

JAQUELINE DE ASSIS OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA
CARBONATAÇÃO E MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS EM
CONCRETOS PÓS INCÊNDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

O48a
2019
Oliveira, Jaqueline de Assis, 1993-
Análise experimental dos efeitos da carbonatação e
migração de íons cloretos em concreto pós incêndio / Jaqueline
de Assis Oliveira. – Viçosa, MG, 2019.
x, 50 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Concreto - Vida útil. 2. Incêndios. 3. Concreto -
Corrosão. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. II. Título.

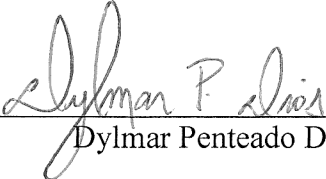
CDD 22. ed. 624.1834

JAQUELINE DE ASSIS OLIVEIRA

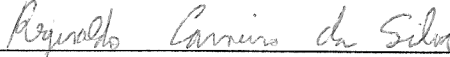
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA
CARBONATAÇÃO E MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS EM
CONCRETOS PÓS INCÊNDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 25 de fevereiro de 2019.



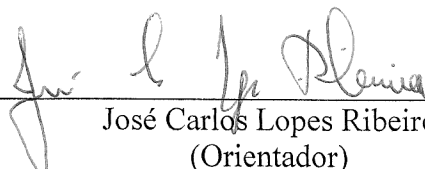
Dylmar Penteado Dias



Reginaldo Carneiro da Silva



Leonardo Gonçalves Pedroti
(Coorientador)



José Carlos Lopes Ribeiro
(Orientador)

*Dedico este trabalho
a Deus e aos meus pais,
Geralda e Geraldo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar sabedoria e não me deixar desistir nesta jornada.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil pelo ensino de qualidade e pela possibilidade de cursar o mestrado.

Ao Professor Dr. José Carlos Lopes Ribeiro, meu orientador, pela confiança, atenção e oportunidade.

Ao Professor Dr. Leonardo Gonçalves Pedroti, meu coorientador, pela dedicação e acompanhamento diário.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelos valiosos ensinamentos e pela ótima convivência.

Ao Laboratório de Materiais de Construção (DEC/UFV).

Aos técnicos dos Laboratórios de Materiais de Construção, em especial ao José Carlos, pela paciência e apoio.

A estagiária Camila Spagnol pela ajuda e empenho durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas da pós-graduação pelo companheirismo, ajudas e momentos de lazer, fazendo esta jornada mais leve. Em especial, à Beatryz, João Vitor, Deise, André, Wellington e Gustavo Nalon.

Aos amigos da FaEnge (UEMG) e UNIFEI, por acreditarem no meu empenho em alcançar o mestrado e pelas oportunidades confiadas.

Por fim, agradeço imensamente à minha mãe, Geralda e ao meu pai Geraldo, pelo amor e apoio incondicional; aos meus irmãos, Giovanny, Janine e Ana Laura, pelo carinho e cumplicidade; ao meu namorado, Rafael, pelas aulas de programação, pelo incentivo e amor; e aos demais familiares e amigos, pela lembrança, torcida e orações.

Enfim, a todos que cruzaram comigo neste caminho e me ajudaram construir mais esta vitória.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
2. OBJETIVOS	3
3. JUSTIFICATIVA.....	3
4. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	4
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	5
ARTIGO 1. Análise experimental dos efeitos da carbonatação em concretos pós incêndio	7
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAIS E MÉTODOS	11
2.1. Materiais.....	11
2.2. Preparação do concreto	11
2.3. Preparação das amostras	12
2.4. Exposição a altas temperaturas	12
2.5. Ensaio de carbonatação acelerado.....	15
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1. Avanço da carbonatação	17
3.2. Análise por Difração de Raios X (DRX)	20
3.3. Análise térmica.....	21
4. CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23
ARTIGO 2. Análise da durabilidade de concretos pós incêndio por meio da migração de íons cloretos	26
1. INTRODUÇÃO	26
2. MATERIAIS E MÉTODOS	29
2.1. Materiais.....	30
2.2. Ensaio de migração de íons cloretos	30

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
3.1. Avanço da migração de íons cloretos.....	34
3.2. Análise da microestrutura (MEV).....	38
4. CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
CONCLUSÕES GERAIS.....	44
1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
APÊNDICE A – Teste Grubb’s (outliers) e análises de variância (Anova) relativos aos ensaios de migração de íons cloretos.....	46
APÊNDICE B – Sketch utilizado para leitura de pH através de sistema Arduino	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da carbonatação em concreto armado.....	9
Figura 2 - Preparação de amostra para ensaio de carbonatação acelerada.....	12
Figura 3 - Posicionamento dos CP's para aquecimento no forno mufla.....	13
Figura 4 - Gráfico temperatura dos termopares <i>versus</i> tempo – 200 °C / 20 MPa.....	14
Figura 5 - Gráfico temperatura dos termopares <i>versus</i> tempo – 700 °C / 35 MPa.....	14
Figura 6 - Corpo de prova parafinado pronto para entrada na câmara.....	15
Figura 7 - Representação esquemática da câmara de carbonatação.....	16
Figura 8 - Câmaras de carbonatação e instrumentos para medição da concentração de CO ₂	16
Figura 9 - Plano de corte dos corpos de prova.	17
Figura 10 - Avanço da frente de carbonatação (30 dias).	18
Figura 11 - Avanço da carbonatação <i>versus</i> durabilidade - 20 MPa (RR).	18
Figura 12 - Avanço da carbonatação <i>versus</i> durabilidade - 35 MPa (RR).	19
Figura 13 - DRX das amostras.	20
Figura 14 - Análises termodiferencial (DTA) e termogravimétrica (TGA).....	21
Figura 15 - Esquema de corrosão por pites.	28
Figura 16 - Esquema de ensaio acelerado de migração de íons cloretos.	31
Figura 17 - Ensaio de migração de íons cloretos (LMC/UFV).....	31
Figura 18 - Relação condutividade elétrica <i>versus</i> concentração de íons cloretos, obtida experimentalmente.	32
Figura 19 - Comparação entre as médias dos coeficientes de difusão de íons cloretos para os CP's de f_{ck} igual a 20MPa.	35
Figura 20 - Comparação entre as médias dos coeficientes de difusão de íons cloretos para os CP's de f_{ck} igual a 35MPa.	35
Figura 21 - Teste de Tukey para amostras com f_{ck} igual a 20 MPa.....	36
Figura 22 - Teste de Tukey para amostras com f_{ck} igual a 35 MPa.....	36
Figura 23 - Previsão da durabilidade para f_{ck} igual a 20 MPa.....	37
Figura 24 - Previsão da durabilidade para f_{ck} igual a 35 MPa.....	37
Figura 25 - Micrografias do concreto 20 MPa / 200 °C / resfriamento lento (RL).	38
Figura 26 - Micrografias do concreto 20MPa / 200 °C / resfriamento rápido (RR).	38
Figura 27 - Micrografias do concreto 20 MPa / 500 °C / resfriamento lento (RL).	39
Figura 28 - Micrografias do concreto 20 MPa / 500 °C / resfriamento rápido (RR).	39
Figura 29 - Micrografias do concreto 35 MPa / 700 °C / resfriamento lento (RL).	40
Figura 30 - Micrografias do concreto 35 MPa / 700 °C / resfriamento rápido (RR).	40
Figura 31 - Micrografias do concreto 35 MPa / 700 °C / resfriamento rápido (RR), com ampliação de 10000x.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vida Útil de Projeto (VUP).....	2
Tabela 2 - Coeficientes de acordo com tipo de cimento empregado.	10
Tabela 3 - Coeficiente K_{ce} de acordo com tipo de exposição da estrutura.....	10
Tabela 4 - Propriedades dos materiais empregados.	11
Tabela 5 - Dosagens estudadas.	12
Tabela 6 - Média dos resultados de fluxo de íons de cloreto (J_{Cl}) e coeficiente de difusão (D_s).	34

RESUMO

OLIVEIRA, Jaqueline de Assis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Análise experimental dos efeitos da carbonatação e migração de íons cloretos em concretos pós incêndio.** Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro. Coorientadores: Leonardo Gonçalves Pedroti e Rita de Cássia Silva Sant'Ana Alvarenga.

O presente trabalho teve como objetivo a investigação da durabilidade residual de concretos danificados em situações de incêndio. Para isso, buscou-se avaliar o avanço da ação de potenciais agentes agressivos que, por consequência, atuam como provocadores de corrosão nas armaduras. Assim, foram selecionados concretos de resistências características à compressão distintas (20 MPa e 35 MPa), submetidos às temperaturas de 200 °C, 500 °C e 700 °C e a dois tipos de resfriamentos (rápido e lento). Inicialmente, foi realizado um ensaio acelerado de carbonatação, verificando a influência da temperatura na entrada de CO₂ no concreto e, conseqüentemente, a atuação da carbonatação. Posteriormente, realizou-se um ensaio acelerado de migração de íons cloretos, a fim de constatar a relevância da ação do fogo na difusão de cloretos no interior do concreto. Com relação à carbonatação, verificou-se que os concretos aquecidos e resfriados rapidamente apresentaram maior avanço da frente de carbonatação. Entretanto, as amostras resfriadas lentamente não apresentaram nenhum indício de carbonatação. Com relação a migração de íons cloretos, da mesma forma, as amostras incendiadas apresentaram maior difusão se comparadas às amostras não aquecidas. Entretanto, em temperaturas mais altas houve melhora da durabilidade em relação à temperatura de 200 °C. Por fim, foi possível assegurar que as avaliações de durabilidade devem ser indispensavelmente consideradas para as situações de pós incêndio, uma vez que a vida útil estabelecida pelos critérios da ABNT NBR 15575:2013 fica claramente comprometida.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Jaqueline de Assis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Experimental analysis of the effects of carbonation and chloride ions migration on concrete after fire.** Adviser: José Carlos Lopes Ribeiro. Co-advisers: Leonardo Gonçalves Pedroti and Rita de Cássia Silva Sant'Ana Alvarenga.

This work had as objective to investigate the residual durability of damaged concrete in fire situation. For this, it was evaluated the advance of the action of potential aggressive agents that consequently act as corrosion provokers in the reinforcements. Therefore, different types of concrete (20 MPa and 35 MPa) were selected and tested at different temperatures (200 °C, 500 °C and 700 °C) and two cooling process (rapid and slow). Initially, an accelerated carbonation test was performed, verifying the influence of the temperature on concrete CO₂ entry and, consequently, the concrete carbonation performance. Later, an accelerated migration test with chloride ions was performed, in order to verify the relevance of the fire for the diffusion of chlorides. Regarding to carbonation test, it was found that concretes heated and rapidly cooled showed greater progression of carbonation. However, the progression of carbonation was nil in the slowly cooled samples. Regarding the migration of chloride ions, in the same way, the burned samples presented greater diffusion when compared to the unheated samples. However, at higher temperatures, there was an improvement of the durability in relation to the temperature of 200 °C. Finally, it was possible to ensure that durability evaluations should be indispensable for post-fire situation, since the useful life established by the criteria of ABNT NBR 15575-1: 2013 is clearly compromised.

INTRODUÇÃO GERAL

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As 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. Após um incêndio torna-se, então, necessário avaliar o nível de deterioração da estrutura, a fim de determinar e executar os reforços e manutenções necessários para garantir segurança e confiabilidade no desempenho dos elementos construtivos em um possível reuso da edificação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O concreto, por possuir qualidades como facilidade de utilização e custo relativamente baixo, é um material amplamente empregado em vários tipos de construções. Esse material é caracterizado por possuir boa resistência à compressão e baixa condutividade térmica. Contudo, quando sujeito a temperaturas muito elevadas, suas propriedades sofrem deterioração, podendo, em situação extrema, levar ao colapso total ou parcial da estrutura (SANTOS e RODRIGUES, 2012; BATTAGIN e SILVEIRA, 2018).

Estudos anteriores (RASHAD e ZEEDAN, 2012; LIM e MONDAL, 2014; WANG *et al.*, 2015; FERNANDES *et al.*, 2017) mostram que propriedades mecânicas como resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade são características afetadas nos concretos, durante a exposição a altas temperaturas. A fissuração é outra patologia bastante comum nesse cenário, pois como há diferentes coeficientes de dilatação térmica entre os materiais que compõem o sistema estrutural, ocorrem consideráveis movimentos que causam fissuras ou trincas de diferentes profundidades. Pode-se também surgir fissuras no concreto ao longo das armaduras, como resultado da diferença de expansão do concreto e do aço sob ação do calor (SANTOS e RODRIGUES, 2012; PURKISS e LI, 2014).

As consequências das modificações na microestrutura do concreto podem acelerar a entrada de agentes agressivos até às armaduras, podendo ajudar a comprometer a durabilidade da edificação após um incêndio.

No Brasil, a preocupação com a durabilidade foi incorporada às normas de estruturas de

concreto pela ABNT NBR 6118:2003 e impulsionada com o surgimento da ABNT NBR 15575:2013 Edificações habitacionais - Desempenho, instituindo um nível de desempenho mínimo ao longo da vida útil para os principais elementos das edificações.

A ABNT NBR 15575-1:2013 descreve a vida útil (VU) como período de tempo compreendido entre o início de operação ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências pré-estabelecidas pelo usuário.

Além disso, a norma também define o período de tempo durante o qual o edifício, ou seus sistemas, devem manter o seu desempenho cumprindo suas manutenções específicas de operação e uso como Vida Útil de Projeto (VUP). A norma estabelece ainda que o edifício e seus sistemas devem atender a VUP estabelecida nesta mesma norma, sendo que nenhum dos sistemas por ela relacionados deve ser projetado com uma vida útil inferior aos períodos de tempo mínimos estabelecidos conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Vida Útil de Projeto (VUP).

Sistema	VUP mínima (anos)
Estrutura	≥ 40
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical e externa	≥ 40
Vedação vertical e interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20

Fonte: ABNT NBR 15575:2013

Dentre os vários mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado, um dos principais problemas associados à durabilidade, conforme Vieira (2003), é a corrosão das armaduras. A corrosão afeta diretamente a durabilidade, reduzindo, dessa forma, a vida útil da estrutura e só ocorre quando a película passivadora garantida pelo concreto e que mantém o aço protegido é destruída.

A ABNT NBR 6118:2014 indica que as principais causas da despassivação das armaduras são oriundas da atuação de agentes agressivos, principalmente por ataque de íons cloretos e CO₂ (dióxido de carbono).

Nesse sentido, este trabalho propõe um programa experimental, baseando-se nos critérios indicados pela ABNT NBR 15575:2013, para a avaliação da evolução dos avanços das frentes de carbonatação e migração de cloretos, em concretos após exposição a temperaturas elevadas. É proposto também a consideração de formas variadas de arrefecimento e composição do concreto.

Dessa forma, será possível mensurar e estabelecer o desempenho e vida útil do concreto estrutural após ter sido submetido à situação de incêndio, tendo em vista os fatores estudados e assegurando conhecimento às avaliações futuras nessa situação.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a realização de uma análise experimental da previsão do avanço da migração de íons cloretos e da frente de carbonatação em concretos após terem sido submetidos a altas temperaturas.

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) determinar um comparativo dos efeitos do avanço da migração de íons cloreto e da frente de carbonatação antes e após a exposição do concreto a diferentes temperaturas de incêndio;
- b) obter a influência das formas de arrefecimento nos casos de ataque de íons cloreto e carbonatação;
- c) analisar a influência da durabilidade do concreto nos casos de ataque de íons cloreto e carbonatação.

3. JUSTIFICATIVA

As propriedades micro estruturais do concreto exposto a altas temperaturas são modificadas por reações químico-físicas nos materiais gerando diferentes características físico-mecânicas. Ao ser aquecido, inicia-se o aumento das tensões internas no elemento de concreto que sofre, a partir de então, mudanças físicas como aberturas de fissuras e deslocamentos (MEHTA e MONTEIRO, 2008; SANTOS *et al.*, 2010).

A recuperação das características da estrutura anteriores ao incêndio depende então da proporção dos danos gerados ao concreto e às armaduras ao fim do resfriamento, só assim

se saberá se a estrutura arrefecida é seguramente funcional ou se é necessário um reparo imediato (RAOUFFARD e NISHIYAMA, 2016).

