – REV.00” elaborado pela empresa Critério Engenharia, Marcelli, L., 2016)

Nesse sentido, entende-se importante analisar a diferença da velocidade da profundidade da frente de carbonatação, do concreto submetido a fumaça residual de fogo e outro não submetido a esta fumaça.

Será apresentado a seguir a pergunta que será respondida, no item “Problema da Pesquisa”.

1.1. PROBLEMA DA PESQUISA

Existe diferença da velocidade da profundidade da frente de carbonatação, do concreto submetido a fumaça residual de fogo e outro não submetido a esta fumaça?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Verificar a influência da fumaça residual de fogo na velocidade de avanço da frente de carbonatação.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o quanto a carbonatação, intensificada por um evento de impregnação de fumaça, agrava o risco do início do processo de corrosão da armadura, quando comparado a uma situação normal (concreto exposto ao meio ambiente padrão).

1.3. HIPÓTESE

Presume-se que sim, pois, a fumaça interfere na velocidade da frente de carbonatação do concreto.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Neste item serão abordadas as justificativas que incentivaram este trabalho:

1.4.1. TECNOLÓGICAS

Segundo Salomão (2008) o fenômeno de carbonatação não é prejudicial ao concreto, mas sim o efeito que esse pode proporcionar ao concreto armado, já que o mesmo em presença de umidade e oxigênio dá-se início à corrosão. Quando o avanço da carbonatação supera o cobrimento de uma peça de concreto, pode iniciar a corrosão devido à despassivação da armadura, expondo este elemento ao início do processo de degradação.

1.4.2. ECONOMICAS

Alguns estudos indicam que, se os recursos utilizados na recuperação estrutural fossem gastos em medidas preventivas, haveria uma redução exponencial desses valores ao longo do ciclo de vida da estrutura (F. G. X. Oliveira, V. J. B. F. Filgueiras, G. R. Meira, 2002)

Os custos de manutenção das estruturas são bastante significativos, podendo chegar a ultrapassar o patamar de 40% em relação ao custo de execução de uma obra (G. R. Meira, 2002).

1.4.3. SOCIAIS

A carbonatação tem sido um tema bastante pesquisado na área de durabilidade e vida útil das estruturas (ISAIA, VAGHETTI e GASTALDINI, 1998).

É de conhecimento que a corrosão constitui uma das principais causas que afetam a durabilidade e estabilidade de uma estrutura, representa 20% da incidência de manifestação patológica em estruturas de concreto aparente, conforme HELENE (1992).

1.4.4. ECOLÓGICAS

Estrutura de concreto expostas à incêndio que não foram devidamente avaliadas e tratadas tem a sua vida útil diretamente reduzida, com isso a possibilidade do aumento de peças de concreto a serem demolidas.

Escombros resultantes da demolição de concreto dificilmente são reutilizados para fins de reciclagem, contribuindo para o aumento de resíduos provenientes da construção civil.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atingir os resultados esperados, este trabalho foi constituído por três etapas distintas:

Primeiramente fora efetuada uma fundamentação teórica sobre os assuntos abordados, através de livros, relatórios, dissertações, teses, artigos e monografias, com finalidade de encontrar embasamento teórico para realização da pesquisa e ensaios.

Posteriormente, fora efetuada a elaboração de experimento científico, onde corpos de prova foram submetidos à intensa impregnação de fuligem, e ao longo de 7 meses, fora efetuada a medição da frente de carbonatação de maneira análoga com corpos de prova não submetidos à fumaça, através de fenolftaleína.

Por fim, a última etapa consistiu na análise dos dados obtidos, interpretação dos mesmos e concepção de gráficos ilustrativos dos mesmos visando direcionar o entendimento do leitor à considerações finais obtidas.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto por 5 capítulos, que serão resumidos à seguir:

No **capítulo 1** fora feita a introdução do trabalho, o problema de pesquisa que nos motivou a efetuar os estudos, os objetivos, hipóteses e justificativas para o estudo, bem como dos procedimentos metodológicos que foram efetuados.

No **capítulo 2** serão expostas as fundamentações teóricas com informações sobre incêndio, a fumaça e fuligem geradas no incêndio, sobre a estrutura de concreto armado e por fim sobre a despassivação da armadura pela frente de carbonatação.

No **capítulo 3** encontra-se o programa experimental detalhado, mostrando os materiais utilizados, bem como os procedimentos efetuados.

No **capítulo 4** serão apresentados os resultados obtidos nos procedimentos experimentais efetuados, compilados e analisados.

No **capítulo 5** serão abordadas as considerações finais e sugestões para eventuais trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas considerações a respeito de impregnação de fuligem proveniente de incêndio em estruturas de concreto armado.

Para tais considerações, se faz necessário apresentar os conceitos e fundamentações teóricas apresentados a seguir:

2.1. INCÊNDIO:

Segundo definição da NBR 13860-1997 (Glossário de Termos Relacionados à Segurança Contra Incêndio), fogo é o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz.

Os processos de combustão, embora muito complexos, eram representados por um triângulo, em que cada um dos seus lados representava um dos três fatores essenciais para a deflagração de um fogo: combustível, comburente e calor, conforme ilustrado na figura 3. (APOSTILA PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIO E PRIMEIROS SOCORROS, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – RS, 2015)



Figura 3 – Tríade do incêndio (Fonte: Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, Manual Básico de Bombeiro Militar, Volume III, 2014, p. 407.)

Esta representação foi aceita durante muito tempo, não obstante fenômenos anômalos não podiam ser completamente explicados com base neste triângulo.

Para poder explicar tais fenômenos, foi necessário incluir um quarto fator: a existência de reações em cadeia. Por essa razão, foi proposta uma nova representação em forma de tetraedro que compreende as condições necessárias para que se dê origem ao fogo, conforme ilustrado na figura 4. (APOSTILA PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIO E PRIMEIROS SOCORROS, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – RS, 2015).



Figura 4 - . Tetraedro do Fogo (Fonte: Escola Nacional de Bombeiros, Fenomenologia da combustão e extintores, Volume VII, 2006, p.15.)

Com o processo de combustão, gerando fogo, aliado ao processo de reação de cadeia, pode-se dar origem a um incêndio, que segundo definição da NBR 13860-1997 (Glossário de Termos Relacionados à Segurança Contra Incêndio), “O incêndio é o fogo fora de controle”.

2.1.1. FASES DO INCÊNDIO:

O incêndio inicia-se, na sua maioria, bem pequeno. O crescimento dependerá: do primeiro item ignizado, das características do comportamento ao fogo dos materiais na proximidade do item ignizado e sua distribuição no ambiente. (A SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS NO BRASIL, Seito, Alexandre Itiu, 2008)

O gráfico 1 ilustra a evolução do incêndio celulósico na edificação.

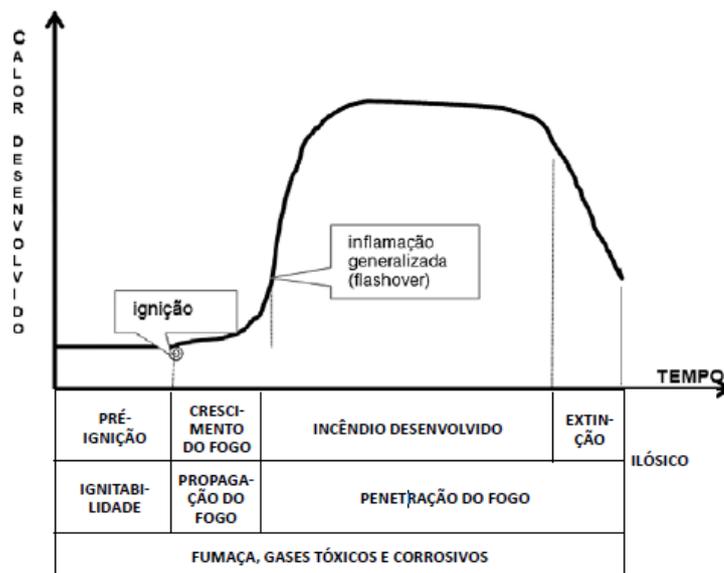


Gráfico 1 - Curva de Evolução do incêndio celulósico
(Fonte: A Segurança Contra Incêndios no Brasil, Seito, A. Itiu, 2008, p.44.)

Segundo Seito (2008), o produto do incêndio por fim, são: o calor, a fumaça e a chama.