As consequências das modificações na microestrutura do concreto podem facilitar a entrada de agentes agressivos até às armaduras, podendo ajudar a comprometer a capacidade portante da edificação após um incêndio.

Zhu *et al.* (2016) afirmam que a corrosão das armaduras devido à penetração de íons de cloreto e a carbonatação do concreto é um problema significativo para a redução da resistência e durabilidade das estruturas de concreto armado, legitimando assim a importância de se avaliar a evolução desses ataques também ao concreto pós incêndio.

No entanto, observa-se que a maioria das pesquisas encontradas para essas situações tem como objetivos caracterizar as resistências residuais ou desenvolver formas de recuperação da condição resistente inicial da estrutura. Porém, pouco é experimentado no que se refere aos critérios de durabilidade indicados pela ABNT NBR 15575:2013 a fim de se estimar a vida útil nesses casos.

Logo, este trabalho contribuirá com dados para avaliação de concretos estruturais em situação pós incêndio, no contexto da durabilidade, estimando o tempo de utilização segura da estrutura.

4. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em quatro tópicos, conforme a seguir:

- a) *Introdução geral* – apresenta as considerações iniciais necessárias para contextualização deste trabalho; objetivos específicos; justificativa sobre a importância da realização deste estudo e a estruturação da dissertação.
- b) *Artigo 1: Análise experimental dos efeitos da carbonatação em concretos pós incêndio* – tem como objetivo avaliar o avanço da frente de carbonatação de concretos submetidos a altas temperaturas e diferentes tipos de arrefecimento, a fim de verificar o desempenho residual desses materiais no contexto da durabilidade, ponderando a vida útil da estrutura sujeita a situação de incêndio.

- c) *Artigo 2: Análise da ação da migração por íons cloretos em concretos pós incêndio* – busca verificar a evolução da migração de íons cloretos em concretos submetidos a altas temperaturas e diferentes tipos de arrefecimento estudando o desempenho residual desses materiais no contexto da durabilidade, com o objetivo de comparar os efeitos aos de materiais que não foram submetidos à ação do fogo.
- d) *Conclusões Gerais* – apresenta as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais – NBR 15575-1, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 2: Sistemas Estruturais – NBR 15575-2, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – NBR 6118, 2014.

BATTAGIN, A. F.; SILVEIRA, A. L. Z. P. Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada. *Concreto e construções* V.89 p.44-48 IBRACON, 2018.

FERNANDES B; GIL, A.M.; BOLINA, F.L.; TUTUKIAN, B.F. Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* vol.10 no.4 , p. 838 – 863, 2017.

LIM, S; MONDAL, P. Micro- and nano-scale characterization to study the thermal degradation of cement-based materials. *Materials characterization*, 92 p.15 – 25, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, São Paulo: IBRACON, 3ª ed, 2008.

PURKISS, J. A.; LI, L. Y. *Fire safety engineering design of structures*. Third edition, CRC Press, Boca Raton-FL, 2014.

RAOUFFARD, M. M.; NISHIYAMA, M. Residual Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Frames. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 14 p. 625- 633, 2016.

RASHAD, A. M.; ZEEDAN, R. S. A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 29, p.672–681, 2012.

SANTOS, C. C.; RODRIGUES, J. P. C. Experimental testing on the residual mechanical properties of ordinary concretes after fire. In *International Conference on Experimental Mechanics*, Porto, 2012.

SANTOS, C. C., RODRIGUES, J. P. C. e COELHO, A. L. Influência do processo de arrefecimento e do carregamento na resistência residual à compressão de betões normais após incêndio. In Encontro Nacional Conservação e Reabilitação de Estruturas, Lisboa, 2010.

VIEIRA, F. M. P. Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

WANG, G; ZHANG, C.; ZHANG, B.; LI, Q.; SHUL, Z. Study on the high-temperature behavior and rehydration characteristics of hardened cement paste. *Fire and Materials*, v. 39, n. 5, p. 741-750, 2015.

ZHU X.; ZIG.; CAO Z.; CHENG X. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. *Construction and Building Materials*, v.110, p. 369–380, 2016.

ARTIGO 1. ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS PÓS INCÊNDIO

Resumo

Edificações em concreto armado, quando sujeitas à ação excepcional de incêndio, podem apresentar degradação nas propriedades do concreto, em função das características do material, do tempo de duração, da temperatura alcançada e das formas de extinção do fogo. Propriedades mecânicas dos concretos como resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade apresentam alterações durante a exposição a altas temperaturas. Todavia, pouco se conhece a respeito das condições do avanço de frentes de carbonatação, em situação de pós incêndio nas estruturas. Este trabalho propõe um programa experimental para avaliação do avanço das frentes de carbonatação em concretos após exposição a temperaturas elevadas. Avaliou-se a velocidade da frente de carbonatação em corpos de prova com resistências características à compressão de 20 MPa e 35 MPa, submetidos a altas temperaturas (200 °C, 500 °C e 700 °C) e diferentes tipos de resfriamento (rápido e lento). Concluiu-se que a durabilidade do concreto é prejudicada com a exposição a altas temperaturas seguida de resfriamento rápido. Entretanto, as situações de resfriamento lento não demonstraram nenhuma carbonatação.

Palavras-chave: concreto, incêndio, carbonatação, durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade de um sistema estrutural em concreto armado está proporcionalmente relacionada às condições e qualidade do concreto empregado. Além da função de material estrutural portante, o concreto também é responsável por proteger as armaduras dos agentes de corrosão em dois aspectos: o físico e o químico (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Quanto à primeira proteção, é devida à barreira física proporcionada pelo cobrimento sobre a armadura, cuja eficiência depende da qualidade e espessura do cobrimento de concreto. Já a proteção química resulta do elevado pH existente na solução aquosa dos poros do concreto, permitindo assim a formação de uma fina película protetora conhecida como camada passivadora (RI, 2002).

Nesse sentido, a ação térmica devido a um incêndio aumenta a temperatura dos elementos estruturais e torna-se uma preocupante ação de danificação do concreto, causando alterações em sua micro e macroestrutura. As alterações físico-químicas no concreto superaquecido promovem a degeneração progressiva do material (COSTA *et al.*, 2002; SANTOS e RODRIGUES, 2012; FERNANDES *et al.*, 2017).

Logo, a avaliação da durabilidade nesses casos torna-se pertinente e essencial à estabilidade estrutural. A corrosão das armaduras devido à carbonatação do concreto é um problema significativo para a redução da qualidade e vida útil das estruturas em concreto armado (ZHU *et al.*, 2016, MEMON *et al.*, 2019). No entanto, poucas são as avaliações dos critérios de durabilidade indicados pela ABNT NBR 15575-2:2013 a fim de se estimar a vida útil nesses casos.

Na ABNT NBR 6118:2014 define-se, simplificadamente, despassivação por carbonatação como a ação do gás carbônico (CO₂) da atmosfera sobre o aço da armadura. A norma indica medidas preventivas de controle do cobrimento das armaduras e fissuração do concreto. Além disso, recomenda também que o concreto tenha baixa porosidade, a fim de dificultar o ingresso dos agentes agressivos no interior do concreto.

Segundo Pauletti (2009), a carbonatação é um fenômeno físico-químico que ocorre principalmente entre os hidratos do cimento e o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera, reduzindo a alcalinidade do concreto.

Na reação básica de carbonatação, o dióxido de carbono atmosférico dissolve-se na água dos poros e produz um ácido carbônico fraco (H₂CO₃), que se dissocia e reage com o hidróxido de cálcio e depois com os hidratos de silicato de cálcio. Ocorre, então, a formação de água e a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO₃), e conseqüente redução do nível de pH do concreto (Figura 1). Com a diminuição do pH, a frente de carbonatação avança progressivamente para o interior do concreto podendo atingir a armadura, gerando a despassivação (LO *et al.*, 2016; DUPRAT *et al.*, 2014).

Em resumo, a reação básica da carbonatação consiste nas Equações (1) e (2).

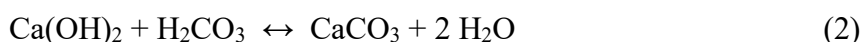
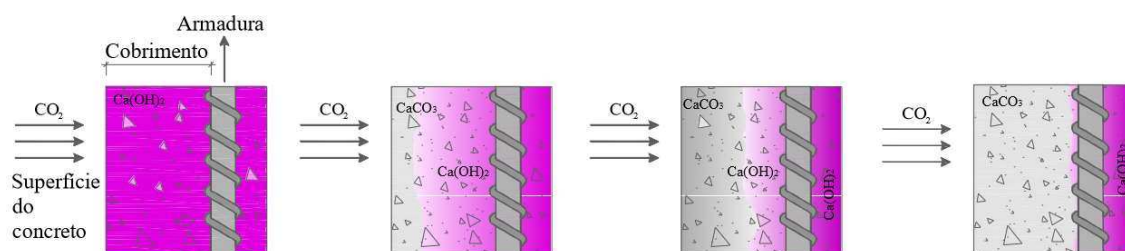


Figura 1 - Esquema da carbonatação em concreto armado.



Fonte: Possan (2010)

Embora a diminuição da alcalinidade não seja um fator prejudicial ao concreto, a redução do pH se torna crítica para a corrosão da armadura, quando determinadas condições forem reunidas (presença de água, diferença de potencial, acesso ao oxigênio), fatores aos quais as estruturas de concreto armado normalmente estão expostas (PAULETTI, 2009).

A corrosão das armaduras devido à carbonatação do concreto ocorre de forma generalizada, tal qual a armadura estivesse exposta à atmosfera, sem proteção. A armadura fica, portanto, em contato direto com a umidade presente no interior do concreto (FREIRE, 2005).

Nesse sentido, Possan (2010) elaborou um modelo matemático, utilizando coeficientes em função do tipo de concreto e condições de exposição das estruturas, para descrever a ação do dióxido de carbono através do concreto, sendo representado pela Equação (3).

$$x_{ec}(t) = k_c \left(\frac{20}{f_c} \right)^{k_{fc}} \left(\frac{t}{20} \right)^{0,5} \exp \left(\frac{k_{ad} ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} + \frac{k_{CO_2} CO_2^{0,5}}{60 + f_c} - \frac{k_{UR} (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) k_{ce} \quad (3)$$

onde:

$x_{ec}(t)$ = profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto, em MPa;

k_c = fator variável referente ao tipo de cimento empregado, tabelado;

k_{fc} = fator variável referente à resistência à compressão axial em função do tipo de cimento;

t = idade do concreto, em anos;

ad = teor de adição pozzolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;

k_{ad} = fator variável referente à adição pozzolânica do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – em função do tipo de cimento usado, tabelado;

UR = umidade relativa média, em % multiplicada por 0,01;

k_{UR} = fator variável referente à umidade relativa, em função do cimento usado;

CO_2 = teor de CO_2 na atmosfera, em %;

k_{CO_2} = fator variável referente ao teor de CO_2 do ambiente em função do cimento;

k_{ce} = fator variável referente à exposição à chuva em função das condições de exposição da estrutura.

Os coeficientes do modelo de Possan são apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3.

Tabela 2 - Coeficientes de acordo com tipo de cimento empregado.

Tipo de Cimento	Características do concreto			Condições ambientais	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	k_{CO_2}	k_{UR}
CP I	19,8	1,7	0,24	18	1300
CP II E	22,48	1,5	0,32	15,5	1300
CP II F	21,68	1,5	0,24	18	1100
CP II Z	23,66	1,5	0,32	15,5	1300
CP III	30,5	1,7	0,32	15,5	1300
CP IV	33,27	1,7	0,32	15,5	1000
CP V ARI	19,8	1,7	0,24	18	1300

Fonte: Possan (2010)

Tabela 3 - Coeficiente K_{ce} de acordo com tipo de exposição da estrutura.

Condições de exposição da estrutura	
Proteção à chuva	K_{ce}
Ambiente interno protegido da chuva	1,30
Ambiente externo desprotegido da chuva	1,00
Ambiente externo protegido da chuva	0,65

Fonte: Possan (2010)

Com base no exposto, este trabalho tem como objetivo estimar o tempo de utilização segura de uma estrutura, através da investigação por ensaio acelerado de carbonatação em concretos de diferentes dosagens utilizados na prática, contribuindo com dados para avaliação de concretos estruturais em situação pós incêndio, no contexto da durabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto experimental envolvido neste estudo foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa, utilizando os mesmos recursos e procedimentos aplicados por Martins *et al.* (2018) para o ensaio acelerado de carbonatação.

2.1. Materiais

Para a fabricação das amostras estudadas foram utilizados os seguintes materiais: aglomerante do tipo cimento Portland composto com escória granulada de alto forno do tipo CP II-E-32, areia natural quartzosa (agregado miúdo) extraída do Rio Piranga (Porto Firme-MG) e, como agregado graúdo, brita 1 de origem granítica proveniente da Pedreira MBC, com diâmetro máximo de 19 mm.

Inicialmente, para a produção do concreto, amostras dos materiais foram coletadas e submetidas à análise granulométrica, massa específica e massa unitária conforme as recomendações da ABNT NBR NM 248:2003, ABNT NBR NM 52:2009, e ABNT NBR NM 45:2006, respectivamente. As propriedades dos materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades dos materiais empregados.

Material	Descrição/procedência	Massa Específica (kg/dm ³)	Absorção (%)	Massa unitária (kg/dm ³)	Dmax (mm)	Módulo de finura	Material pulverulento (%)
Cimento	CP II E 32 Tupi	2,96	–	–	–	–	–
Areia	Natural	2,62	1,20	1,49	6,30	2,98	1,20
Brita	Granítica Pedreira MBC	2,79	0,60	1,49	19,00	6,35	1,70

2.2. Preparação do concreto

Realizou-se um estudo de traços para produzir concretos com resistências características (f_{ck}) de aproximadamente 20 MPa e 35 MPa, compreendendo duas classes de resistências estruturais frequentemente aplicadas na prática, seguindo as recomendações da ABNT NBR 12655:2015 para preparação. As dosagens estudadas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dosagens estudadas.

f_{ck}	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	a/c
20MPa	1	2,35	3,69	0,66
35MPa	1	1,42	2,62	0,47

A cura dos corpos de provas (CP's) foi realizada por submersão de acordo com a ABNT NBR 5738:2015, após 24 h da moldagem. Posteriormente aos 28 dias, 3 CP's cilíndricos (100 mm × 200 mm) de controle foram ensaiados à compressão, aplicando carga na seção transversal do corpo de prova até obter-se a ruptura da peça, a resistência à compressão individual, conforme as recomendações da ABNT NBR 5739:2007.

2.3. Preparação das amostras

Para a realização deste trabalho, foram produzidos ao todo 142 CP's cilíndricos de dimensões 100 mm × 200 mm. Para cada lote de estudo, conforme f_{ck} , tipo de resfriamento e temperatura, eram necessários: 3 CP's para controle de resistência, 1 CP instrumentado com termopar para controle de temperatura interna do concreto e 7 CP's destinados ao ensaio de carbonatação.

Os CP's indicados ao ensaio de carbonatação foram previamente divididos na seção longitudinal em 3 peças (Figura 2) apresentando dimensão final de 100 x 65 mm.

Figura 2 - Preparação de amostra para ensaio de carbonatação acelerada.



2.4. Exposição a altas temperaturas

Após a fabricação dos CP's, esses foram dispostos no Forno Mufla, modelo Linn Elektro Therm, para o aquecimento. Neste trabalho foram estudadas as temperaturas de 200 °C, 500 °C e 700 °C.

A cada lote de amostras, um corpo de prova instrumentado com termopar no seu núcleo era centralizado no forno (Figura 3). Dessa forma foi possível garantir a homogeneidade da temperatura avaliada em todo o volume dos CP's durante o ensaio.

Figura 3 - Posicionamento dos CP's para aquecimento no forno mufla



Para o acompanhamento da evolução das temperaturas, utilizou-se um termopar posicionado no interior do forno (para medição da temperatura dos gases) e um sistema de aquisição de dados da National Instruments, NI cDAQ-9178, acompanhado de um módulo NI 9219 com quatro canais para a leitura dos termopares. Para a leitura e registro dos termopares em tempo real, utilizou-se o *software MegaTemp*.