Neste estudo será dada ênfase ao produto gerado no incêndio, fumaça, uma vez que será às consequências deste elemento em contato com o concreto armado, quanto à frente de carbonatação, a qual têm como o objetivo deste trabalho.

2.1.2. FUMAÇA PROVENIENTE DE INCÊNDIO:

A fumaça é constituída por pequenas partículas sólidas, parcialmente queimadas, e por vapor condensado em suspensão no ar, e gases de combustão.

A cor da fumaça é influenciada pelo tipo de combustível. A fumaça branca ocorre na fase inicial devido à umidade dos materiais. A madeira provoca um tom marrom, já os plásticos e superfícies pintadas emitem uma fumaça cinza, e os hidrocarbonetos uma fumaça preta. (APOSTILA PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIO E PRIMEIROS SOCORROS, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – RS, 2015).

A composição química da fumaça é altamente complexa e variável. Chega a ter duas centenas de substâncias e a porcentagem dessas substâncias varia com o estágio do incêndio.

A formação dessas substâncias é influenciada por: composição química do(s) material(ais) em combustão, oxigenação e nível de energia (calor) no processo. (A SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS NO BRASIL, Seito, Alexandre Itiu, 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 (NO_x), gás sulfídrico (H₂S) e gás oxigênio (O₂).

Dos gases que serão de interesse deste estudo, tem-se:

- CO (monóxido de carbono): é encontrado em todos os incêndios e é resultado da combustão incompleta dos materiais combustíveis a base de carbono, como a madeira, tecidos, plásticos, líquidos inflamáveis, gases combustíveis, etc. (Seito, 2008).
- CO₂ (gás carbônico): é encontrado também em todos os incêndios e é resultado da combustão completa dos materiais combustíveis a base de carbono (Seito, 2008).
- O₂: consumido combustão dos materiais diminui a concentração desse gás no ambiente e é um dos fatores de risco à vida das pessoas. (Seito, 2008).

Presente na atmosfera, também após o incêndio, este reage com CO (monóxido de carbono), gerando 2 CO₂ (gás carbônico) (D. R. Rainer, M. Koranne, S. M. Vesecky,§ and D. W. Goodman, Department of Chemistry, Texas A&M University, 1997).

O 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, são denominados como fuligem (INSPEÇÃO, REGULAÇÃO E ENGENHARIA DE INCÊNDIO, Souza, Marco Aurélio Gonçalves, 2002, FUNENSEG).

2.2. ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO:

O concreto é um material que apresenta alta resistência às tensões de compressão, porém, apresenta baixa resistência à tração (cerca de 10 % da sua resistência à compressão). Assim sendo, é imperiosa a necessidade de juntar ao concreto um material com alta resistência à tração, com o objetivo deste material, disposto convenientemente, resistir às tensões de tração atuantes.

Com esse material composto (concreto e armadura – barras de aço), surge então o chamado “concreto armado”, onde as barras da armadura absorvem as tensões de tração e o concreto absorve as tensões de compressão, no que pode ser auxiliado também por barras de aço (FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO, Dr. Bastos, Paulo Sérgio dos Santos).

Os principais mecanismos de deterioração da armadura descritos pela norma são: despassivação por carbonatação, ou seja, por ação do gás carbônico da atmosfera; e despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto). (FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO, Dr. Bastos, Paulo Sérgio dos Santos).

2.2.1. DESPASSIVAÇÃO DA ARMADURA POR CARBONATAÇÃO:

A carbonatação é um fenômeno que ocorre devido as reações químicas entre o gás carbônico presente na atmosfera, que penetra nos poros do concreto, e o hidróxido de cálcio e outros constituintes provenientes da hidratação do cimento (CUNHA e HELENE, 2001).

Ainda segundo Cunha e Helene, a carbonatação inicia-se na superfície da peça e avança progressivamente para o interior do concreto, ocasionando a diminuição da alta alcalinidade do concreto, de pH próximo a 13, para valores próximos a 8.

Sob a análise de GOMES (2007) o fenômeno de a carbonatação pode ser natural, pois, o concreto fica exposto a agressão do Dióxido de Carbono presente no meio, transformando o hidróxido de Cálcio presente, em Carbonato de Cálcio mais água, gerando a diminuição da alcalinidade da peça e a redução de volume (retração por carbonatação).

Em condições naturais de exposição (0,03% a 1% de CO₂), o processo de carbonatação pode requerer vários anos para apresentar profundidades importantes que comprometam a durabilidade das armaduras, sendo função, dentre outros aspectos, da relação água/aglomerante e da composição química do cimento. Para relações água/aglomerante mais elevadas (acima de 0,60), com cerca de um ano de exposição ao CO₂, já é possível obter dados de profundidade carbonatada. Contudo, para concretos com relações água/aglomerante menores (inferiores a 0,50), o tempo demandado para determinar a velocidade de carbonatação pode levar até 20 anos (KOBUKU e NAGATAKI, 1989).

A alta alcalinidade do concreto origina a formação de um filme passivante de óxidos, resistente e aderente à superfície das barras de armadura existentes no interior das peças de concreto armado, que protege a armadura contra a corrosão, conforme mostrado na figura 6.

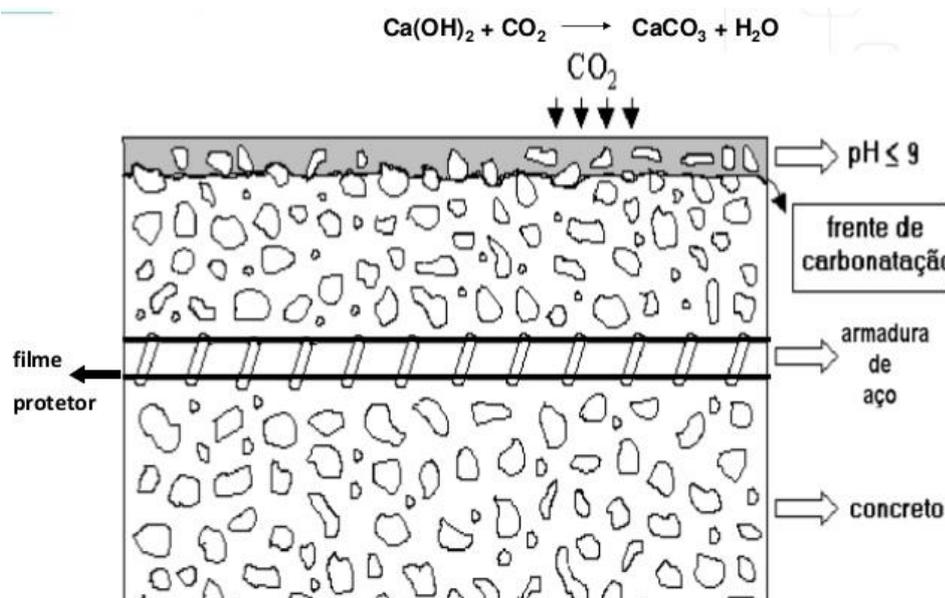


Figura 6 – Esquemático de penetração de frente de carbonatação
 (Fonte: Estudo de Corrosão em Estruturas de Concreto, Araújo, A., 2013, IPT-RJ)

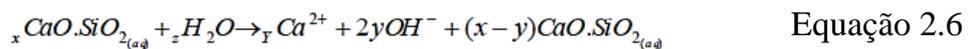
A frente de carbonatação, ao atingir a armadura, destrói o filme protetor, possibilitando o início da corrosão da armadura, que ocorre com expansão de volume e leva ao surgimento de fissuras, descolamento do concreto de cobertura aderente à armadura, e principalmente a redução da área de armadura. A corrosão obriga à necessidade de reparos nas peças, com sérios prejuízos financeiros aos proprietários.

A espessura do cobrimento de concreto é o principal fator para a proteção das armaduras, ao se interpor entre o meio corrosivo e agressivo e a armadura, evitando que a frente de carbonatação alcance as armaduras.

As reações que são formadas no fenômeno da carbonatação são descritas a seguir. O fenômeno da carbonatação envolve diversos processos físico-químicos, que são descritos a seguir e demonstrado pelas Equações 2.0 a 2.6 (PAPADAKIS et al., 1991 a; PAPADAKIS, 1999 a).

A Equação 2.0 apresenta a reação de dissolução do CO₂ na água dos poros, onde ocorre a formação e ionização do ácido carbônico, que libera o íon carbonato na segunda etapa. Ressalta-se que o íon bicarbonato é liberado na primeira etapa, mas não é considerado no processo de carbonatação.

A Equação 2.1 mostra a dissolução do $Ca(OH)_2$, a formação do carbonato de cálcio é mostrada na Equação 2.2 e, o processo de descalcificação do C-S-H é demonstrado pelas Equações 2.0 a 2.6 (BARBOSA et al., 2005).



A velocidade e a profundidade de carbonatação dependem de fatores relacionados com o meio ambiente e com as características finais do concreto endurecido (KAZMIERCZAK, 1995). A diminuição da relação água/cimento dificulta a difusão do CO_2 no concreto, como consequência da alteração na dimensão dos poros e capilares. Para condições ambientais e de cura constantes, a qualidade da pasta, que é função da relação água/cimento e, a quantidade de $Ca(OH)_2$ na solução intersticial, que é função do tipo de cimento, são parâmetros que controlam a carbonatação (HELENE, 1993).

Segundo Sanjuán (1992), os concretos produzidos com qualquer tipo de cimento, que tenha uma baixa relação água/cimento com períodos de cura prolongados, adquirem boa resistência a carbonatação.

Para Neville (1997), a carbonatação do concreto é um fenômeno natural decorrente da existência de gás carbônico (CO_2) na atmosfera, em concentrações que variam da ordem de 0,03%, em ambientes rurais, a 0,30% ou mais, em grandes cidades e em lugares fechados e pouco ventilados, como

garagens de edifícios. Devido aos maiores teores de CO₂ no ambiente, a carbonatação do concreto assume maior importância nos centros urbanos e regiões industrializadas.

Ho e Lewis (1987) comentam que uma cura ruim e uma má compactação produzem uma elevada porosidade na superfície externa do concreto, influenciando na velocidade de carbonatação.

Tuutti (1982) cita que em ambientes mais úmidos, nos poros totalmente cheios de água, a velocidade de difusão do CO₂ é bem menor e, nos poros secos, o CO₂ se difunde, mas não reage por ausência da água. Uma situação intermediária promove uma maior velocidade de carbonatação.

Considerando oscilações de temperatura entre 20 e 45°C, Papadakis et al. (1991) não encontram aumento na velocidade de carbonatação. Porém, Sanjuán (1992) considera que o incremento da temperatura favorece a penetração do CO₂ no concreto, como em qualquer processo de difusão, justificado pela Lei de Arrhenius, criador da teoria de dissociação iônica, em que o incremento de temperatura provoca o incremento da velocidade das reações químicas segundo uma lei exponencial.

O processo de carbonatação pode requerer vários anos para apresentar dados passíveis de análise, sendo dependente da relação água/cimento, da composição química do cimento, das condições naturais de exposição e do teor de CO₂ (KOBUKU e NAGATAKI, 1989).

Kobuku e Nagataki (1989) afirmam que para concretos com relação água/cimento menores que 0,5, a velocidade para carbonatar uma peça estrutural pode chegar até 20 anos e, para relações água cimento acima de 0,60, com aproximadamente um ano de exposição ao CO₂, pode-se obter medidas de carbonatação.

Smolczyk (1968) apresenta os primeiros modelos de previsão da profundidade carbonatada. Ho e Lewis (1987) estudaram uma correlação entre ensaios de carbonatação acelerada e natural e, sugerem que um ano de ensaio natural equivale a uma semana de carbonatação acelerada, para um teor de CO₂ de 4%, cura de 7 dias com temperatura de 23°C e umidade relativa (UR) de 50%.

Papadakis, Vayenas, e Fardis (1989) consideram a difusibilidade do CO₂ no concreto, resultando em avanços da modelagem do fenômeno da carbonatação. Parrot (1990), em sua pesquisa classifica os danos resultantes da carbonatação em estruturas de concreto.

O trabalho de Saetta e Vitaliani (2004) apresenta um modelo de vida útil das estruturas de concreto armado, o qual faz a interação entre o material e o meio ambiente e sua influência nas reações de carbonatação.

Duprat et al. (2006) aperfeiçoa o trabalho de Bary e Sellier (2004), que baseado nas equações de conservação de massa apresenta um modelo de carbonatação. Conforme comentado por Tuutti (1982), a Equação 2.7 é uma das equações mais utilizadas para calcular o processo de carbonatação.

$$X_c = K\sqrt{t} \qquad \text{Equação (2.7)}$$

Onde:

X_c = espessura carbonatada em mm;

t = tempo em anos ou meses;

K = depende da difusividade efetiva de CO₂ através do concreto e da presença de água (TUUTTI, 1982).

De acordo com Neville (1997) a equação acima não é válida para condições variáveis de exposição, mas é aceita de um modo geral. Entretanto, a profundidade de carbonatação é diferente na face interna e externa de um mesmo elemento estrutural. Curie (1986, apud NEVILLE, 1997) afirma que o coeficiente K é freqüentemente maior que 3 ou 4 mm/ano^{0,5}.

A fenolftaleína e a timolftaleína são soluções utilizadas como indicadores químicos para medir a frente de carbonatação. Em contato com a solução alcalina do concreto, tais indicadores adquirem colorações típicas a partir de um determinado pH da solução. A fenolftaleína atinge uma coloração vermelha carmim com pH superior a 9,5 e, a timolftaleína adquire uma coloração azulada para um valor de pH da ordem de 10,5 (FIGUEIREDO, 1994).

Helene (1993) sugere que a frente de carbonatação deve ser determinada executando uma fratura na peça de concreto, onde se deve pulverizar uma solução de 1% de fenolftaleína diluída em 49% de álcool e 50% de água ou de timolftaleína diluída em 99% de álcool. Após aproximadamente 30 segundos, as áreas não carbonatadas assumirão a coloração típica do indicador químico empregado e, as áreas carbonatadas não apresentarão coloração alguma.

Para Neville (1997), quando não é possível fraturar o concreto em estudo, podem-se obter amostras de pó perfurando o concreto em diversas profundidades e, submetendo-as ao ensaio com o indicador químico. Deve-se ter cuidado da cal livre de uma parte não carbonatada contaminar uma amostra, tornando-se colorida, dando a impressão de ausência de carbonatação.

A carbonatação tem sido um tema bastante pesquisado na área de durabilidade e vida útil das estruturas, por se tratar de um processo que pode iniciar a corrosão da armadura devido à despassivação da armadura (ISAIA, VAGHETTI e GASTALDINI, 1998).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Inicialmente esclarece-se que não há regulamentação normativa para execução do procedimento experimental efetuado.

Este procedimento fora elaborado e idealizado pelos presentes signatários em conjunto com o Professor Engº Dr. Carlos Brites.

Está apresentado a seguir os materiais utilizados para elaboração do programa em questão

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1. CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO:

No procedimento foram utilizados 14 corpos de prova de concreto armado, de mesmo lote, com Fck de 30,00 MPa, com brita 2, cortados em cilindros de 5,00cm de altura e 10,00 cm de diâmetro, com data de 12/01/2017.

Está apresentado a seguir nas figuras 7 e 8 os corpos de prova utilizados, de modo a ilustrar o material.

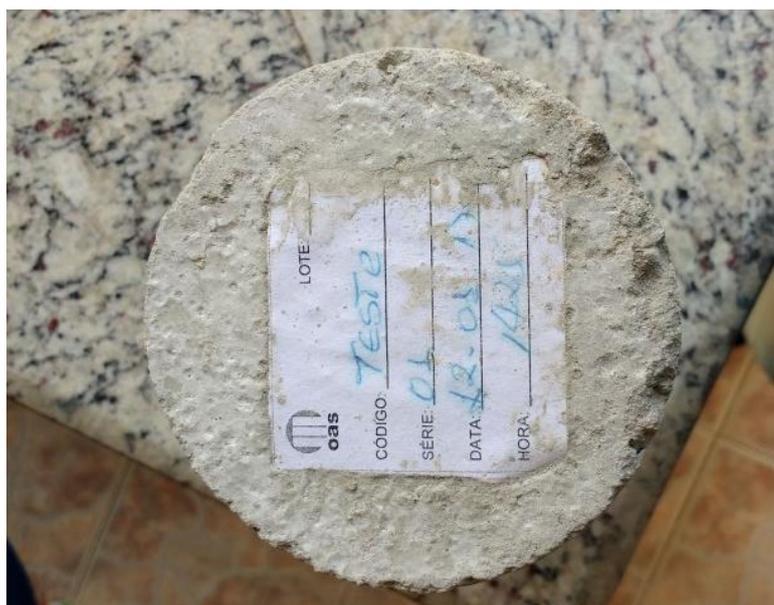


Figura 7 – Imagem da etiqueta de identificação dos lotes dos Corpos de Prova



Figura 8 – Corpos de prova recortados em formato de disco de 5,00 x 10,00cm

3.1.2. MATERIAIS COMBUSTÍVEIS:

Em um incêndio em uma edificação de padrão residencial, existe uma heterogeneidade de tipos de materiais internos, desde móveis, utensílios domésticos, fiações, roupas, entre outros.