Na Figura 4 e na Figura 5 estão apresentados os gráficos de desenvolvimento das temperaturas para os CP's instrumentados, em relação aos termopares instalados no interior da mufla. É possível observar que, a partir do momento em que o forno atinge a temperatura esperada, tem-se a oscilação da temperatura no equipamento visando mantê-la constante, enquanto o interior do corpo de prova não atinge a temperatura desejada. Dessa forma, assim que a temperatura é atingida no interior do CP instrumentado o ensaio foi paralisado.

Figura 4 - Gráfico temperatura dos termopares *versus* tempo – 200 °C / 20 MPa

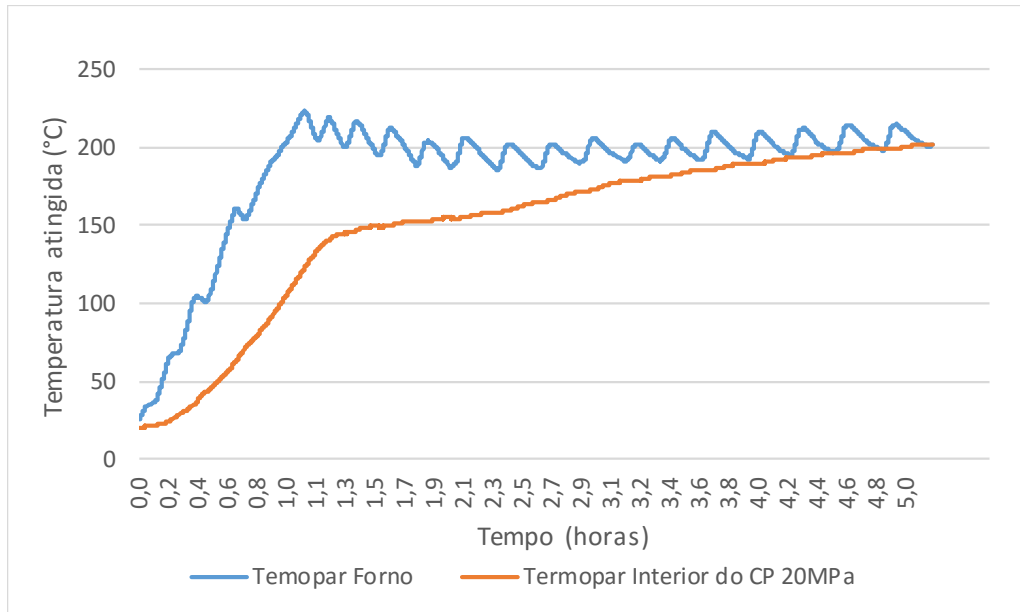
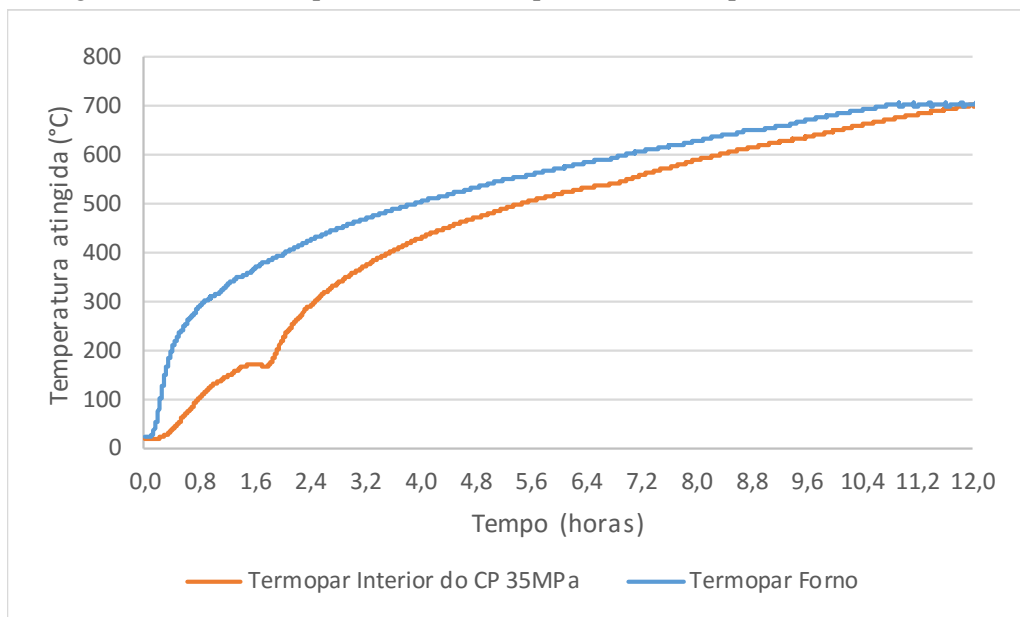


Figura 5 - Gráfico temperatura dos termopares *versus* tempo – 700 °C / 35 MPa



Após a estabilização da temperatura apresentada no interior do CP instrumentado e do forno, iniciou-se o processo de resfriamento do lote em teste. No resfriamento, 10 corpos de prova foram submetidos ao resfriamento rápido durante 10 minutos por jatos de água e o restante da amostra foi submetida ao resfriamento lento durante 24 horas dentro do próprio forno.

2.5. Ensaio de carbonatação acelerado

Após o resfriamento total dos CP's, 24 h depois da retirada do forno, iniciou-se a preparação dos corpos de prova destinados ao ensaio de carbonatação.

Para que fosse exposta somente uma frente para entrada do dióxido de carbono, facilitando o controle e a leitura da frente carbonatada, foram parafinadas uma das bases e a altura das amostras, conforme apresentado na Figura 6. Uma vez preparados, os corpos de prova foram dispostos no interior da câmara de carbonatação.

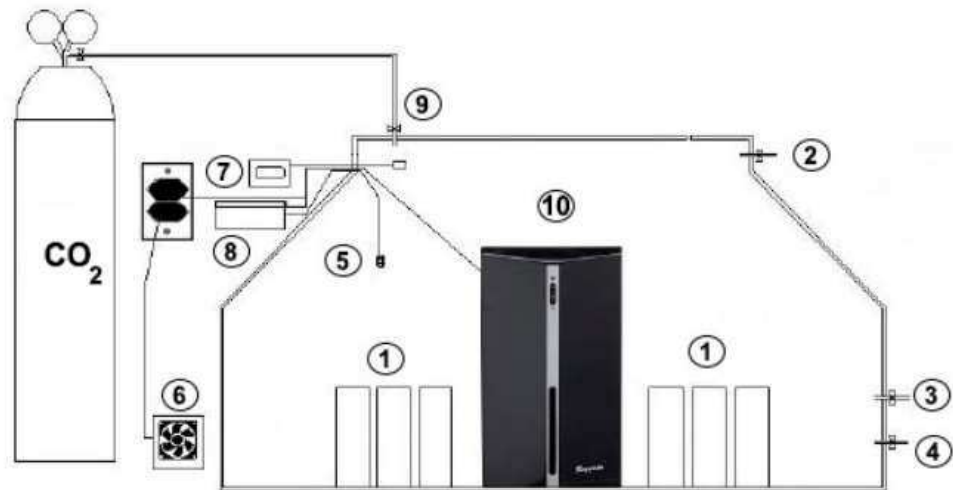
Figura 6 - Corpo de prova parafinado pronto para entrada na câmara.



A câmara utilizada foi desenvolvida no Laboratório de Materiais de Construção na pesquisa de Martins *et al.* (2018). O equipamento conta com sensores de umidade e temperatura, além de um desumidificador, controlados por um sistema *Arduíno*. O sistema garante a umidade entre 65 e 80 % na atmosfera da câmara, como recomendado para realização dos ensaios acelerados de carbonatação. O seu esquema é apresentado na Figura 7. Atualmente, o Laboratório de Materiais de Construção possui duas dessas câmaras de ensaio acelerado de carbonatação (Figura 8).

A saturação de CO₂ da câmara é feita de forma manual, por fluxos intercalados de gás carbônico diários até se garantir 100% de concentração. Essa mesma metodologia de concentração foi utilizada por Kirchheim *et al.* (2015) e Castellote *et al.* (2004). Para fazer a leitura da concentração de dióxido de carbono no interior da câmara foi utilizado o Método de Dois Pontos (M2P). Esse método consiste em utilizar uma solução tampão para verificar, através da diferença de pH, determinadas características ou substâncias presentes em outra solução ou em uma atmosfera, nesse caso o percentual de CO₂ (MARTINS *et al.*, 2018).

Figura 7 - Representação esquemática da câmara de carbonatação.



- 1- Corpos de prova
- 2- Ponto superior de coleta de CO₂
- 3- Ponto inferior de coleta de CO₂
- 4- Saída de fluxo
- 5- Sensor de umidade
- 6- Fonte 12V
- 7- Termo higrômetro
- 8- Arduino
- 9- Entrada de CO₂
- 10- Desumidificador

Fonte: Adaptado de Martins *et al.* (2018).

Figura 8 - Câmaras de carbonatação e instrumentos para medição da concentração de CO₂.



Os CP's preparados, foram submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada por um período de trinta dias, sendo que a cada 3 dias dois corpos de prova eram retirados da câmara e cortados, conforme a Figura 9, para medição do avanço da região carbonatada no concreto.

Figura 9 - Plano de corte dos corpos de prova.



A medida da profundidade carbonatada foi realizada mediante a aspersão de solução de fenolftaleína 1 % em etanol (indicador de pH) e obtida com um paquímetro em três pontos críticos na amostra. Essa solução é incolor em pH inferior a 8,3 e rosa-carmim para valores de pH superiores a 10, podendo apresentar coloração variável de rosa claro a rosa-carmim para valores de pH entre 8 e 10. Conforme Hobbs (1988), quando o pH do concreto está abaixo de 9,5, a despassivação das armaduras se inicia. Portanto, quando a fenolftaleína está rosa claro, o pH dos poros do concreto já está abaixo de 9, de modo que já pode ocorrer a corrosão da armadura. Somente quando a fenolftaleína indica uma coloração rosa-carmim é que o ambiente permanece alcalino (e a passivação é efetiva).

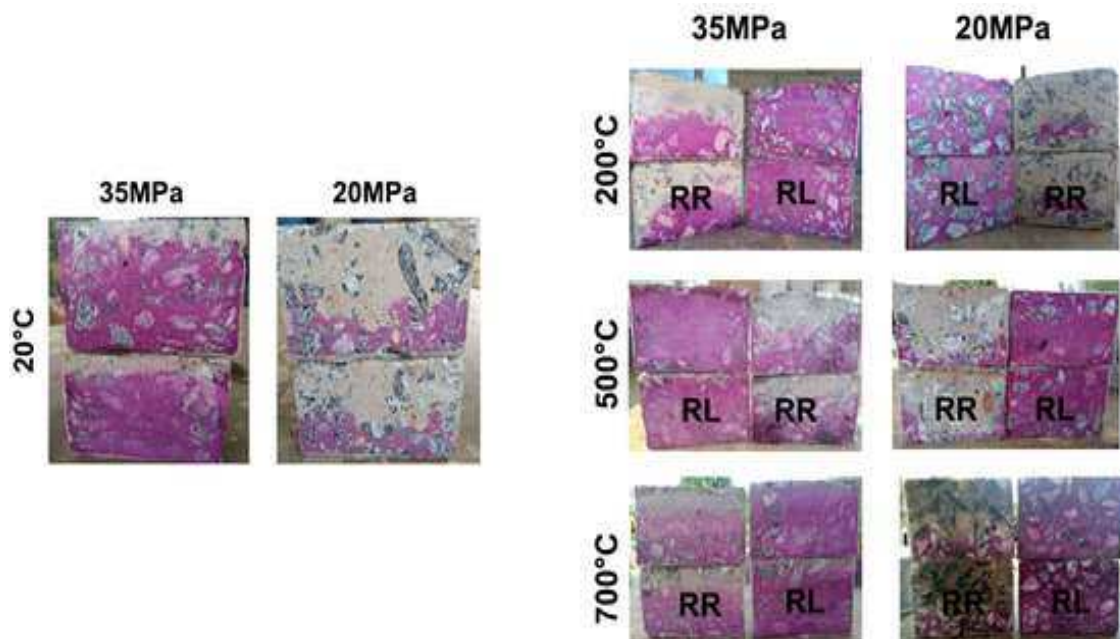
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avanço da carbonatação

Na Figura 10 apresenta-se o avanço da frente de carbonatação após 30 dias de ataque na câmara. Foi possível verificar, para as dosagens de concreto estudadas, um crescimento esperado para o avanço da carbonatação com o aumento da relação água/cimento e, portanto, menor f_{ck} como provável consequência da sua maior porosidade, visualmente observados nos concretos sem aquecimento (20 °C).

Além disso, constatou-se a influência da temperatura de exposição dos CP's propiciando uma carbonatação final maior dos corpos de prova submetidos às altas temperaturas e arrefecidos rapidamente (RR) por jatos de água, comparando-se às amostras que não sofreram aquecimento. Entretanto, os CP's aquecidos e resfriados lentamente (RL), em nenhum dos casos avaliados, apresentaram sinal de início de carbonatação.

Figura 10 - Avanço da frente de carbonatação (30 dias).



Para os casos de resfriamento rápido (RR), os valores médios encontrados para todas as situações a cada 3 dias de exposição na câmara de carbonatação são apresentados na Figura 11 e na Figura 12. Com esses dados, pode-se utilizar as frentes obtidas para a previsão da durabilidade, calculada a partir o modelo matemático de Possan (2010) para os concretos de referência (TR20 e TR35), sem exposição ao fogo.

Figura 11 - Avanço da carbonatação *versus* durabilidade - 20 MPa (RR).

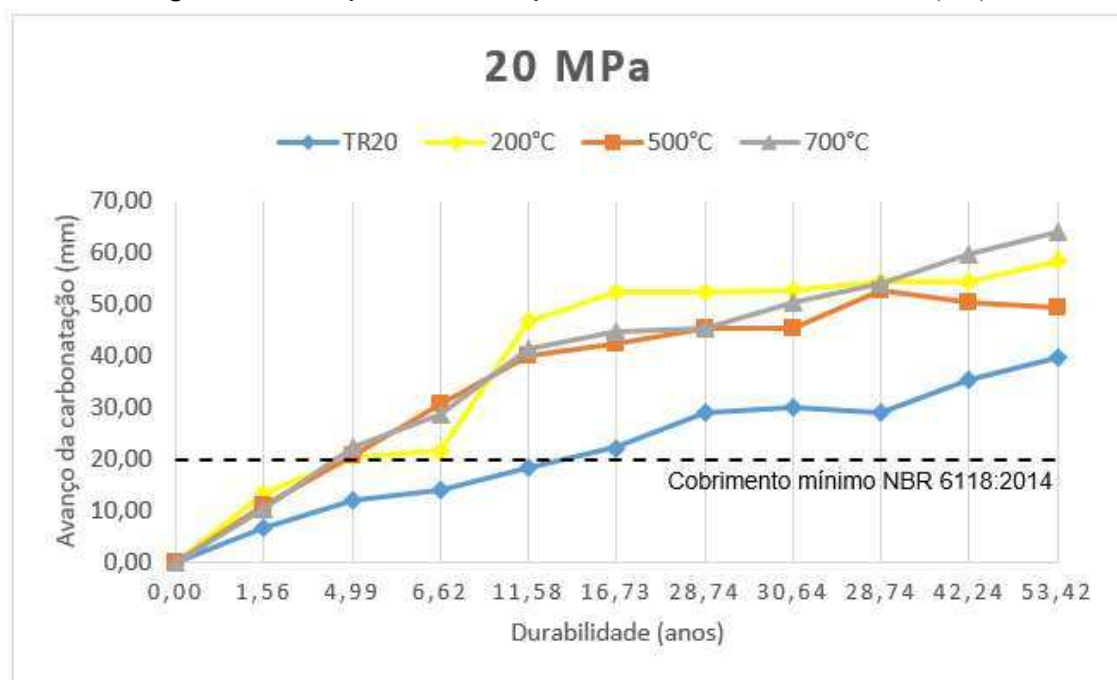
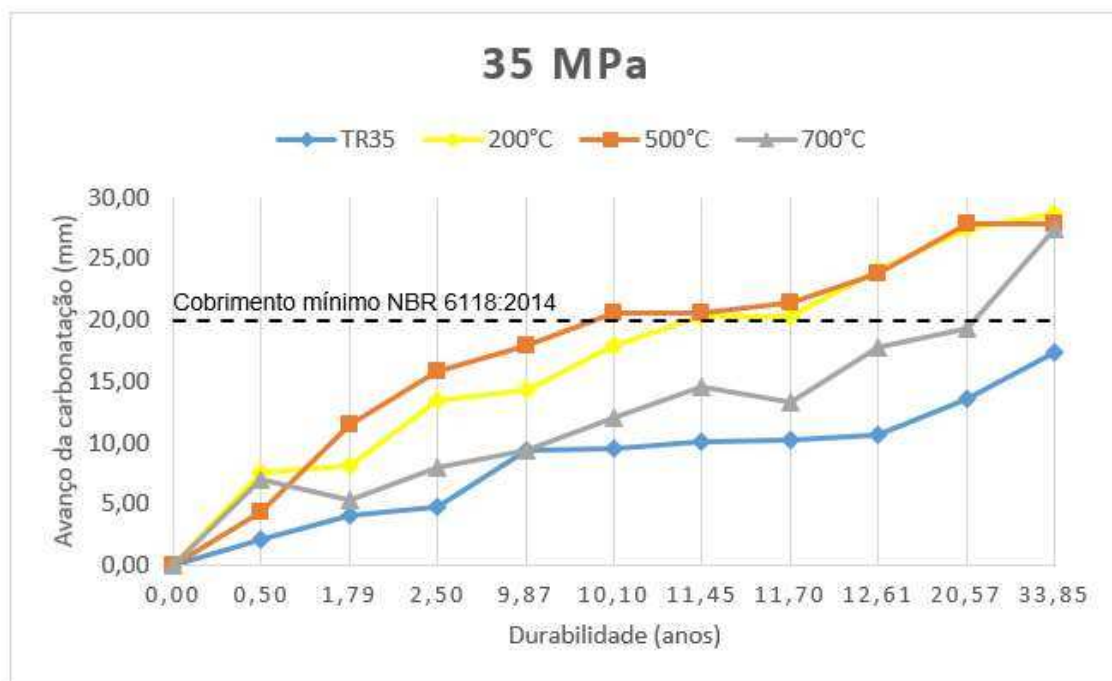


Figura 12 - Avanço da carbonatação *versus* durabilidade - 35 MPa (RR).