Visando então simular um incêndio foi utilizado 2,00kg de materiais combustíveis, dosados em 4 grupos de 500,00g, conforme apresentado na tabela 1:

Grupo	Tipo de Material	Peso (em g.)	Peso Total (em g)
1	Borracha	500,00	2.000,00
2	Papel (celulose)	500,00	
3	Carvão (CO ₂)	500,00	
4	Tecido	500,00	

Tabela 1 – Pesagem dos materiais combustíveis

Cabe ressaltar, que fora efetuado a separação dos materiais em peso, devido ao fato de que o produto da fumaça (fuligem), é proporcional à queima da massa do produto combustível (vide item 2.1.2).

Estão apresentados nas figuras 9, 10, 11 e 12 os materiais combustíveis utilizados.



Figura 9 – 500,00g de borracha pesada



Figura 10 – 500,00g de material celuloso



Figura 11 – 500,00g de carvão



Figura 12 – 500,00g de tecido

3.1.3 INVÓLUCRO

Trata-se do recipiente em que os materiais combustíveis foram queimados e os corpos de prova foram impregnados por fuligem e armazenados até a execução dos ensaios para aferição da frente de carbonatação.

Este invólucro trata-se de um tambor metálico com abertura superior através de uma tampa, com uma grade à 8,00cm da abertura onde foram armazenados os corpos de prova.

Este tambor possui 87,00cm de altura e 50,00cm de diâmetro, sendo que na base foram posicionados 4 cilindros de concreto de 20cm de altura, para distanciar o invólucro do chão.

Está apresentado nas figuras 13 e 14 o tambor utilizado, de modo a ilustrar o material.



Figura 13 – Fotografia externa do invólucro



Figura 14 – Fotografia interna do invólucro

Uma vez que os materiais empregados no programa experimental foram mostrados, será apresentado a seguir os procedimentos efetuados

3.2. PROCEDIMENTOS EFETUADOS

Estão apresentados neste item os procedimentos efetuados para execução dos ensaios práticos.

3.2.1. QUEIMA DO MATERIAL:

Foram incluídos no interior do invólucro, abaixo da grelha, os 2,00kg dos materiais combustíveis separados para execução do ensaio, e posteriormente, colocados 8 corpos de prova na parte superior da grelha, conforme apresentado na figura 15.



Figura 15 – Corpos de prova posicionados sobre a grelha e material combustível na parte inferior do invólucro

Posteriormente, os materiais combustíveis foram embebidos em álcool gel 90°, e a ignição das chamas fora providenciada através de fósforos.

Uma vez dada a ignição nas chamas, o invólucro fora tamponado e iniciado o monitoramento do tempo de chamas até a extinção natural do fogo, com a combustão total dos 2,00kg de material armazenado na parte inferior do tambor, conforme na figura 16.



Figura 16 – Tambor tamponado para impregnação de fuligem dos corpos de prova

À cada aproximados 3 a 5 minutos era feita a abertura do tambor por aproximados 30 segundos, para que o invólucro pudesse ser alimentado de oxigênio e o fogo não fosse extinguido, apesar da abertura na face superior da tampa, conforme na figura 17.



Figura 17 – Abertura da tampa para que o invólucro fosse alimentado com oxigênio

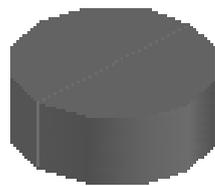
Este procedimento durou aproximadamente 45,00 minutos até a extinção total das chamas, conforme na figura 18.



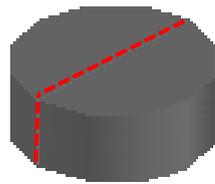
Figura 18 – Momento da extinção total das chamas às 18h58min

3.2.2. AFERIÇÃO DAS FRENTE DE CARBONATAÇÃO:

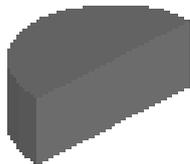
O procedimento para aferição da frente de carbonatação consistiu na secção no centro dos testemunhos, e aplicação via aspersão da solução de fenolftaleína perpendicularmente à área seccionada, conforme ilustrado em figura 19:



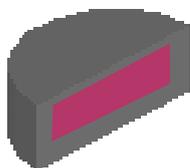
Situação 1- Remoção do testemunho impregnado do recipiente



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 e fissurometro, para comparativo com demais testemunhos

Figura 19 – Ilustração do procedimento de aspersão da solução de fenolftaleína

A solução de fenolftaleína empregada contém a proporção de 1 g 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 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 (aferição da área carbonatada nas situações sem presença de fuligem, com fuligem proveniente de borracha e com fuligem proveniente de madeira), foi executado um gráfico comparativo entre as aferições, identificando se há alteração na penetração de carbonatos, diminuindo assim a vida útil do concreto.

Está apresentado na figura 20 a aferição exemplificando o procedimento.



Figura 20 – Aferição da área carbonatada com paquímetro

Posteriormente, com fissurômetro, foi feita a conferência aproximada da leitura efetuada com o paquímetro, conforme figura 21:



Figura 21 – Confirmação da leitura feita via paquímetro com o fissurômetro

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.

Cabe ressaltar que cada um dos Corpos de Prova passavam por 4 aferições, conforme detalhado na figura 22:

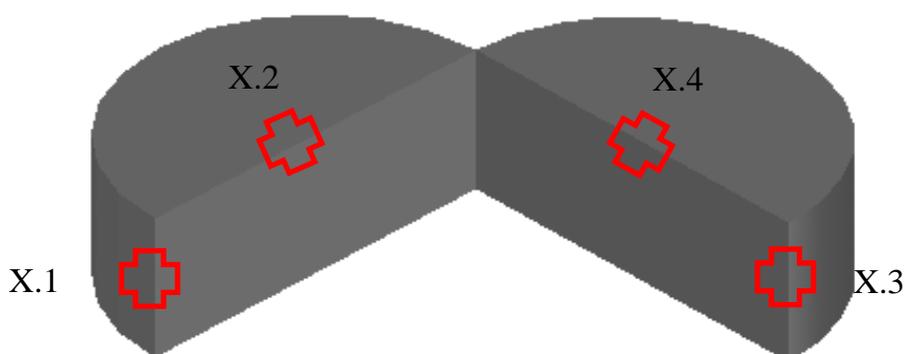


Figura 22 – Posições de aferição do CP X

3.2.3. IDADE DOS ROMPIMENTOS DOS CORPOS DE PROVA:

A aferição da frente de carbonatação nos corpos de prova impregnados por fuligem foram efetuados 30, 90 e 180 dias após a queima dos materiais combustíveis (1, 3, 6 meses respectivamente).

Já a frente de carbonatação nos corpos de prova não impregnados por fuligem, foram aferidas no dia da queima dos materiais combustíveis, bem como nas datas referenciadas no parágrafo supracitado.

Em cada uma das datas dos ensaios, foram feitas aferições em duas amostras de corpos de provas impregnados ou não por fuligem.

Está apresentado no gráfico 2 as datas das elaborações dos ensaios:

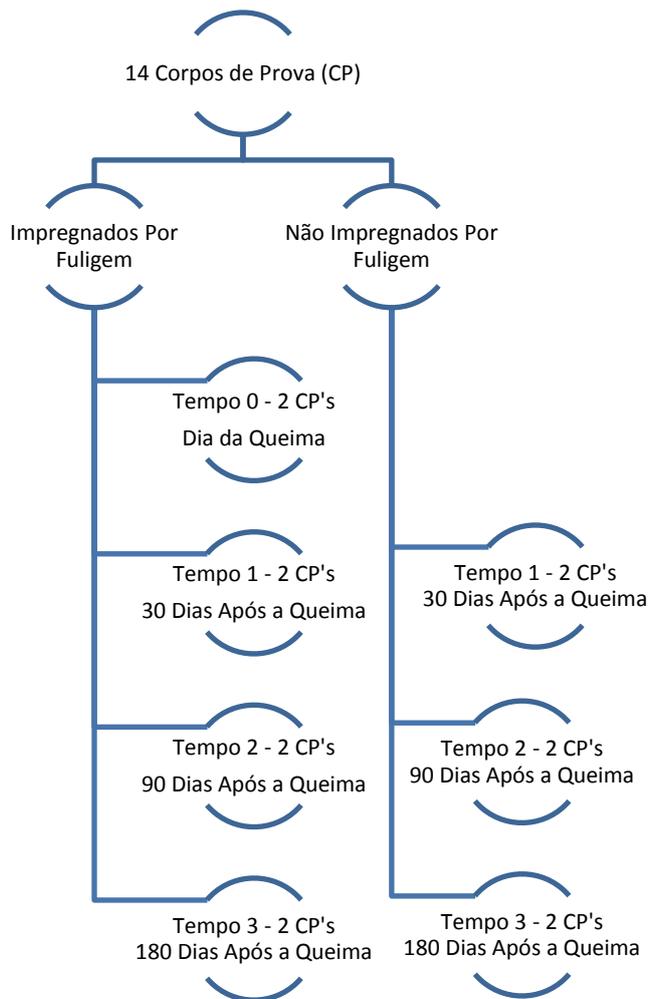


Gráfico 2 – Ilustração dos momentos de execução dos ensaios

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Estarão apresentados neste capítulo, os resultados obtidos em cada uma das aferições efetuadas, de forma cronológica.

Será iniciado com os valores iniciais, onde todos os corpos de prova não estavam impregnados por fuligem, denominado T0, realizado em 17/03/2017:

4.1. AFERIÇÃO T0

Está apresentada na tabela 2 a espessura da frente de carbonatação aferido através do ensaio de aspersão de fnoiftaleína:

Medições	Espessura da carbonatação (mm)
CP 1.1	0,05
CP 1.2	0,06
CP 1.3	0,08
CP 1.4	0,07
CP 2.1	0,05
CP 2.2	0,05
CP 2.3	0,06
CP 2.4	0,08

Tabela 2 – Tabela com resultados do ensaio de aspersão de fnoiftaleína no instante T0

Apresentam-se os registros fotográficos desta aferição, para ilustração da atividade nas figuras 23 e 24.



Figura 23 – Aferição da frente de carbonatação na face superior do CP



Figura 24 – Aferição da frente de carbonatação na face lateral do CP

Nesta mesma data os corpos de prova foram impregnados por fuligem, e nesse sentido, a aferição seguinte ficou programada para 30 dias após.

4.1. AFERIÇÃO T30

Está apresentada na tabela 3 a espessura da frente de carbonatação aferido através do ensaio de aspensão de fnoftaleína, comparando os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (CP 3 e CP 4), e os impregnados por fuligem (CP 5 e CP 6).

	Medições	Espessura da carbonatação (mm)
Não Impregnados por Fuligem	CP 3.1	0,10
	CP 3.2	0,10
	CP 3.3	0,15
	CP 3.4	0,20
	CP 4.1	0,20
	CP 4.2	0,30
	CP 4.3	0,20
	CP 4.4	0,25
Impregnados por Fuligem	CP 5.1	2,00
	CP 5.2	2,50
	CP 5.3	2,50
	CP 5.4	2,30
	CP 6.1	2,00
	CP 6.2	2,00
	CP 6.3	2,50
	CP 6.4	2,80

Tabela 3 – Aferição da frente de carbonatação na face lateral do CP no instante T30

Com o intuito de ilustrar visualmente um comparativo entre os resultados, está apresentado no gráfico 3 em barras com os resultados coletados:

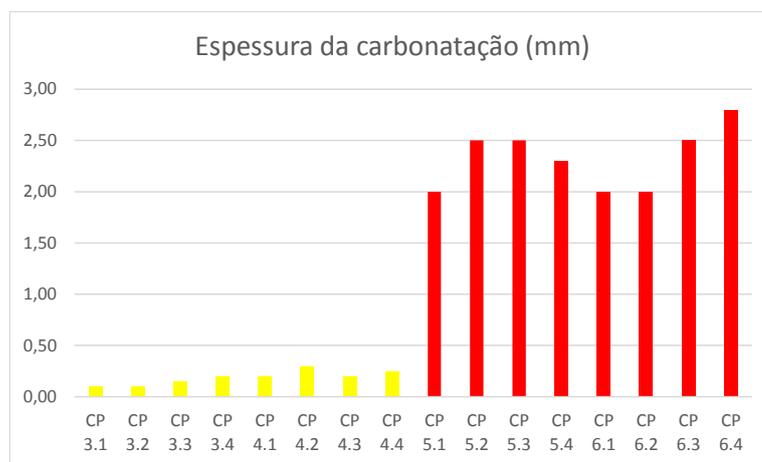


Gráfico 3 – Gráfico comparativo entre os resultados aferidos para os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (amarelos) e impregnados por fuligem (vermelho)

Apresentam-se os registros fotográficos desta aferição, para ilustração da atividade nas figuras 25 a 31.



Figura 25 – Corpos de Prova sem fuligem à 30 dias

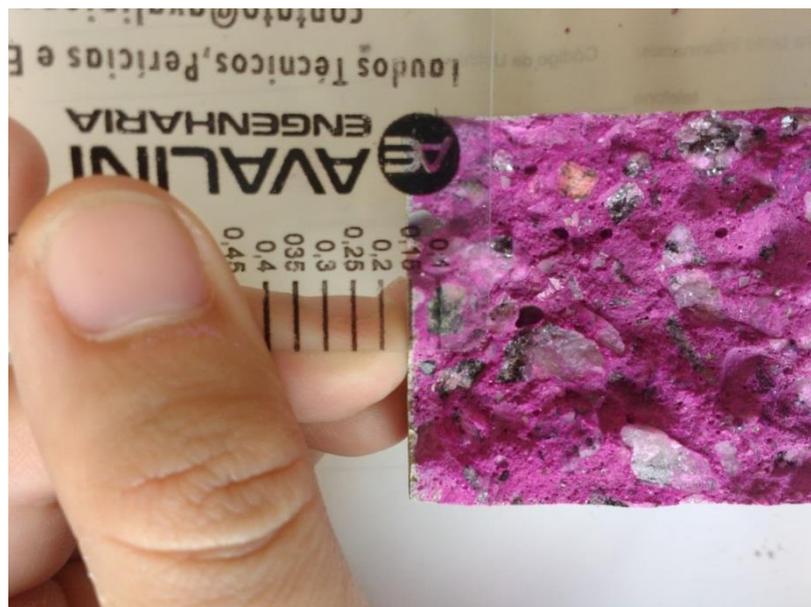


Figura 26 – Detalhamento da aferição dos Corpos de Prova sem fuligem à 30 dias



Figura 27 – Corpos de Prova impregnados fuligem à 30 dias



Figura 28 – Detalhamento da aferição dos Corpos de Prova impregnados por fuligem à 30 dias



Figura 29 – Vista externa comparativa entre corpo de prova impregnado por fuligem (esquerda) e não impregnado por fuligem (direita)

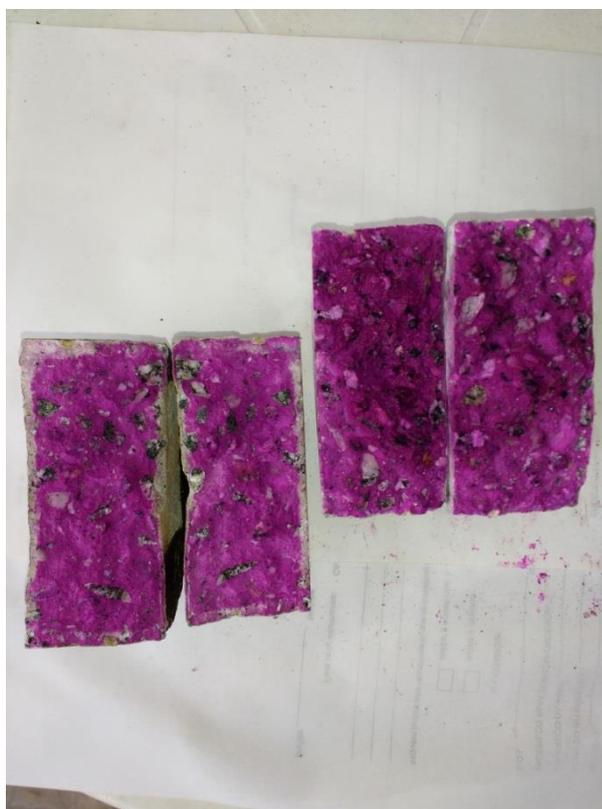


Figura 30 – Vista interna comparativa entre corpo de prova impregnado por fuligem (esquerda) e não impregnado por fuligem (direita)