Observando os resultados é possível verificar que os concretos expostos às altas temperaturas sofrem grave perda de durabilidade se comparados aos concretos de referência (TR), não expostos ao fogo. Para as amostras de 20 MPa, tem-se para uma mesma idade que os concretos submetidos a incêndio alcançam aproximadamente 50 mm de profundidade carbonatada, enquanto o concreto de referência alcança 28 mm, um avanço 44 % menor que os CP's danificados. Já para as amostras de 35 MPa, essa mesma proporção se mantém em certo ponto: enquanto o concreto TR atinge 15 mm, os concretos sob incêndio apresentam em torno de 27 mm carbonatados.

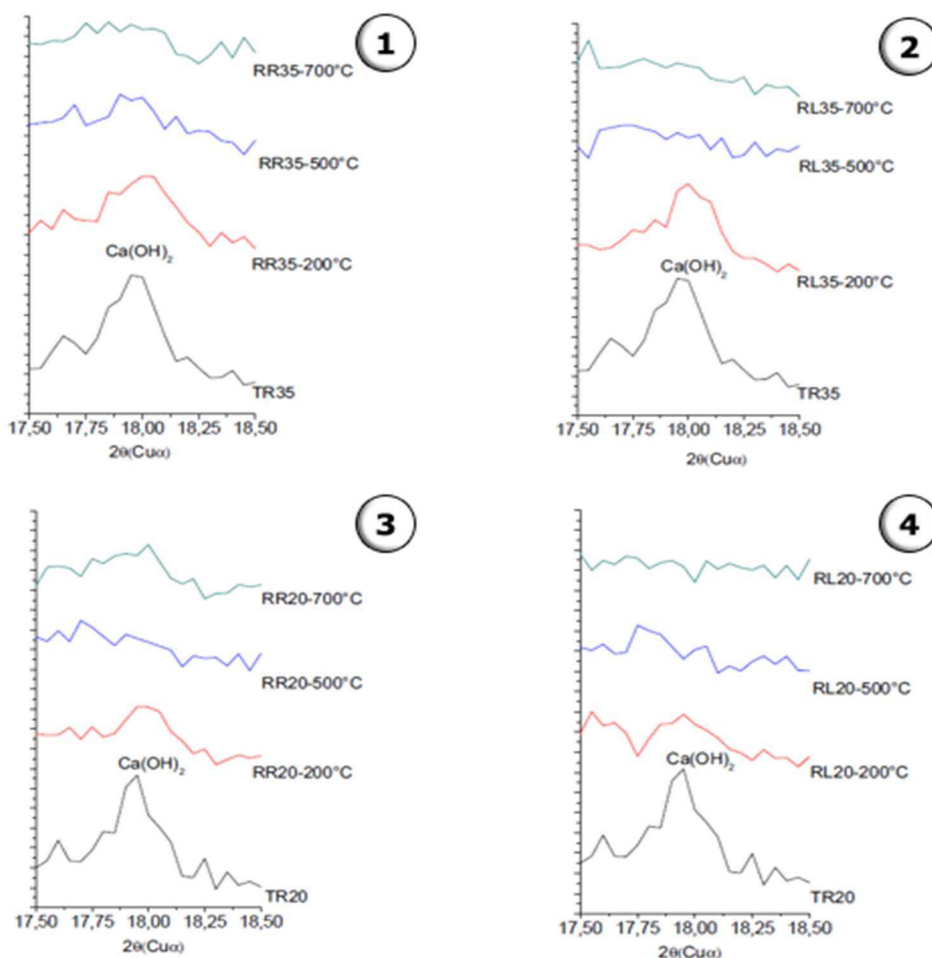
Avaliando as idades atingidas para o cobrimento de 2 cm (mínimo exigido para estruturas pela ABNT NBR 6118:2014), nos casos de 20 MPa têm-se durabilidade de 12 anos para o concreto livre da ação de incêndio, enquanto os concretos aquecidos apresentam grave perda de durabilidade, atingindo aproximadamente 5 anos. Já para os concretos de 35 MPa, a maior profundidade de carbonatação obtida para as amostras intactas é um pouco inferior a 2 cm, correspondendo a 33 anos de vida útil. Porém, os concretos aquecidos a 200 °C e 500 °C apresentam, para essa mesma profundidade, 11 anos de durabilidade. Não obstante, os concretos submetidos a 700 °C apresentaram melhora em relação às demais temperaturas de aquecimento estudadas, com vida útil de 20 anos.

Ao se comparar as temperaturas de incêndio estudadas, para os concretos de f_{ck} igual a 20 MPa, nota-se que a elevação da temperatura não foi um fator desfavorável para o avanço da carbonatação. Entretanto, nos concretos de f_{ck} igual a 35 MPa obtém-se resultados consideravelmente melhores para a maior temperatura de aquecimento estudada, contrastado com as temperaturas de 200 °C e 500 °C. Nesse sentido, realizou-se uma análise de DRX das amostras para avaliação da disposição de Ca(OH)_2 em cada situação (Figura 13).

3.2. Análise por Difração de Raios X (DRX)

Na Figura 13 são apresentadas as análises geradas por DRX, numa faixa característica do composto Ca(OH)_2 , para cada tipo de situação avaliada. Os gráficos 1 e 2 referem-se aos concretos de f_{ck} igual a 35 MPa, enquanto os gráficos 3 e 4 correspondem a f_{ck} igual a 20 MPa. Os gráficos 1 e 3 representam os CP's resfriados rapidamente (RR) e os gráficos 2 e 4 os CP's resfriados lentamente (RL).

Figura 13 - DRX das amostras.

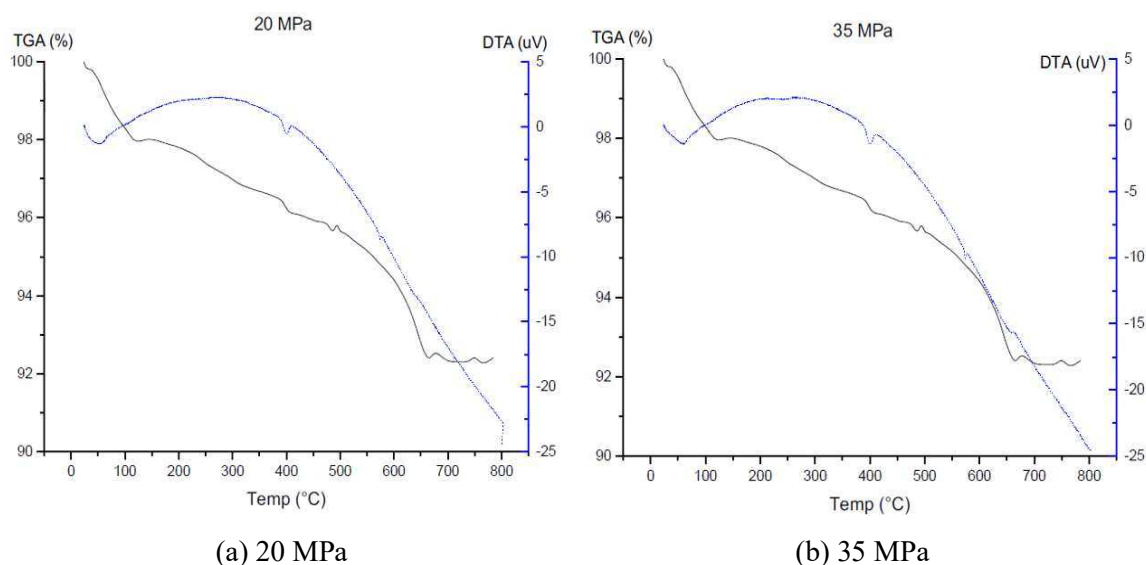


A avaliação em DRX aponta a redução da intensidade de Ca(OH)_2 em todas as amostras, à medida em que as temperaturas se elevam. Esses resultados também foram obtidos por Kim *et al.* (2013), Wang *et al.* (2015) e Peng e Huang (2008) em seus trabalhos. Logo, é possível inferir que a pouca influência da temperatura no avanço da carbonatação tende de ser explicada pela falta de hidróxido de cálcio disponível para associação com CO_2 e formação do carbonato de cálcio (CaCO_3), responsável pela redução do pH do concreto, mesmo em meios mais fissurados e com mais facilidade para entrada do CO_2 .

3.3. Análise térmica

As análises termodiferencial (DTA) e termogravimétrica (TGA) permitem estudar o comportamento térmico de determinada amostra sob uma taxa de aquecimento, isto é, determinar a presença de reações químicas ou fenômenos físicos em função do aumento da temperatura. Os resultados dessas análises podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 - Análises termodiferencial (DTA) e termogravimétrica (TGA).



Os resultados das análises térmicas indicam claramente uma perda de massa devido à desidratação dos produtos de hidratação do concreto em função da exposição às altas temperaturas. Uma perda de massa significativa pode ser identificada entre a temperatura ambiente e 100 °C, correspondente à perda de água livre presente nos poros típicos do concreto.

Nesse sentido, para os casos de resfriamento lento, acredita-se que, com o aquecimento e a perda dessa água livre, houve dificuldade na diluição e penetração do CO₂ nos vazios da amostra. Logo, não foi iniciada a reação de formação do ácido carbônico (H₂CO₃) para a associação posterior ao hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e, conseqüentemente, a redução de pH do concreto, com a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO₃) (CASTELLOTE *et al.*, 2009, BATTAGIN e SILVEIRA, 2018).

Nos casos das amostras submetidas ao resfriamento rápido têm-se, durante o arrefecimento, a reidratação dos poros capilares juntamente com a dilatação e conseqüentemente fissuração abrupta dos CP's. Logo, o ambiente surge ainda mais propício à penetração do CO₂, como foi verificado nos avanços da carbonatação para essas situações.

Entre 100 °C e 400 °C, a perda de massa foi gradual. Acredita-se que essa perda está relacionada ao início da perda da água de constituição do C-S-H. Outra perda de massa rápida ocorreu por volta de 400 °C, sendo associada à decomposição do hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ (CASTELLOTE *et al.*, 2004; ALARCON-RUIZ *et al.*, 2005). Pouco após 500 °C, verifica-se um incremento de massa, provavelmente pelo início do processo de transformação alotrópica do quartzo α em quartzo β, que leva a um aumento de volume de aproximadamente 0,8%, com forte repercussão nas propriedades físicas do agregado (BATTAGIN e SILVEIRA, 2018). Acima de 650 °C, a taxa de perda de massa é desacelerada, e a perda de massa total foi quase insignificante.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se experimentalmente o avanço das frentes de carbonatação em concretos após exposição a temperaturas elevadas, visando observar as prescrições da ABNT NBR 15575:2013 – Desempenho.

Com base nos resultados obtidos concluiu-se que o efeito da elevação da temperatura sobre o avanço da frente de carbonatação no concreto pode comprometer a integridade da estrutura no que diz respeito à durabilidade, de acordo com o tipo de arrefecimento. Nos casos em que a elevação de temperatura é seguida de resfriamento rápido, a reidratação dos poros e a fissuração disponível é um meio garantido de facilitação para a entrada de CO₂ no concreto. Já para os casos de resfriamento lento, não houve indício de

carbonatação, que pode ser resultado da falta de água livre presente nos poros capilares dos concretos, essencial à iniciação da reação para formação do ácido carbônico (H_2CO_3).

A elevação das temperaturas de incêndio, de acordo com as avaliações realizadas, parece não influenciar diretamente no avanço da carbonatação do concreto, uma vez que falta $Ca(OH)_2$ disponível para a formação e precipitação de $CaCO_3$.

Além disso, concretos com maior fator água/cimento e, portanto, menor resistência à compressão e maior porosidade, apresentaram menor durabilidade. Tais concretos devem ser avaliados criteriosamente quanto à situação pós incêndio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALARCON-RUIZ, L.; PLATRET, G.; MASSIEU, E.; EHRLACHER, A. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, v 35. 609–13, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregado miúdo Determinação de massa específica massa específica aparente - NBR NM 52, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregados - Determinação da composição granulométrica - NBR NM 248, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. NBR NM 45, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – NBR 5739, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova – NBR 5738, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. NBR 12655, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 2: Sistemas Estruturais – NBR 15575-2, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – NBR 6118, 2014.

BATTAGIN, A. F; SILVEIRA, A. L. Z. P. Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada. *Concreto e construções* V.89 p.44-48 IBRACON, 2018.

CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; CAMPO, J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 9. p. 1633–1644, 2004.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. *Materials and Structures* 42. 515–525, 2009.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica. 44º Congresso Brasileiro. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2002.

DUPRAT, F.; VU, N.T.; SELLIER, A. Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures. *Construction and Building Materials* 66. p. 597– 605, 2014.

FERNANDES, B; GIL, A. M; BOLINA, F. L; TUTUKIAN, B. F. Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* vol.10 no.4 . p. 838 – 863, 2017.

FREIRE, R. G. K. Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão de armaduras do concreto. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2005.

HOBBS, D. W. Carbonation of concrete containing pfa, *Magazine of Concrete Research*. p. 69–78, 1988.

KIM, K. Y.; YUN, T. S.; PARK, K. P. Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography. *Cement and Concrete Research*, v. 50. p. 34–40, 2013.

KIRCHHEIM, A. P.; RHEINHEIMER, V.; DAL MOLIN, D. C. C. Comparative study of white and ordinary concretes with respect of carbonation and water absorption *Construction and Building Materials* 84. p.320–330, 2015.

LO, T. Y.; LIAO, W.; WONG, C. K.; TANG, W. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. *Construction and Building Materials*, v. 107. p. 299–306, 2016.

MARTINS, R. O. G.; ALVARENGA, R. C. S.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, A. F.; MENDES, B. C.; AZEVEDO, A. R. G. Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. *Construction and Building Materials* 159 . 261–268, 2018.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, São Paulo: IBRACON, 3ed, p. 150 – 156, 2008.

MEMON, A. S; SHAH, S. F. A; KHUSHNOOD, R. A; BALOCH, W. L. Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A Review . *Construction and Building Materials* 199 p. 435–455, 2019.