Figura 31 – Vista interna detalhada comparativa entre corpo de prova impregnado por fuligem (esquerda) e não impregnado por fuligem (direita)

Nesse sentido, a aferição seguinte foi realizada após 20 dias deste procedimento, e de 90 dias da data em que os corpos de prova foram impregnados por fuligem:

4.2. AFERIÇÃO T90

Está apresentada na tabela 4 a espessura da frente de carbonatação aferido através do ensaio de aspensão de fnoftaleína, comparando os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (CP 7 e CP 8), e os impregnados por fuligem (CP 9 e CP 10).

	Medições	Espessura da carbonatação (mm)
Não Impregnados por Fuligem	CP 7.1	0,50
	CP 7.2	0,40
	CP 7.3	0,30
	CP 7.4	0,35
	CP 8.1	0,10
	CP 8.2	0,10
	CP 8.3	0,10
	CP 8.4	0,15
Impregnados por Fuligem	CP 9.1	3,00
	CP 9.2	4,00
	CP 9.3	3,00
	CP 9.4	2,50
	CP 10.1	2,50
	CP 10.2	2,00
	CP 10.3	3,50
	CP 10.4	3,00

Tabela 4 – Aferição da frente de carbonatação na face lateral do CP no instante T90

Com o intuito de ilustrar visualmente um comparativo entre os resultados, está apresentado gráfico 4 em barras com os resultados coletados:

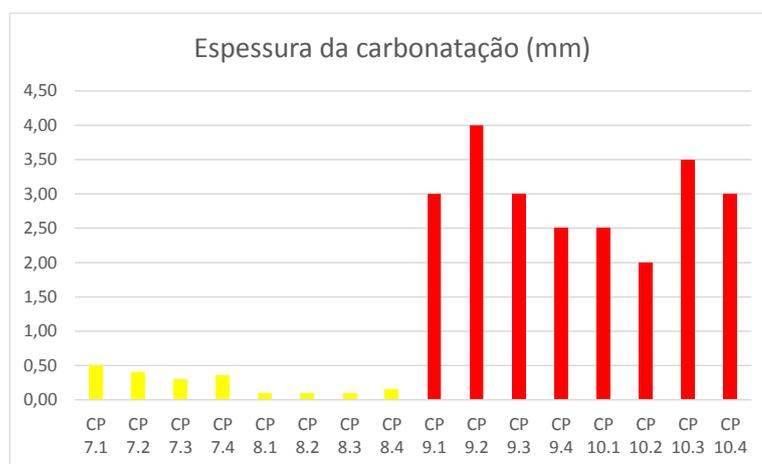


Gráfico 4 – Gráfico comparativo entre os resultados aferidos para os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (amarelos) e impregnados por fuligem (vermelho) ao T90

Serão apresentadas na sequência as figuras 32 a 38 que ilustram as aferições efetuadas no instante T90.



Figura 32 – Corpos de Prova sem fuligem à 90 dias



Figura 33 – Detalhamento da aferição dos Corpos de Prova sem fuligem à 90 dias



Figura 34 – Corpos de Prova impregnados fuligem à 90 dias



Figura 35 – Detalhamento da aferição dos Corpos de Prova impregnados por fuligem à 90 dias



Figura 36 – Vista externa comparativa entre corpo de prova impregnado por fuligem (esquerda) e não impregnado por fuligem (direita)



Figura 37 – Vista interna comparativa entre corpo de prova impregnado por fuligem (esquerda) e não impregnado por fuligem (direita)



Figura 38 – Vista interna detalhada comparativa entre corpo de prova impregnado por fuligem (esquerda) e não impregnado por fuligem (direita)

Nesse sentido, a aferição seguinte foi realizada após 90 dias deste procedimento, e de 180 dias da data em que os corpos de prova foram impregnados por fuligem:

4.3. AFERIÇÃO T180

Está apresentada na tabela 5 a espessura da frente de carbonatação aferido através do ensaio de aspensão de fnoftaleína, comparando os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (CP 11 e CP 12), e impregnados por fuligem (CP 13 e CP 14).

	Medições	Espessura da carbonatação (mm)
Não Impregnados por Fuligem	CP 11.1	0,20
	CP 11.2	0,30
	CP 11.3	0,20
	CP 11.4	0,10
	CP 12.1	0,50
	CP 12.2	0,90
	CP 12.3	1,10
	CP 12.4	1,10
Impregnados por Fuligem	CP 13.1	2,00
	CP 13.2	2,50
	CP 13.3	3,00
	CP 13.4	3,20
	CP 14.1	2,00
	CP 14.2	2,00
	CP 14.3	3,50
	CP 14.4	2,80

Tabela 5 – Aferição da frente de carbonatação na face lateral do CP no instante T180

Com o intuito de ilustrar visualmente um comparativo entre os resultados, será apresentado no gráfico 5 em barras com os resultados coletados:

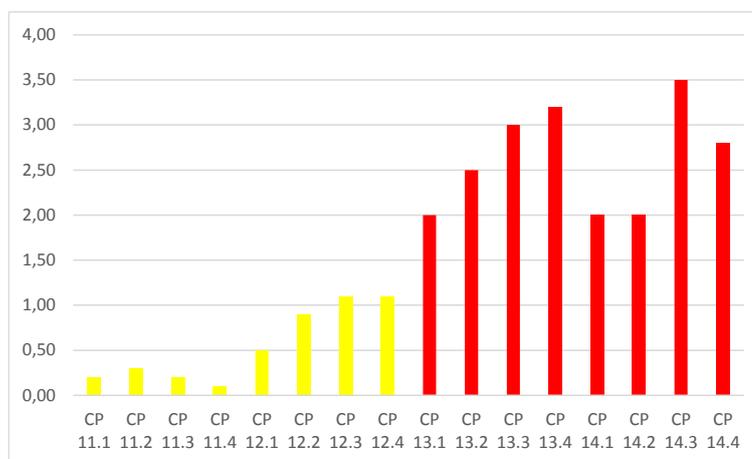


Gráfico 5 – Gráfico comparativo entre os resultados aferidos para os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (amarelos) e impregnados por fuligem (vermelho) ao T180

Serão apresentadas na sequência das figuras 39 a 44 que ilustram as aferições efetuadas no instante T180.



Figura 39 – Corpos de Prova sem fuligem à 180 dias



Figura 40 – Detalhamento da aferição dos Corpos de Prova sem fuligem à 180 dias



Figura 41 – Corpos de Prova impregnados fuligem à 180 dias



Figura 42 – Detalhamento da aferição dos Corpos de Prova impregnados por fuligem à 180 dias



Figura 43 – Vista externa comparativa entre corpo de prova impregnado por fuligem (esquerda) e não impregnado por fuligem (direita)



Figura 44 – Vista interna comparativa entre corpo de prova impregnado por fuligem (esquerda) e não impregnado por fuligem (direita)

Tendo sido feitos todas as aferições, foram compilados os dados, para que pudessem de forma análoga ser analisados, conforme apresentado no capítulo a seguir.

4.4. RESUMO DOS DADOS OBTIDOS

Está apresentada nas tabelas 6 e 7 e gráfico 6 o resumo final com a espessura da frente de carbonatação aferido através do ensaio de aspersão de fnoftaleína, comparando os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (grifados em amarelos), e os impregnados por fuligem (grifados em vermelho).

	Tempo	Medições	Espessura da carbonatação (mm)
Não impregnados por fuligem	T0	CP 1.1	0,05
	T0	CP 1.2	0,06
	T0	CP 1.3	0,08
	T0	CP 1.4	0,07
	T0	CP 2.1	0,05
	T0	CP 2.2	0,05
	T0	CP 2.3	0,06
	T0	CP 2.4	0,08
	T30	CP 3.1	0,10
	T30	CP 3.2	0,10
	T30	CP 3.3	0,15
	T30	CP 3.4	0,20
	T30	CP 4.1	0,20
	T30	CP 4.2	0,30
	T30	CP 4.3	0,20
	T30	CP 4.4	0,25
	T90	CP 7.1	0,50
	T90	CP 7.2	0,40
	T90	CP 7.3	0,30
	T90	CP 7.4	0,35
	T90	CP 8.1	0,10
	T90	CP 8.2	0,10
	T90	CP 8.3	0,10
	T90	CP 8.4	0,15
	T180	CP 11.1	0,20
	T180	CP 11.2	0,30
	T180	CP 11.3	0,20
	T180	CP 11.4	0,10
T180	CP 12.1	0,50	
T180	CP 12.2	0,90	
T180	CP 14.3	1,10	
T180	CP 14.4	1,10	

	Tempo	Medições	Espessura da carbonatação (mm)
Impregnados por fuligem	T30	CP 5.1	2,00
	T30	CP 5.2	2,50
	T30	CP 5.3	2,50
	T30	CP 5.4	2,30
	T30	CP 6.1	2,00
	T30	CP 6.2	2,00
	T30	CP 6.3	2,50
	T30	CP 6.4	2,80
	T90	CP 9.1	3,00
	T90	CP 9.2	4,00
	T90	CP 9.3	3,00
	T90	CP 9.4	2,50
	T90	CP 10.1	2,50
	T90	CP 10.2	2,00
	T90	CP 10.3	3,50
	T90	CP 10.4	3,00
	T180	CP 13.1	2,00
	T180	CP 13.2	2,50
	T180	CP 13.3	3,00
	T180	CP 13.4	3,20
T180	CP 14.1	2,00	
T180	CP 14.2	2,00	
T180	CP 14.3	3,50	
T180	CP 14.4	2,80	

Tabelas 6 e 7 – Tabela dos resultados aferidos para os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (amarelos) e impregnados por fuligem (vermelho), do T0 ao T180

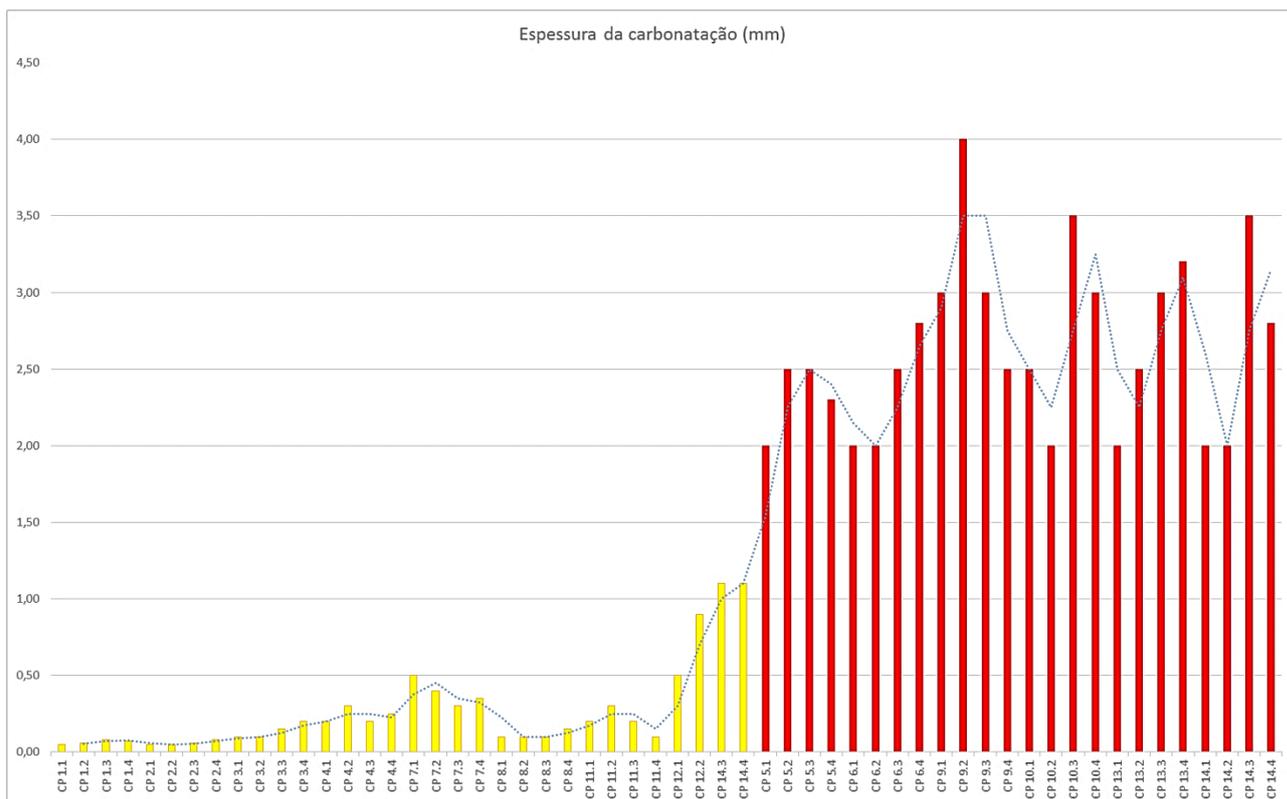


Gráfico 6 – Gráfico comparativo entre os Corpos de Prova não impregnados por fuligem (amarelos) e impregnados por fuligem (vermelho), do T0 ao T180

4.5. COMPILAÇÃO DE RESULTADOS

Com os resultados coletados, foi calculada a média das profundidades de carbonatação, em cada umas das aferições efetuadas, conforme apresentado na tabela 8:

	T0	T30	T90	T180
Média Não Impregnados por Fuligem	0,06	0,19	0,25	0,55
Média Impregnados por Fuligem	0,06	2,33	2,94	2,625

Tabela 8 – Tabela comparativa com os valores médios da frente de carbonatação aferida nos corpos de prova impregnados por fuligem e não impregnados por fuligem, em milímetros, separado por instante de aferição em dias

A média da frente de carbonatação dos corpos de prova impregnados por fuligem, e não impregnados por fuligem, fica evidente a diferença conforme apresentada no gráfico 7:

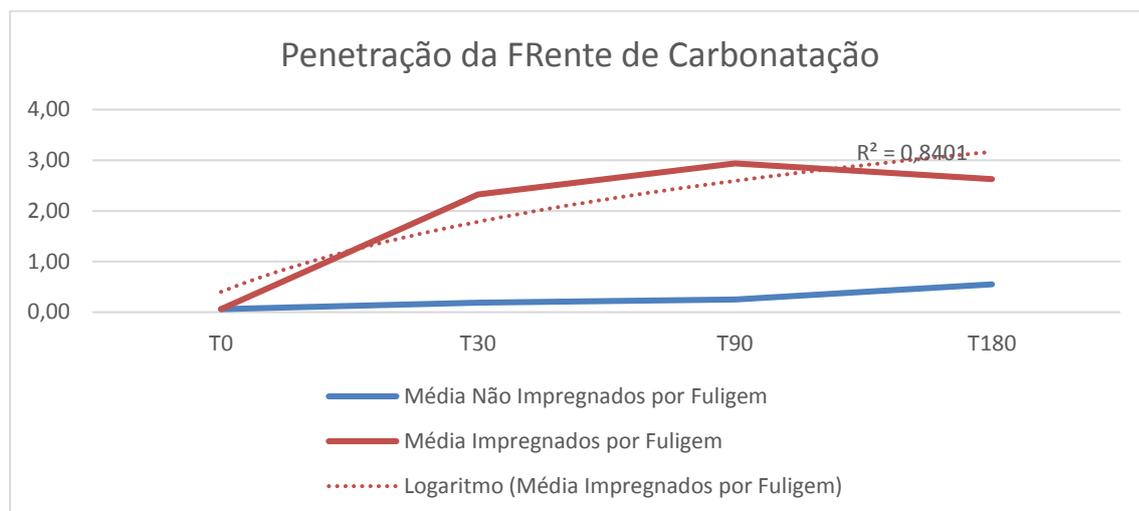


Gráfico 7 – Gráfico comparativo entre valores médios da frente de carbonatação aferida nos corpos de prova impregnados por fuligem e não impregnados por fuligem, em milímetros por tempo em dias

Destes resultados foram efetuadas as observações que estão presentes no item 4.6:

4.6– OBSERVAÇÕES EFETUADAS

Apresenta-se, em tópicos, os pontos que foram identificados com base nos resultados obtidos:

- a) Nitidamente é possível observar que os corpos de prova que foram submetidos à intensa impregnação de fuligem obtiveram em todas as aferições efetuadas, resultados superiores do que os corpos de prova não submetidos à fuligem;
- b) Os corpos de prova que foram submetidos à fuligem tiveram um pico de penetração da frente de carbonatação, e aparentemente tendem à estabilização, como esperado;
- c) Embora os corpos de prova submetidos à fuligem, aparentaram ter um decréscimo nos instantes T90 e T120, tornando ao patamar no instante T120, entende-se que na verdade tratam-se de erros de

leitura e imprecisões do método de aferições, haja vista que está na ordem de 0,3mm e que a percepção da região carbonatada é visual.