PAULETTI, C. Estimativa da Carbonatação Natural de Materiais Cimentícios a partir de Ensaio Acelerados e de Modelos de Predição. 238 f. 2009. Toulouse. Tese (Doutorado

em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, 2009.

PENG, G. F; HUANG, Z. S. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 4; p. 593–599, 2008.

POSSAN, E. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. Tese (doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RI, M. D. Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Santa Maria, Santa Maria- RS, 2002.

SANTOS, C. C; RODRIGUES, J. P. C. Experimental testing on the residual mechanical properties of ordinary concretes after fire. In *International Conference on Experimental Mechanics*, Porto, 2012.

WANG, G.; ZHANG, C.; ZHANG, B.; LI, Q.; SHUL, Z. Study on the high-temperature behavior and rehydration characteristics of hardened cement paste. *Fire and Materials*, v. 39, n. 5. p. 741-750, 2015.

ZHU, X; ZI, G; CAO, Z; CHENG, X. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. *Construction and Building Materials*, v.110; p. 369–380, 2016.

ARTIGO 2. ANÁLISE DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PÓS INCÊNDIO POR MEIO DA MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS

Resumo

A durabilidade das edificações vem sendo, cada vez mais, pauta de estudos e experimentações para a construção civil. A maioria dos casos de deterioração das edificações em concreto armado está associada à entrada de agentes agressivos que, por oportunidade e de acordo com a qualidade do concreto aplicado, penetram pelos poros capilares e resultam, por consequência, na corrosão da armadura. As situações de incêndio em edificações também se apresentam como um fator de degradação grave, que de acordo com sua intensidade e tempo de duração podem levar uma estrutura ao colapso parcial ou total, devido às alterações do material nessas condições. Mais ainda, pode promover uma intensa fissuração do concreto durante o processo de aquecimento e resfriamento, o que tem ação direta sobre a durabilidade do concreto. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo desenvolver um programa experimental para avaliação da difusão de íons cloretos e comparar o desempenho de concretos antes e após a exposição a temperaturas elevadas. Foram avaliados corpos de prova com resistências características à compressão de 20 MPa e 35 MPa, submetidos a altas temperaturas (200 °C, 500 °C e 700 °C) e diferentes tipos de resfriamento (rápido e lento). Concluiu-se que o efeito da elevação da temperatura no concreto compromete a durabilidade da estrutura no que diz respeito à difusão de íons cloretos devido à colaboração que a conexão dos poros oferece para a penetração dos agentes agressivos. Além disso, a elevação das temperaturas de incêndio parece não influenciar diretamente o avanço da migração de íons cloretos, visto que os piores resultados de durabilidade foram obtidos para 200 °C.

Palavras-chave: concreto, incêndio, cloretos, durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A previsão precisa do comportamento do concreto em ambientes com cloretos tem sido bastante abordada nos últimos anos (RIBEIRO *et al.*, 2011; ZACCHEI e NOGUEIRA, 2019). Uma enorme variedade de simulações (YOON, 2017; LI *et al.*, 2015) e tratamentos (MEDEIROS *et al.*, 2014) tem sido proposta com o objetivo de prever a penetração de íons cloretos em concretos. A maior parte desses estudos referem-se aos concretos

convencionais ou em substituição. Entretanto, são limitadas as pesquisas que buscam entender o comportamento da durabilidade em concretos danificados pelo fogo.

Em estruturas de concreto a presença de íons cloreto é responsável por causar uma ruptura localizada na camada passivadora e subsequente corrosão nas barras de aço da armadura (RIBEIRO, 2010). Esse processo de corrosão torna-se, portanto, um dos tipos de degradações mais preocupantes à durabilidade de um sistema estrutural.

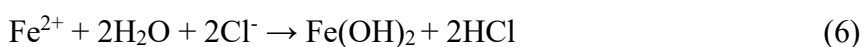
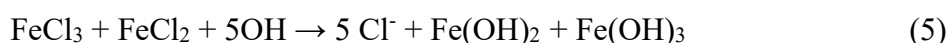
A ABNT NBR 6118:2014 define despassivação por ação de cloretos como a ruptura local da camada de passivação, causada por elevado teor de íon cloreto. A norma ainda recomenda medidas preventivas, como controle de fissuração e o uso de cimento composto com adição de escória ou material pozolânico para os casos suscetíveis a essa exposição, a fim de se obter concretos de baixa permeabilidade, dificultando o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto.

Segundo Wee *et al.* (2000), a contaminação por íons cloreto pode se dar na própria composição do concreto quando esses estão presentes na água, nos agregados e aditivos que contenham CaCl_2 ou ainda provenientes do ambiente. A corrosão provocada pela ação dos íons cloreto é considerada como a principal causa de deterioração das estruturas.

Helene (1986) define que esses íons são especialmente agressivos, pois, diferente do ataque por CO_2 ou soluções ácidas, os cloretos podem danificar as armaduras mesmo em condições de alta alcalinidade da solução dos poros, visto que tais íons não são consumidos no processo de corrosão, e permanecem livres para novas reações. Dessa forma, a presença de pequenas quantidades de íons pode provocar altas taxas de corrosão. Segundo Helene (1993), três teorias explicam o comportamento dos íons cloreto no que diz respeito à corrosão das armaduras no concreto, sendo elas:

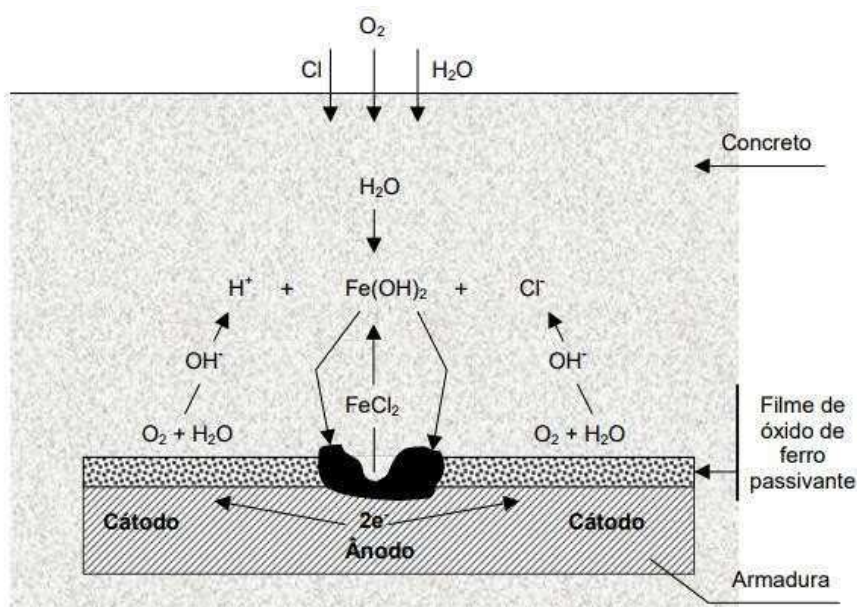
- a) **Teoria do filme óxido:** essa teoria estabelece que o íon cloreto se infiltra nas falhas do filme de óxido passivante com maior facilidade que outros íons em função do seu pequeno raio atômico, permitindo o ataque da armadura;
- b) **Teoria da adsorção:** admite-se que o íon cloreto está absorvido na superfície do metal, competindo com os íons hidroxila e com o oxigênio. Então o cloreto promove hidratação e após, dissolução do ferro em cátions;

c) **Teoria do complexo transitório:** segundo essa teoria, os íons cloreto competem com as hidroxilas (OH⁻) para produção de íons ferrosos pela corrosão. Forma-se, então, um complexo solúvel de cloreto de ferro, transitório. Esse composto difunde-se permitindo a continuação da corrosão. A certa distância do eletrodo, o complexo transitório é rompido havendo precipitação do hidróxido de ferro e o íon cloreto fica livre para transportar mais íons de ferro. Assim o cloreto não é consumido durante a corrosão e por esse motivo atua como catalisador do processo. As Equações (4), (5) e (6) apresentam as reações químicas envolvidas:



Segundo Gentil (1996), a corrosão por íons cloreto é do tipo pite, pois induz a formação de falhas de pequena extensão, mas de grande profundidade nas armaduras. A migração de íons cloretos é impulsionada pelo campo elétrico formado a partir da pilha de corrosão eletroquímica, como se pode observar na Figura 15. A presença desses íons reduz a resistividade elétrica e aumenta a condutividade do eletrólito.

Figura 15 - Esquema de corrosão por pites.



Fonte: Thompson *et al.* (1988)

A corrosão por ação dos íons cloreto tende ainda a gerar microfissuras na camada de cobrimento, devido às forças expansivas da formação da ferrugem, expondo ainda mais a estrutura à entrada desses agentes, a tal ponto de ocorrerem lascamentos e

deslocamentos do concreto que recobre as armaduras (AÏTCIN¹, 2000 *apud* CRAUSS, 2010). O teor de cloretos livres é que irá definir a agressividade desses íons, sendo determinante as características dos cimentos, a estrutura de poros e a natureza química das substâncias agressivas (PAGE *et al.*, 1991).

A relação água/cimento também é um dos fatores que exerce grande influência na penetração de cloretos por determinar características como porosidade, capacidade de absorção e permeabilidade da pasta de cimento hidratada (LOPES, 1999). Quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade e permeabilidade de um concreto e, a princípio, maior será a penetração de cloretos. Peng *et al.* (2019), verificou também a influência do comprimento e diâmetro de fissuras para penetração dos íons cloretos e percebeu que esses parâmetros são significativos para o aumento da difusividade no concreto.

Nesse sentido, nos últimos anos diversas pesquisas (RATTANASHOTINUNT *et al.*, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2011; CASTELLOTE *et al.*, 2001) vêm utilizando ensaios acelerados de migração para avaliar a resistência de concretos à penetração de íons cloreto, além de estudos de modelos numéricos (FENAUX *et al.*, 2019; NEMECEK *et al.*, 2018) para representação do avanço da difusão dos íons em concretos convencionais.

Neste trabalho, tem-se o objetivo de avaliar a durabilidade de concretos danificados pela ação do fogo, com relação à migração de íons cloreto. Dessa forma, será avaliado o tempo de utilização segura da estrutura, através da investigação por ensaio acelerado de migração de íons cloretos em concretos com diferentes dosagens, submetidos a diferentes valores de temperatura máxima e a dois tipos de arrefecimento. Almeja-se, com esta análise experimental, contribuir com dados para avaliação de concretos estruturais em situação pós incêndio e expostos a cloretos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise experimental envolvida neste estudo foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa.

¹ AÏTCIN, Pierre Claude. Concreto de Alto Desempenho. 1ª ed. Pini, São Paulo, 2000.

2.1. Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram produzidos 42 corpos de prova cúbicos de dimensões 100 × 100 mm. Os materiais utilizados e as dosagens determinadas foram semelhantes aos apresentados no Artigo 1.

2.2. Ensaio de migração de íons cloretos

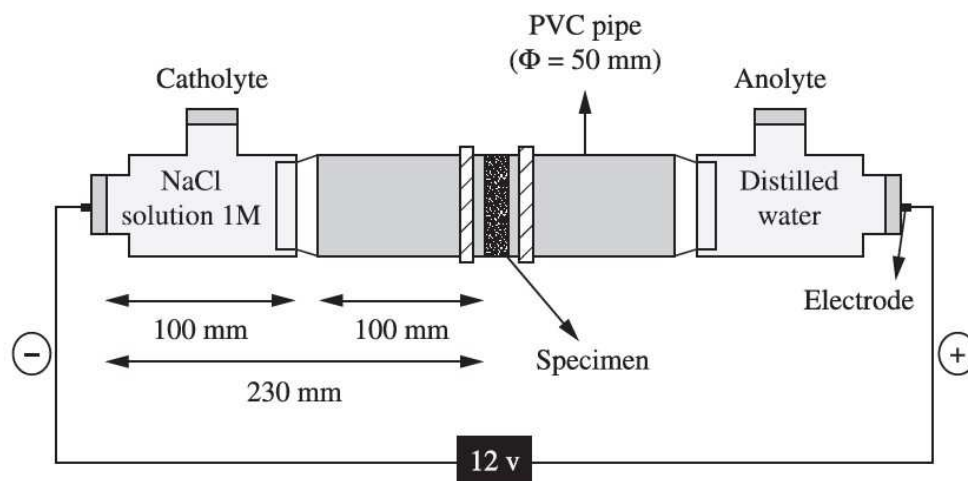
Nesse ensaio avaliou-se concretos de diferentes resistências características (f_{ck} igual a 20 MPa e 35 MPa), sujeitos a diversas temperaturas (200 °C, 500 °C e 700 °C) e tipos resfriamentos (lento ou rápido), além de exemplares mantidos à temperatura ambiente para fins de comparação. Para cada avaliação, 3 CP's foram experimentados, ao total 42 CP's foram produzidos.

O ensaio de exposição às altas temperaturas ocorreu da mesma forma como discorrido no Artigo 1. Após o aquecimento e o resfriamento total das amostras, 24 h depois da retirada do forno, iniciou-se a preparação dos corpos de prova destinados ao ensaio acelerado de migração de íons cloretos. Para isso, amostras com dimensões 50 × 35 mm foram extraídas do centro dos CP's, a fim de reduzir os efeitos da heterogeneidade de moldagem.

Conforme Ribeiro *et al.* (2011), o ensaio foi realizado com base em uma adaptação aos procedimentos propostos pela ASTM C 1202. O ensaio de migração de íons de cloreto tem como princípio a aplicação de uma diferença de potencial de 12 V entre duas células: uma contendo solução a 1 mol de NaCl (catódica) e a outra contendo água destilada (anódica), entre as quais é colocada a amostra do concreto em estudo.

Para a realização do ensaio, foram utilizados um flange de 50 mm, um "T" rosqueável, com uma tampa superior para realizações de medidas e uma lateral, contendo o eletrodo de cobre, lacrados para evitar perda das soluções. As amostras foram colocadas entre duas células, sendo também coladas com adesivo à base de silicone e abraçadeiras, conforme o esquema apresentado na Figura 16. Visando acelerar os ensaios, foram montados no Laboratório de Materiais de Construção da UFV um total de 6 conjuntos de ensaios, conforme a Figura 17.

Figura 16 - Esquema de ensaio acelerado de migração de íons cloretos.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2011).

Figura 17 - Ensaio de migração de íons cloretos (LMC/UFV).

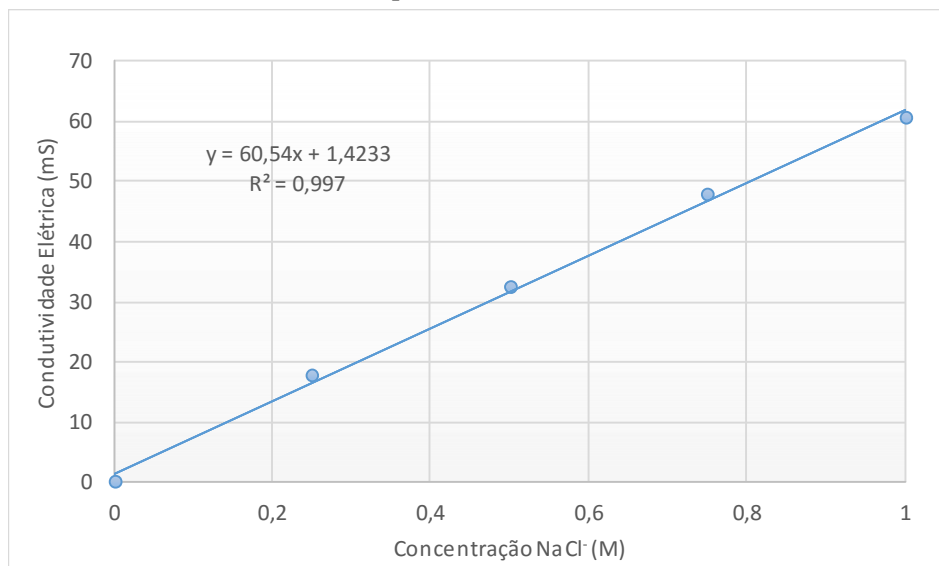


As leituras de condutividade na célula anódica foram realizadas durante 30 dias consecutivos, com auxílio de um condutivímetro de bancada da marca Instruterm, em micro Siemens por centímetro (mS/cm), obtendo-se a evolução da condutividade elétrica da solução.

Inicialmente, há um período em que a quantidade de cloretos que passa para a câmara anódica é insignificante, essa etapa é chamada "time lag" (τ), e pode ser definida como o tempo necessário para que os íons cloreto passem através da amostra de concreto, causando a sua saturação. Após esse período, o fluxo de íons cloreto através da amostra torna-se constante e corresponde ao período de estado estacionário (CASTELLOTE *et al.*, 2001).

Após a obtenção diária dos dados de condutividade das soluções, elaborou-se a equação de correlação entre a concentração de cloretos e a condutividade (Figura 18). A condutividade foi verificada à temperatura de 25 °C (± 2 °C).

Figura 18 - Relação condutividade elétrica *versus* concentração de íons cloretos, obtida experimentalmente.



Em seguida, a partir das concentrações obtidas, conforme Ribeiro (2010), foi realizado o cálculo dos coeficientes de difusão no estado estacionário D_s (ou coeficiente de difusão efetivo, em cm^2/s) através da equação de Nerst-Plank modificada, conforme a Equação (7):

$$D_s = \frac{J_{Cl} RT l}{z F C_{Cl} \gamma \Delta \Phi} \quad (7)$$

sendo:

J_{Cl} = fluxo de íons cloreto ($\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$);

R = constante dos gases ($1,9872 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$);

T = temperatura (K);

l = espessura do corpo de prova (cm);

z = valência dos íons (para cloretos = 1);

F = constante de Faraday ($23063 \text{ cal}/(\text{volt} \cdot \text{eq})$);

C_{Cl} = concentração de íons cloretos na célula catódica (mol/cm^3);

γ = coeficiente de atividade da solução da célula catódica (0,657 para o Cl^-);

$\Delta \Phi$ = média da tensão que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado estacionário (V).

O fluxo de íons cloreto (J_{Cl}) pode ser calculado utilizando a inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos na célula anódica versus tempo, conforme representado pela Equação (8):

$$J_{Cl} = \frac{V}{A} \frac{dC}{dt} \quad (8)$$

sendo:

A = área da seção do corpo de prova exposta (cm^2);

V = volume da célula catódica, com cloretos (cm^3);

dC/dt = inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos versus tempo.

Com o intuito de obter representações mais sensíveis quanto à durabilidade desses materiais, relacionou-se os resultados de penetração de cloretos obtidos com o tempo de vida útil desse material. Para tanto, foi utilizada a segunda Lei da Difusão de Fick (Equações (9) e (10)), da mesma forma com o proposto por Yadav *et al.* (2010) e Medeiros e Helene (2009).

$$PC = 2(z)\sqrt{D_s} \sqrt{t} \quad (9)$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{Cl} - C_0}{C_s - C_0} \quad (10)$$

onde:

D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário (cm^2/ano);

t = tempo de vida útil (anos);

$\text{erf}(z)$ = função Gaussiana de erros;

PC = penetração de cloretos, profundidade em que a concentração de cloretos atinge o limite para que ocorra a despassivação da armadura (cm);

C_0 = concentração inicial de cloretos (nesse caso, 0%);

C_s = concentração de cloretos na superfície (1,8%); e

C_{Cl} = concentração de cloreto em função da profundidade e do tempo (0,4%), em relação à massa de cimento.

Por fim, para avaliar as características das médias dos coeficientes de difusão nas amostras, foi feita uma análise de variância (ANOVA) que consistiu em verificar se existia diferenças significativas entre as médias dos valores de interesse. Quando a análise de variância detectava diferenças significativas entre as médias comparadas, aplicou-se o

Teste de Tukey para apontar quais tratamentos possuíam resultados distintos, considerando um nível de confiança de 95 %.

Complementando a análise estatística, utilizando-se o *Minitab17 Statistical Software* (2016), foi verificado se havia a presença de valores anômalos no conjunto de resultados (*Outliers*). Algumas informações mais aprofundadas relativas à análise estatística realizada são apresentadas no Apêndice A.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avanço da migração de íons cloretos

Com os dados dos ensaios, e utilizando as Equações (7) e (8), foram calculados os fluxos de íons e os coeficientes de difusão para as amostras e para o concreto de referência, sendo as médias dos resultados apresentados na Tabela 6 e comparados na Figura 19 (f_{ck} igual a 20 MPa) e na Figura 20 (f_{ck} igual a 35 MPa).

Tabela 6 - Média dos resultados de fluxo de íons de cloreto (J_{Cl}) e coeficiente de difusão (D_s).

20 MPa			
Descrição	$D_{smédio}$ (cm^2/s)	$J_{clmédio}$ (cm^2/s)	CV (%)
TR20	4,35E-09	5,18E-07	11
RR20-200°C	7,60E-09	1,04E-07	8
RL20-200°C	9,97E-09	1,12E-07	11
RR20-500°C	5,03E-09	5,65E-07	10
RL20-500°C	5,01E-09	5,63E-07	18
RR20-700°C	5,58E-09	6,26E-07	3
RL20-700°C	5,90E-09	6,62E-07	21
35 MPa			
Descrição	$D_{smédio}$ (cm^2/s)	$J_{clmédio}$ (cm^2/s)	CV (%)
TR35	3,33E-09	3,98E-07	22
RR35-200°C	4,41E-09	6,04E-07	17
RL35-200°C	8,48E-09	9,52E-07	18
RR35-500°C	3,31E-09	3,72E-07	21
RL35-500°C	3,84E-09	4,31E-07	18
RR35-700°C	5,12E-09	5,75E-07	22
RL35-700°C	4,84E-09	5,43E-07	16

Conforme Lopes (1999), a redução dos coeficientes de difusão está intimamente relacionada à redução na relação água/cimento. Logo, um concreto com f_{ck} menor possui mais poros capilares disponíveis à penetração de agentes agressivos e, portanto, é esperado um aumento da difusão dos íons. Esse fato pode ser observado entre os resultados para os concretos referenciais (TR20 e TR35).

Observando os resultados dos corpos de provas submetidos às altas temperaturas tem-se que a temperatura foi um fator implicante no aumento da difusão dos íons cloretos em relação aos CP's não aquecidos. Entretanto, entre as temperaturas estudadas não houve um evento linear à medida em que se aumentava a temperatura (Figura 19 e Figura 20).

Figura 19 - Comparação entre as médias dos coeficientes de difusão de íons cloretos para os CP's de f_{ck} igual a 20MPa.

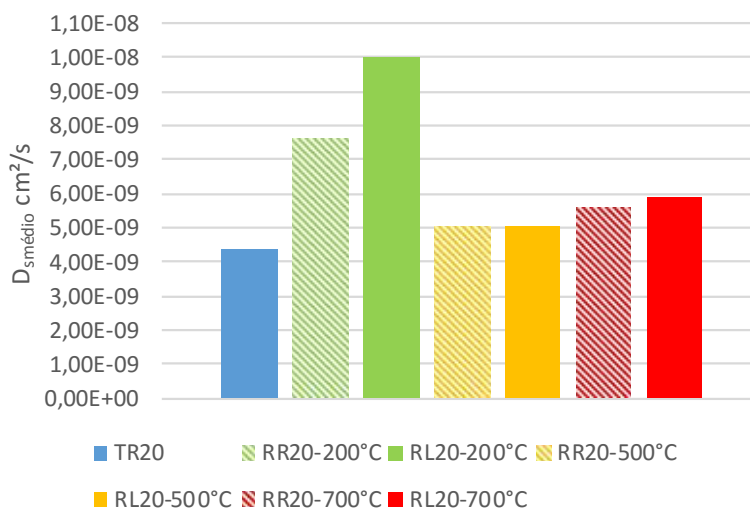
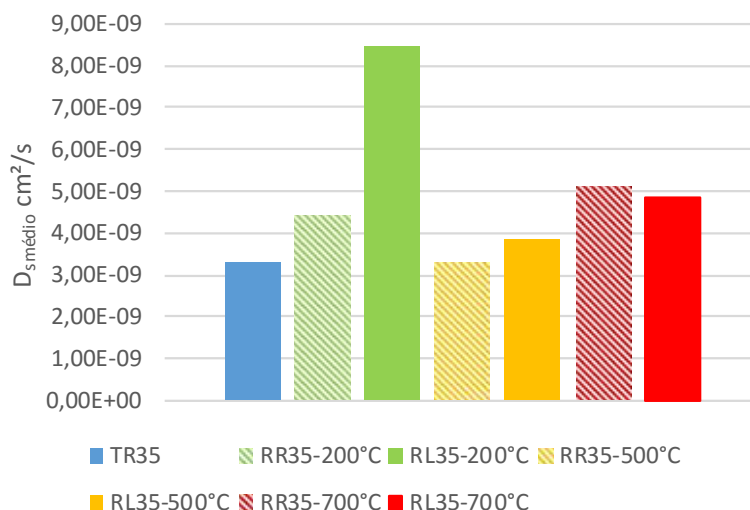


Figura 20 - Comparação entre as médias dos coeficientes de difusão de íons cloretos para os CP's de f_{ck} igual a 35MPa.



Após a obtenção das difusões médias para cada amostra foi realizada uma análise de variância (ANOVA), a fim de verificar se há diferença na distribuição de uma medida entre os grupos e normalidade quanto à distribuição dos dados. Também foi realizado o Teste de Tukey para identificação das diferenças significativas entre as médias em um intervalo de confiança de 95% (Figura 21 e Figura 22).

Figura 21 - Teste de Tukey para amostras com f_{ck} igual a 20 MPa.

Specimens 20MPa			
Tukey Pairwise Comparisons			
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence			
Factor	N	Mean	Grouping
RL20-200°C	3	0,000000	A
RR20-200°C	3	0,000000	B
RL20-700°C	3	0,000000	B C
RR20-700°C	3	0,000000	B C
RR20-500°C	3	0,000000	C
RL20-500°C	3	0,000000	C
TR20	3	0,000000	C

Figura 22 - Teste de Tukey para amostras com f_{ck} igual a 35 MPa.

Specimens 35MPa			
Tukey Pairwise Comparisons			
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence			
Factor	N	Mean	Grouping
RL35-200°C	3	0,000000	A
RR35-700°C	3	0,000000	B
RL35-700°C	3	0,000000	B
RR35-200°C	3	0,000000	B
RL35-500°C	3	0,000000	B
TR35	3	0,000000	B
RR35-500°C	3	0,000000	B

Através dessas análises foi possível concluir que, nos casos de f_{ck} igual a 20 MPa, todas as médias são estatisticamente iguais, excluindo as submetidas à temperatura de 200 °C. Para os casos de 35 MPa, todas as amostras possuem médias estatisticamente iguais, exceto as amostras submetidas ao resfriamento lento e temperatura de 200 °C.

Com base nessas informações, calculou-se a previsão de vida útil em cada um dos casos estudados. Os resultados de durabilidade obtidos estão apresentados na Figura 23 e na Figura 24, com uma profundidade máxima de penetração de cloretos de 4 cm (valor mínimo de cobrimento exigido pelas normas para ambientes agressivos, com presença de cloretos).

Figura 23 - Previsão da durabilidade para f_{ck} igual a 20 MPa.

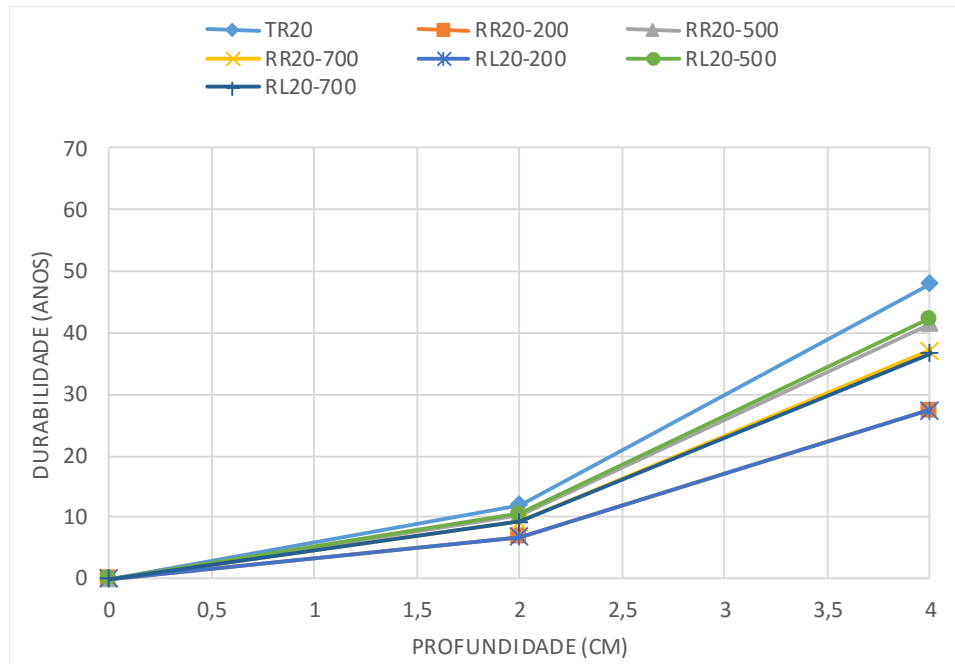
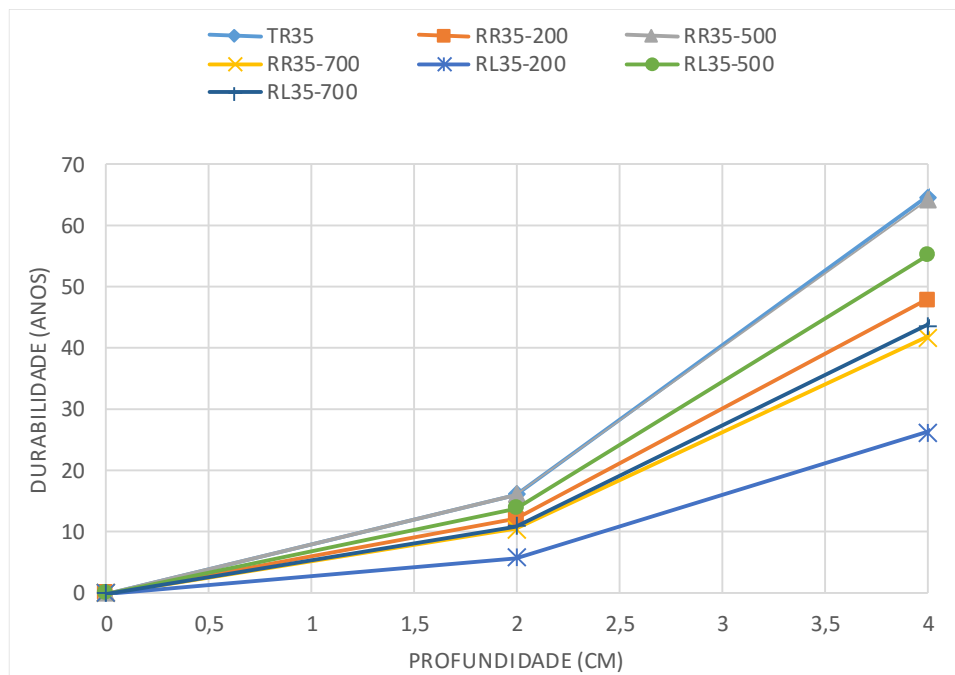


Figura 24 - Previsão da durabilidade para f_{ck} igual a 35 MPa.



Observando os resultados é possível perceber uma perda de durabilidade considerável entre alguns dos tratamentos. Na Figura 23 (amostras com f_{ck} igual a 20 MPa), a condição de arrefecimento não interferiu significativamente nos resultados. Entretanto, o concreto aquecido que apresentou o pior desempenho foram os submetidos à 200 °C. Na Figura 24 (amostras com f_{ck} igual a 35 MPa), há uma diferença a ser considerada entre os tipos resfriamento. Todavia, assim como para as amostras de 20 MPa, a maior degradação verificada também acontece durante o resfriamento lento a 200 °C.

3.2. Análise da microestrutura (MEV)

Na Figura 25 e na Figura 26 são apresentadas as imagens da microestrutura dos concretos em algumas das situações estudadas, obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). As figuras denominadas “a” possuem amplificação de 2500x e as “b” de 3000x. Os destaques apresentados nas formas retangulares referem-se aos exemplos de fissuras localizadas e as áreas circulares apontam poros aparentes na amostra.