Houve na verdade a percepção de que o comportamento, no lapso de tempo em que foram efetuadas as aferições, tendem à linearidade, apesar do fato de que a penetração da carbonatação está relacionada à escala logarítmica (vide equação 2.7).

Ou seja, o lapso de tempo analisado, aparenta tender à linearidade, por se tratar de uma porção infinitesimal de uma curva em escala logarítmica em função da constante “k” e da raiz do tempo “t”.

Dadas as observações supracitadas referentes aos resultados obtidos, foram efetuadas as análises apresentadas no sub-item 4.7.

4.7– ANÁLISE DOS DADOS

Tomando por base a equação 2.7 apresentada neste estudo, que afere a penetração da frente de carbonatação, tem-se a seguinte analogia:

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

Onde:

X_c = espessura carbonatada em mm;

t = tempo em anos ou meses;

K = depende da difusividade efetiva de CO₂ através do concreto e da presença de água (TUUTTI, 1982).

Nesse sentido, será chamada de X_{c1} a profundidade carbonatada nos elementos não submetidos à fuligem e X_{c2} os corpos de prova submetidos à fuligem, sendo que:

$$X_c = \overline{t_{180}} - \overline{t_0}$$

Ou seja X_{c1} e X_{c2} serão dados através da diferença das médias aferidas no instante T180 e T0, conforme calculado a seguir:

$$X_{c1} = 0,55 - 0,06 = 0,49$$

$$X_{c2} = 2,625 - 0,06 = 2,565$$

Dado que o coeficiente de difusidade efetiva de CO_2 neste caso calculado em mm/mês, têm-se:

$$x_{c1} = k_{c1}\sqrt{t}$$

$$0,49 = k_{c1}\sqrt{6}$$

$$k_{c1} = \frac{0,49}{\sqrt{6}}$$

$$k_{c1} = 0,20 \text{ mm/mês}$$

$$x_{c2} = k_{c2}\sqrt{t}$$

$$2,565 = k_{c2}\sqrt{6}$$

$$k_{c2} = \frac{2,565}{\sqrt{6}}$$

$$k_{c2} = 1,047 \text{ mm/mês}$$

Portanto,

$$\frac{k_{c2}}{k_{c1}} = \frac{1,047}{0,20} = 5,235$$

Nesse sentido, tem-se que há uma relação entre k_1 e k_2 de aproximadamente 5,23 vezes devido à impregnação de fuligem no corpo de prova.

Ou seja, foi verificado, que no período de 6 meses em que o corpo de prova de concreto ficou submetido à impregnação de fuligem, a frente de carbonatação avançou com velocidade 5 vezes superior, em relação a um corpo de prova não impregnado por fuligem.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Neste item serão abordadas as considerações finais sobre a pesquisa, e na sequência as recomendações para futuros trabalhos.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que os objetivos estabelecidos no início desta pesquisa foram atingidos e que a hipótese foi corroborada, e pode-se observar que:

- a) Entende-se que a elevada concentração do CO_2 no momento pontual do incêndio intensificou em cerca de 5 vezes a reação química de carbonatação que ocorre internamente do concreto, contudo, após cessar a exposição do concreto a esta concentração (induzida) e retornar ao ambiente usual, a tendência da evolução da carbonatação representou um comportamento de uma situação de atmosfera natural.

- b) Com isso, têm-se dados que nos permitem a sugerir de que uma situação de incêndio possa causar danos não visuais a microestrutura do concreto, mesmo não sendo exposta ao elevado gradiente térmico causado por um incêndio, onde somente a fumaça resulta pode agravar o conhecido fenômeno de carbonatação do concreto.

- c) Por este sentido, sugere-se que as estruturas de concreto de uma determinada edificação quando exposta a fuligem de incêndio deverão ser avaliadas, por meio de ensaios laboratoriais, para verificação da frente de carbonatação e adotados os devidos procedimentos de recuperação e tratamento, para preservar a vida útil da estrutura, visto que uma vez agravada a carbonatação, ocorre o risco de despassivação da armadura do concreto num espaço de tempo inferior ao que o normal, e por consequência o processo de corrosão da armadura.

Por fim, está apresentado a seguir a recomendação para trabalhos futuros.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trata-se de um tema abrangente e usualmente estudado no meio acadêmico, nossa sugestão de continuação desta pesquisa é focar nas variáveis de uma situação de incêndio e procedimentos de reabilitação, sendo:

- Realização de ensaio pratico similiar, alterando a quantidade de materiais queimados, de modo a verificação se a variação da concentração do CO₂ no mesmo intervalo de tempo a que foi exposto do concreto (45min), possa trazer resultados muitos diferentes do que encontrado neste trabalho;

- Realização de ensaio similiar, utilizado corpos de prova de mesma característica, onde metade estaria protegido por uma camada de pintura (acrílica, verniz ou similar) e a outra na condição normal, para verificar se uma barreira protetora impeça este avanço da carbonatação;

- Realização de ensaios similar, no entanto, no momento imediato logo após a exposição do corpo de prova de concreto ao incêndio, o mesmo passe por um processo de limpeza para a remoção da fuligem. Ao longo do mesmo período deverá ser realizado as medições para verificar a se limpeza possa trazer uma redução da carbonatação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13860 – Glossário de Termos Relacionados à Segurança Contra Incêndio** - Rio de Janeiro, 1997.

RAINER D.R.; KORANNE M.; VESECKY S.M.; GOODMAN D.W. **CO+O₂ and CO+NO Reactions Over Pd/Al₂O₃**. Texas: Department of Chemistry, 1997.

PAZINI E.F.; MEIRA G. **Corrosión de Armadura de Estructuras de Hormigón**. Mérida, México: ALCONPAT Internacional, 2013.

BASTOS P.S.S. **Fundamentos do Concreto Armado**. Bauru, SP, Brasil: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2006.

G. R. Meira, I. J. Padaratz, “Custos de Recuperação e Prevenção em Estruturas de Concreto Armado: Uma Análise Comparativa”, IX Encontro Nacional de Tecnologia Construída, 2002

SEITO A.I.; GILL A.A.; PANONNI F.D.; ONO R.; SILVA S.B.; CARLO U.; SILVA V.P.. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo, SP, Brasil: Projeto Editora, 2008.

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

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

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Boletim Técnico BT/PCC/283, 2001.

SOUZA M.A.G.. **Inspeção, Regulação e Engenharia de Incêndio**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: FUNENSEG, 2002.

CASTRO *et al.*, A. L. **Métodos de Ensaio Não Destrutivos para Estruturas de Concreto**. Disponível em <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/151/imprime154418.asp>. Acesso em 24/07/2010 às 13 horas.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL. **Estatísticas 2014**. Disponível em <http://www.sprinklerbrasil.org.br/instituto-sprinkler-Brasil/estatisticas/estatisticas-2014-anual/>. Acesso em 22/07/2016 às 20 horas.

EBC – AGÊNCIA BRASIL. **Nova Fase de Restauração do Museu da Língua Portuguesa Deve Custar R\$ 1,8 Milhão**. Disponível em <http://agenciabrasil.ebc.com.br/cultura/noticia/2016-03/reparos-no-museu-de-lingua-portuguesa-na-luz-devem-custar-r-18-milhao>. Acesso em 22/07/2016 às 21 horas.