Figura 25 - Micrografias do concreto 20 MPa / 200 °C / resfriamento lento (RL).

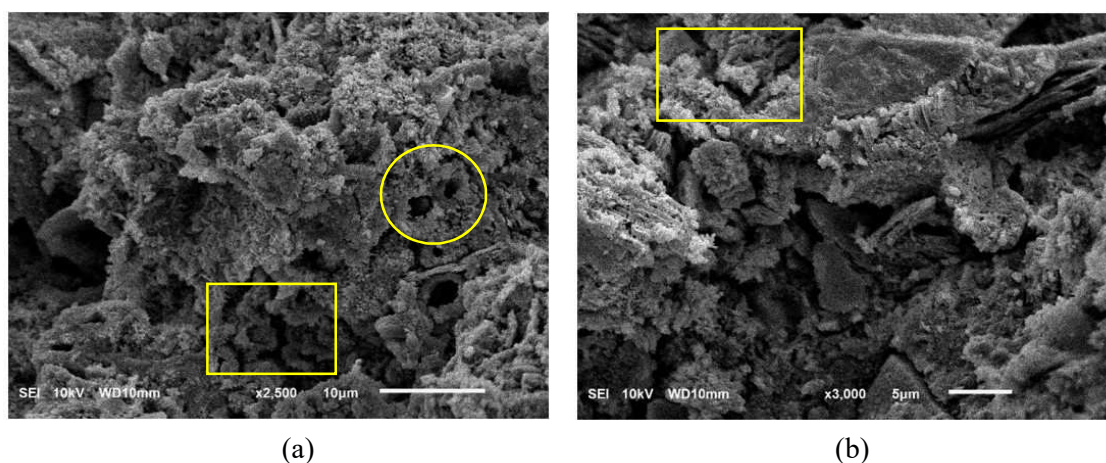
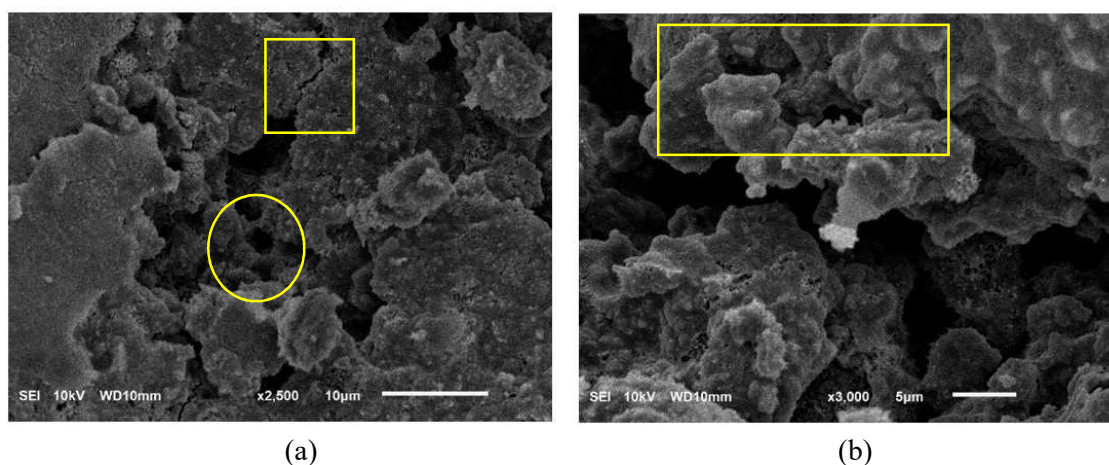


Figura 26 - Micrografias do concreto 20MPa / 200 °C / resfriamento rápido (RR).



Pelas imagens pode-se perceber poros e fissuras bem definidos, sendo que a amostra submetida ao resfriamento lento possui cristais com morfologia mais fragmentadas, enquanto as amostras que passaram por resfriamento rápido com jatos de água exibem uma formação mais compacta.

Na Figura 27 e na Figura 28 apresentam-se algumas amostras submetidas à 500 °C, com resfriamento lento e rápido, respectivamente. Pelas imagens é possível perceber poros e fissuras menores, comparado às amostras de 200 °C. Há presença de muitos cristais de quartzo fragmentados nos dois tipos de resfriamento, o que sugere a transformação do quartzo α para β nessa faixa de aquecimento, como foi visto na análise térmica retratada no item 3.3 do Artigo 1. Além disso, a imagem “a” da Figura 27, submetida ao resfriamento lento, apresenta uma formação típica de etringita.

Figura 27 - Micrografias do concreto 20 MPa / 500 °C / resfriamento lento (RL).

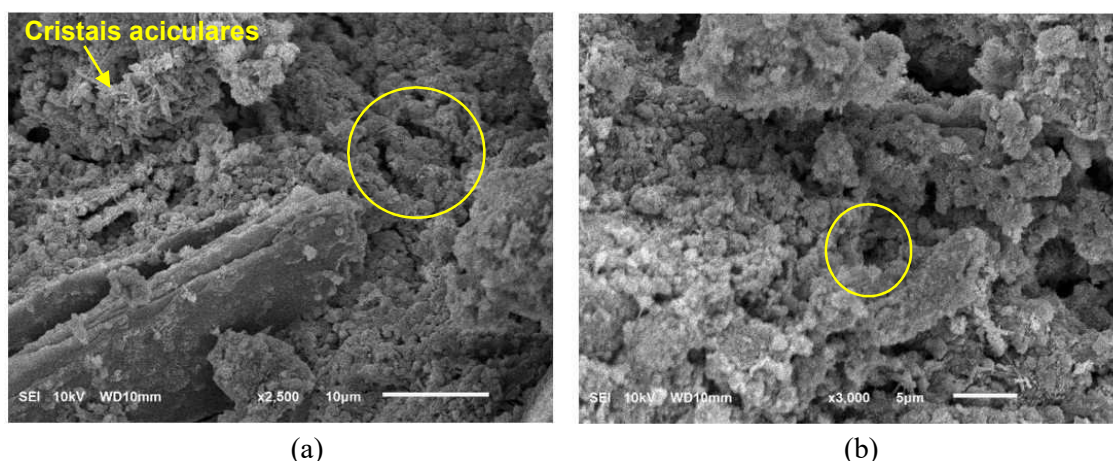
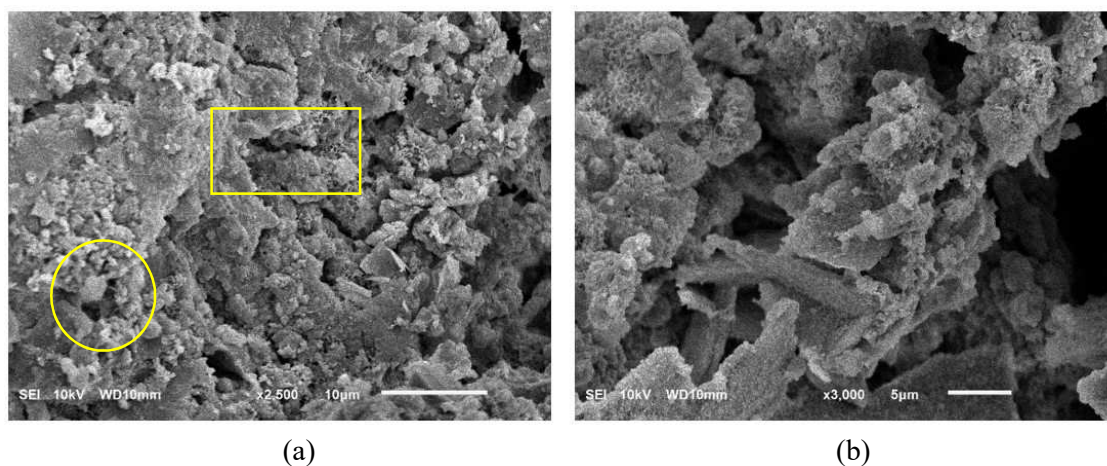


Figura 28 - Micrografias do concreto 20 MPa / 500 °C / resfriamento rápido (RR).



Da Figura 29 até a Figura 31 apresentam-se imagens referentes às temperaturas de 700 °C, onde pode-se observar a presença de muitos cristais aciculares típicos de etringita, além de poros e fissuras. Essa mesma situação foi verificada nos experimentos de Sousa (2009). No concreto, os poros formam uma rede conectada facilitadora no processo de transporte das substâncias agressivas para o seu interior. Logo, a formação

desses cristais pode estar comprometendo a estrutura dos poros, reduzindo a interconexão entre os vazios capilares dos CP's, como pode ser observado na Figura 31.

Figura 29 - Micrografias do concreto 35 MPa / 700 °C / resfriamento lento (RL).

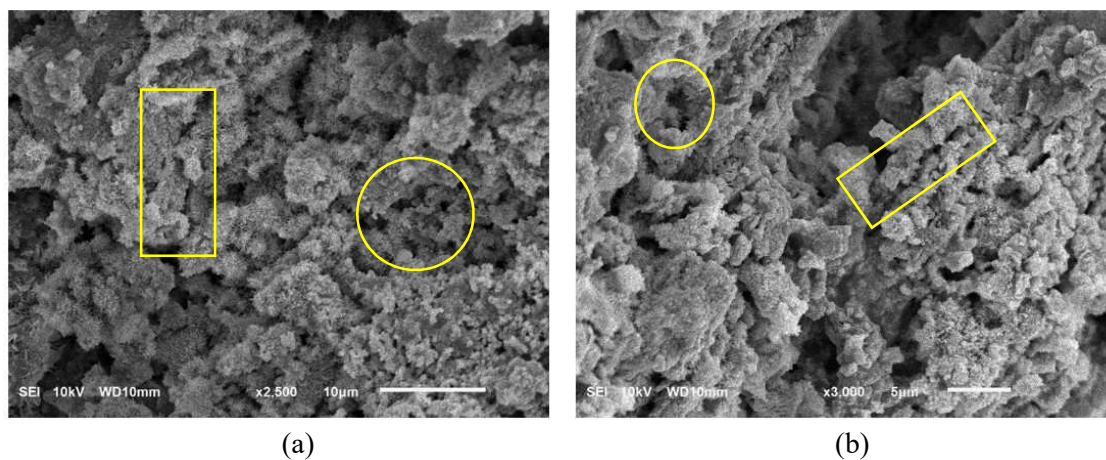


Figura 30 - Micrografias do concreto 35 MPa / 700 °C / resfriamento rápido (RR).

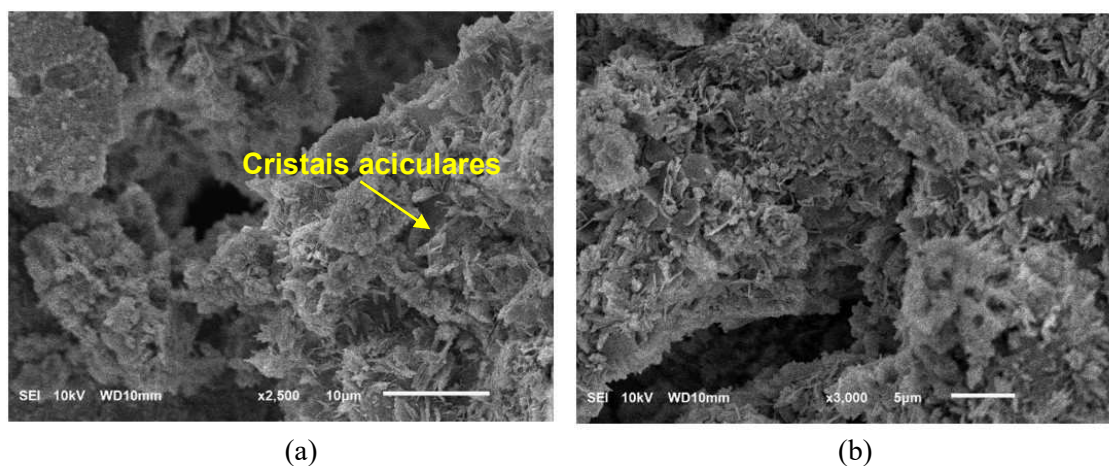
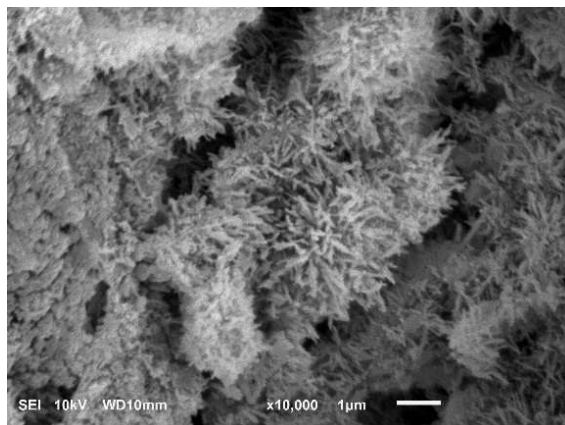


Figura 31 - Micrografias do concreto 35 MPa / 700 °C / resfriamento rápido (RR), com ampliação de 10000x.



4. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se experimentalmente a difusão de íons cloretos e, por consequência, a durabilidade residual de amostras, tendo em vista as prescrições da ABNT NBR 15575:2013 – Desempenho.

Com base nos resultados obtidos concluiu-se que o efeito da elevação da temperatura sobre a difusão de íons cloretos compromete a integridade da estrutura no que diz respeito à durabilidade, principalmente nos casos em que a elevação de temperatura é seguida de resfriamento lento, pois a conexão dos poros parece colaborar para a penetração desses agentes agressivos.

A elevação das temperaturas de incêndio de acordo com as avaliações realizadas, parecem não influenciar diretamente o avanço da migração por íons cloretos, uma vez que os piores resultados de durabilidade foram alcançados para a temperatura de exposição de 200 °C.

Para 700 °C, foi observado o surgimento de etringita, o que pode dificultar a entrada dos íons, por se apresentarem bloqueando poros e fissuras. A 500 °C também foi possível reconhecer algumas formações de cristais aciculares. Adicionalmente, é nessa faixa de temperatura que ocorre o processo de transformação cristalina do quartzo α em β , o que causa expansão do material.

Por fim, foi notório perceber a influência do fator água/cimento para a difusão dos íons cloreto. Quanto menor a resistência e maior a porosidade do concreto, menor também é a durabilidade, nos casos de ataque por cloretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration: ASTM C 1202. Philadelphia, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 2: Sistemas Estruturais – NBR 15575-2, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – NBR 6118, 2014.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. *Cement and Concrete Research*, v.31, n. 10, p. 1411–1420, 2001.

CRAUSS, C.; Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2010.

FENAUX, M.; REYES, E; GÁLVEZ, J. C.; MORAGUES, A. Modelling the transport of chloride and other ions in cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, v.97, p. 33 –42, 2019.

GENTIL, V. Corrosão. 3ª ed. LTC, Rio de Janeiro, 1996.

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

HELENE, P. R. L. Corrosão em Armaduras para Concreto Armado. Pini, São Paulo, 1986.

LI, L. Y.; EASTERBROOK, D.; XIA, J; JIN, W. Numerical simulation of chloride penetration in concrete in rapid chloride migration tests. *Cement and Concrete Composites* 63, p. 113-121, 2015.

LOPES, A. N. M. Avaliação Comparativa de Concretos com e sem Sílica Ativa para Resistências entre 50 e 60 MPa. 170p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 1999.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Construction and Building Materials*, v.23, n. 3, p. 1476–1484, 2009.

MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.; RICHTER, K.; SOUZA, W. B.; KLEIN, N. S. Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 8, n. 2, p. 54-63, 2014.

MINITAB, INC. Software Minitab 17.3.0. United States, 2016.

NEMECEK, J.; KRUIS, J.; KOUDELKA, T.; KREJČÍ, T. Simulation of chloride migration in reinforced concrete. *Applied Mathematics and Computation*. v.319, p.575–585, 2018.

PAGE, C. L.; LAMBERT, P.; VASSIE, P. R. W. Investigations of reinforcement corrosion.1. The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete. *Materials and Structures*, v.24, p.243-252, 1991.

PENG, J; HU, S.; ZHANG, J.; CAI, C. S.; LI, L. Y. Influence of cracks on chloride diffusivity in concrete: A five-phase mesoscale model approach. *Construction and Building Materials*. v.197, p. 587-596, 2019.

RATTANASHOTINUNT, C.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHEEWAKET, T.; CHINDAPRASIRT, P. Investigation on the strength, chloride migration, and water permeability of eco-friendly concretes from industrial by-product materials. *Journal of Cleaner Production* v. 172, p. 1691- 1698, 2018.

RIBEIRO, D. V.; Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado. 2010. 222f. (Tese de doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHAB, J. A.; MORELLIA, M. R. Chloride Diffusivity in Red Mud-Ordinary Portland Cement Concrete Determined by Migration Tests. *Materials Research*. 14(2): 227-234, 2011.

SOUSA, M. M. Estudo experimental do comportamento mecânico e da microestrutura de um concreto convencional após simulação das condições de incêndio, Belo Horizonte, Thesis (Master) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

THOMPSON, N. G.; LAWSON, K. M.; BEAVERS, J. A.; Monitoring Cathodically Protected Steel in Concrete Structures with Electrochemical Impedance Techniques. *Corrosion*, v. 44(8), p. 581-588, 1988.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S.; Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) Results for concrete containing mineral admixtures. *ACI Materials Journal*, v.97, n.2, p.221-232, 2000.

YADAV, V. S.; PRASAD, M.; KHAN, J.; AMRITPHALE, S. S.; SINGH, M.; RAJU, C. B. Sequestration of carbon dioxide (CO₂) using red mud. *Journal of Hazardous Materials*, v. 176, n. 1-3, p. 1044–1050, 2010.

YOON, S. Simulation of Chloride Ingress through Surface-Coated Concrete during Migration Test Using Finite-Difference and Finite-Element Method. *International Journal of Polymer Science*, 2017.

ZACCHEI, E.; NOGUEIRA, C. G. Chloride diffusion assessment in RC structures considering the stress-strain state effects and crack width influences. *Construction and Building Materials*, v.201, p. 100–109, 2019.

CONCLUSÕES GERAIS

1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho investigou-se o potencial de degradação de concretos em situação após incêndio, no que tange à durabilidade.

As principais conclusões referentes aos ensaios de carbonatação foram:

- O efeito da elevação da temperatura sobre o avanço da frente de carbonatação no concreto (reduzindo a durabilidade) tem o potencial de comprometer a integridade da estrutura nos casos em que ocorrer resfriamento rápido após o incêndio.
- Nos casos em que a elevação de temperatura é seguida de resfriamento rápido, ocorre a reidratação dos poros capilares e a fissuração abrupta. Essas condições facilitam a entrada de CO_2 e o consequente avanço da frente de carbonatação.
- A elevação das temperaturas de incêndio, de acordo com as avaliações realizadas, parece não influenciar diretamente no avanço da carbonatação do concreto, uma vez que a falta de Ca(OH)_2 disponível impossibilita a formação e precipitação de CaCO_3 .
- Concretos com maior fator água/cimento e, portanto, menor resistência à compressão e maior porosidade apresentaram maiores avanços na frente de carbonatação, logo, menor durabilidade.

No que se refere à migração de íons cloretos, com base nos resultados experimentais obtidos, concluiu-se que:

- O efeito de exposição do concreto a altas temperaturas sobre a difusão de íons cloretos se manifesta comprometendo a vida útil da estrutura, principalmente nos casos em que a elevação de temperatura é seguida de resfriamento lento. Nesses casos, aparentemente há maior conexão entre os poros, de acordo com as análises microscópicas e termogravimétricas, o que pode colaborar para a penetração desses agentes agressivos.

- O aumento da temperatura de incêndio parece não influenciar diretamente a migração de íons cloretos no concreto, uma vez que as amostras submetidas a 200 °C apresentaram os piores resultados.
- Concretos com maior fator água/cimento são mais suscetíveis a difusão de íons cloretos e, portanto, apresentaram menor durabilidade.

2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de estimular e orientar os trabalhos futuros sobre a carbonatação e migração de íons cloretos para concretos em situação de pós incêndio, pode-se sugerir:

- Verificar a influência em temperaturas mais altas e/ou em intervalos menores de análises, visto que o presente trabalho se concentrou nas temperaturas de 200 °C, 500 °C e 700 °C.
- Avaliar a influência da reidratação após o resfriamento dos concretos expostos a altas temperaturas na durabilidade do material.
- Averiguar a influência da utilização de outros tipos de cimentos e materiais construtivos.
- Investigar as consequências físicas e químicas para concretos submetidos inicialmente a carbonatação e posteriormente às altas temperaturas.

APÊNDICE A – TESTE GRUBB'S (OUTLIERS) E ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA) RELATIVOS AOS ENSAIOS DE MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS

Specimens 20 MPa

Outlier Test

Grubbs' Test

Significance level $\alpha = 0,05$

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	G	P
TR20	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,02	0,922
RR20-200 °C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,14	0,309
RL20-200 °C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,14	0,310
RR20-500 °C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,15	0,055
RL20-500 °C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,13	0,415
RR20-700 °C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,14	0,310
RL20-700 °C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,04	0,863

* NOTE * No outlier at the 5% level of significance

ANOVA

RESUMO 20MPa

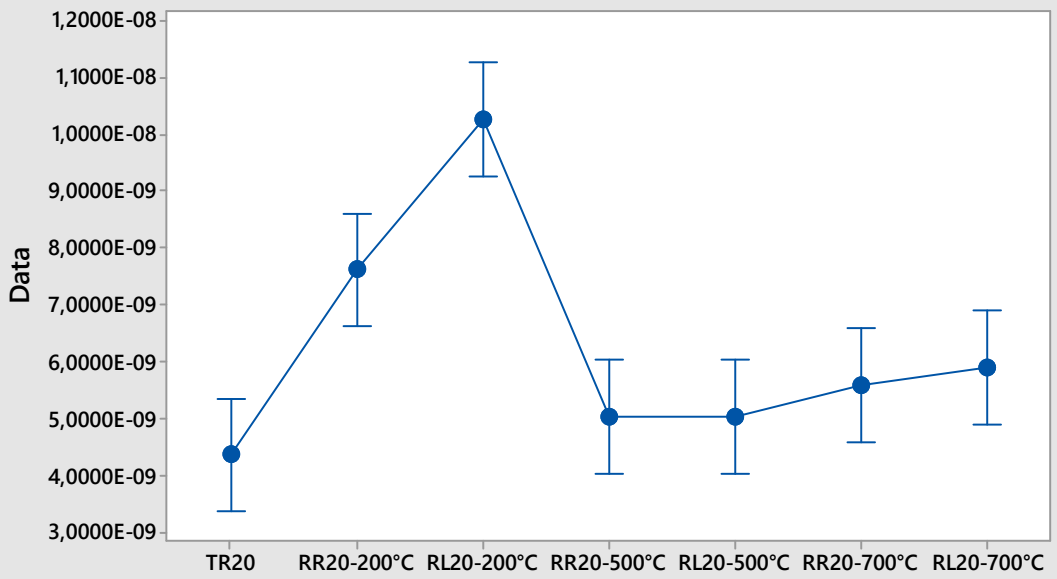
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RL20-200°C	3	3,073E-08	1,02444E-08	1,251E-18
RR20-500°C	3	1,509E-08	5,02999E-09	2,51E-19
RL20-500°C	3	1,504E-08	5,01377E-09	7,855E-19
RR20-700°C	3	1,674E-08	5,57896E-09	2,568E-20
RL20-700°C	3	1,77E-08	5,89908E-09	1,587E-18

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,848E-17	4	1,46189E-17	18,74265	0,0001222	3,4780497
Dentro dos grupos	7,8E-18	10	7,79981E-19			
Total	6,628E-17	14				

Interval Plot of specimens 20MPa

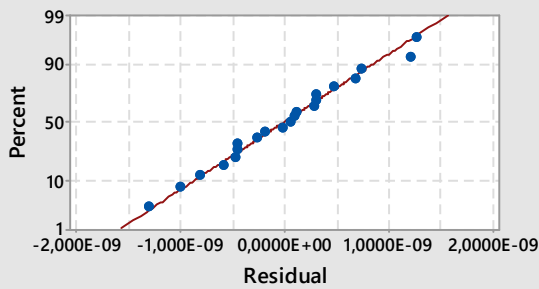
95% CI for the Mean



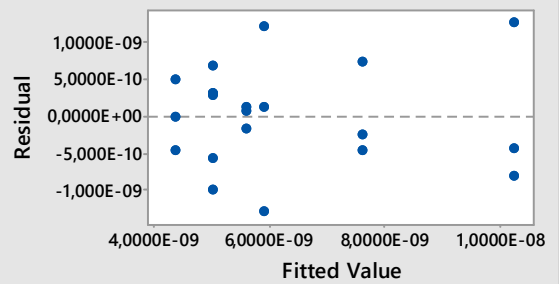
The pooled standard deviation was used to calculate the intervals.

Residual Plots for TR20; RR20-200°C; RL20-200°C; RR20-500°C; RL20-500°C; RR20-700°C; RL20-700°C

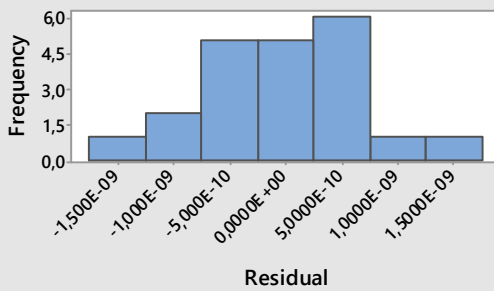
Normal Probability Plot



Versus Fits



Histogram



Specimens 35 MPa

Outlier Test

Grubbs' Test

Significance level $\alpha = 0,05$

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	G	P
TR35	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,15	0,077
RR35-200°C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,04	0,849
RL35-200°C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,10	0,569
RR35-500°C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,00	0,992
RL35-500°C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,13	0,367
RR35-700°C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,15	0,059
RL35-700°C	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,13	0,378

* NOTE * No outlier at the 5% level of significance

ANOVA

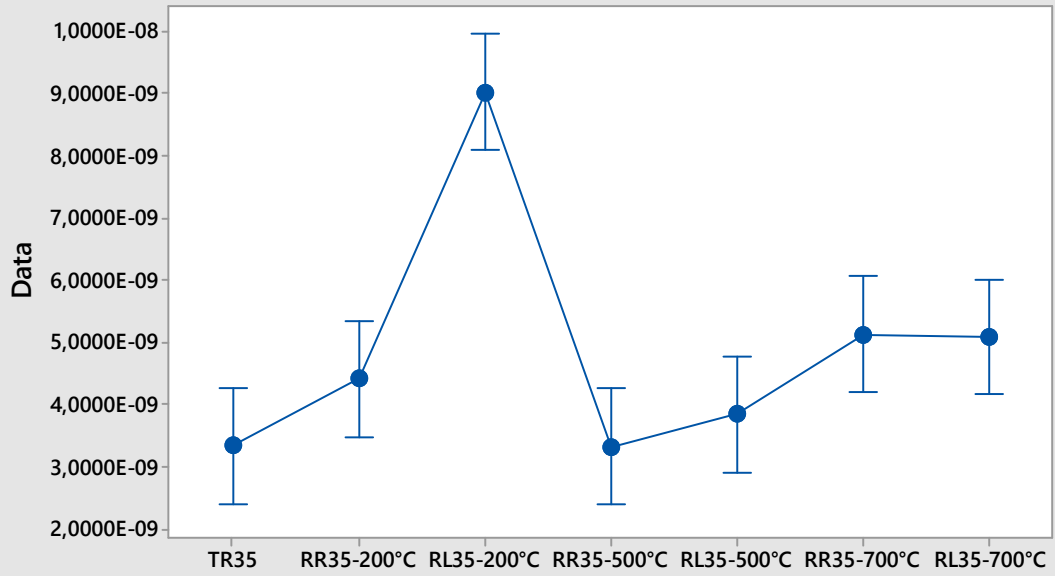
RESUMO 35 MPa

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
TR35	3	1,002E-08	3,33851E-09	5,62E-19
RR35-200°C	3	1,324E-08	4,41256E-09	5,306E-19
RL35-200°C	3	2,709E-08	9,02972E-09	9,297E-20
RR35-500°C	3	9,949E-09	3,31623E-09	4,714E-19
RL35-500°C	3	1,151E-08	3,83748E-09	4,83E-19
RR35-700°C	3	1,537E-08	5,12459E-09	1,282E-18
RL35-700°C	3	1,526E-08	5,08532E-09	5,718E-19

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7,035E-17	6	1,17245E-17	20,550808	3,422E-06	2,847726
Dentro dos grupos	7,987E-18	14	5,70514E-19			
Total	7,833E-17	20				

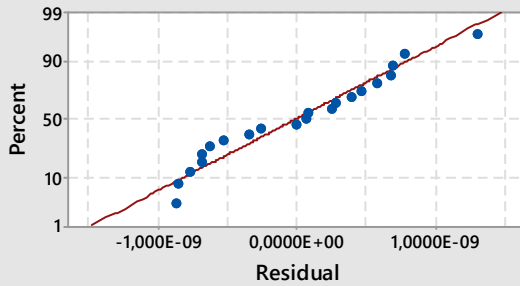
Interval Plot of specimens 35MPa. 95% CI for the Mean



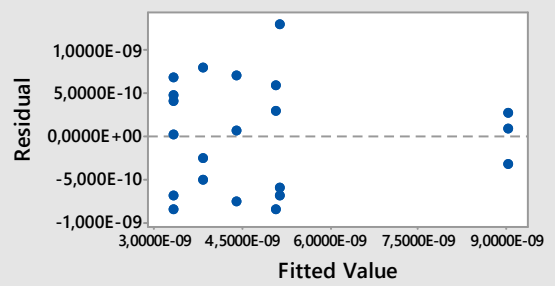
The pooled standard deviation was used to calculate the intervals.

Residual Plots for TR35; RR35-200°C; RL35-200°C; RR35-500°C; RL35-500°C; RR35-700°C; RL35-700°C

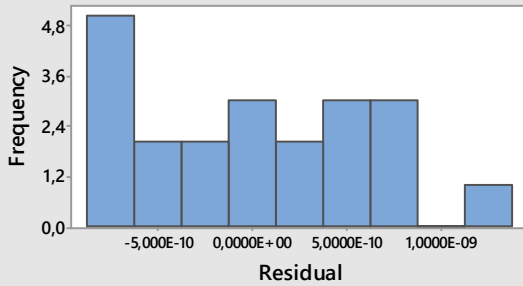
Normal Probability Plot



Versus Fits



Histogram



APÊNDICE B – SKETCH UTILIZADO PARA LEITURA DE PH ATRAVÉS DE SISTEMA ARDUINO

```
#include <LiquidCrystal.h>

int PH = 5;
float valores[20];
int temp;

LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); //Instanciar a tela LCD

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Inicia comunicação serial
  lcd.begin(8, 2);

  //Mensagem de inicialização no LCD
  lcd.setCursor( 0, 0);
  lcd.print("pHmetro");
  lcd.setCursor( 0, 1);
  lcd.print("LMC/UFV");

  delay(3000);
  lcd.clear();
}

void loop() {
  //salva 10 medições
  for(int i = 0; i < 20; i++) {
    valores[i] = analogRead(PH);
    delay(50);
  }

  //ordena os valores
  for(int i=0;i<19;i++) {
    for(int j=i+1;j<20;j++) {
      if(valores[i] > valores[j]) {
        temp = valores[i];
        valores[i] = valores[j];
        valores[j] = temp;
      }
    }
  }

  float soma = 0;
  float media = 0;
  float var = 0;
  for(int i = 2; i < 18; i++) {
    soma = soma + valores[i];
  }

  media = soma/16;
  float valorCorrigido = media*5/1024; //Potencial

  //Esta equação deve ser calibrada diariamente
  float phValue = -5.7692 * valorCorrigido + 21.25;

  Serial.print("VALOR DO PH: ");
  Serial.println(phValue);

  delay(50);

  lcd.clear();
  lcd.setCursor( 0, 0);
  lcd.print(" pH ");
  lcd.setCursor( 0, 1);
  lcd.print(phValue, 2);
  delay(600);
}
```