

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO

ANA CAROLINA RACHADEL

**REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE MATRIZES CIMENTÍCIAS
CARBONATADAS: INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA DENSIDADE DE
CORRENTE ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2021

ANA CAROLINA RACHADEL

**REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE MATRIZES CIMENTÍCIAS
CARBONATADAS: INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA DENSIDADE DE
CORRENTE ELÉTRICA**

**Electrochemical realkalisation of carbonated cementitious matrix:
influence of time and current density.**

Dissertação apresentada como requisito à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil, do Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba



ANA CAROLINA RACHADEL

**REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE MATRIZES CIMENTÍCIAS CARBONATADAS:
INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA DENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 15 de Março de 2021

Prof. Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Arthur Medeiros, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Rodrigo Cezar Kanning, Doutorado - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (Ifpr)

AGRADECIMENTOS

Uma página nunca será suficiente para expressar a imensa gratidão que tenho por todas as pessoas que até agora passaram por minha vida e que, de alguma maneira, me ensinaram algo que me ajudou a chegar até este momento.

Agradeço aos meus pais, Paulo e Andrea, que se dedicam a vida inteira aos meus cuidados e minha felicidade e estão presentes a cada conquista. Sou grata por tudo o que aprendo a cada momento passado ao lado de vocês. Agradeço também aos pais que ganhei ao longo da vida, Santiago e Maria, por fazerem parte dessa caminhada.

Agradeço ao meu companheiro Bruno pela força e por sempre acreditar em mim, mesmo quando eu já estava cansada de tentar. Você é luz em meu caminho.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Wellington Mazer, que me incentiva há anos a buscar o conhecimento e por quem nutro grande admiração.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde iniciei como estudante de Engenharia Civil e a todos os seus profissionais que de alguma maneira me auxiliaram nesta trajetória.

Aos mestres que tive desde a infância até aqueles com quem tive o prazer de trabalhar lado a lado, minha profunda admiração por esta profissão tão importante, mas por vezes pouco reconhecida.

Aos amigos, agradeço a alegria que compartilhamos e pelas tantas vezes que nos apoiamos uns nos outros para que conquistássemos nossos objetivos. Hoje me orgulho de onde chegaram e dos profissionais que se tornaram.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Life is and will ever remain an equation incapable of solution, but it contains certain known factors.
(TESLA, Nikola)

RESUMO

RACHADEL, Ana Carolina. **Realcalinização eletroquímica de matrizes cimentícias carbonatadas**: influência do tempo e da densidade de corrente elétrica. 2021. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

O processo de carbonatação é considerado o principal responsável pela corrosão do aço em estruturas de concreto armado situadas em ambientes urbanos devido à elevada concentração de dióxido de carbono liberado na atmosfera. A carbonatação ocorre quando o CO₂ penetra na estrutura de concreto e consome os álcalis presentes causando a redução do pH da pasta de cimento, o que acaba resultando na despassivação das armaduras. Uma vez despassivado, o aço fica desprotegido do processo de corrosão. O método tradicional de recuperação de concretos carbonatados consiste na troca do concreto afetado por um novo, gerando resíduos e trazendo problemas à segurança de trabalhadores. A realcalinização química e a realcalinização eletroquímica surgem como opções de método não destrutivo à manifestação patológica apresentada. A realcalinização eletroquímica consiste em utilizar uma fonte de corrente contínua ligada à armadura interna e à uma malha metálica externa coberta por solução alcalina. A solução alcalina penetra na peça de concreto armado, enquanto íons alcalinos são gerados no entorno da armadura por eletrólise. Atualmente, a realcalinização eletroquímica é utilizada como método de prevenção à corrosão, antes que a frente de carbonatação atinja a armadura interna. O presente trabalho tem como finalidade estudar a influência do tempo e da densidade de corrente aplicados durante a recuperação na eficácia do método de realcalinização eletroquímica. Para isso, corpos de prova de argamassa em traço único foram moldados e colocados em câmara de carbonatação. Ensaios de absorção, resistência à compressão, profundidade de carbonatação, porosimetria por intrusão de mercúrio e análise termogravimétrica foram realizados nos três grupos: referência, carbonatados e realcalinizado. Concluiu-se que a aplicação da combinação de 0,5 A/m² por 7 dias na aplicação da realcalinização eletroquímica foi suficiente para o reestabelecimento do pH neutro da peça. Apesar disso, a aplicação da combinação de 1,5 A/m² durante 14 dias apresentou mudanças notáveis por meio dos ensaios na microestrutura da argamassa.

Palavras-chave: Realcalinização Eletroquímica. Carbonatação. Corrosão. Recuperação. Concreto.

ABSTRACT

RACHADEL, Ana Carolina. **Electrochemical realkalisation of carbonated cementitious matrix:** influence of time and current density. 2021. 101 p. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2021.

In urban environments, rebar corrosion of reinforced concrete structures is mainly caused by the carbonation process due to a high concentration of carbonic gas released into the atmosphere. Carbonation occurs when CO₂ enters the concrete structure and reacts with alkaline products, causing a decrease in pH values of the cement paste, resulting in the reinforcement depassivation. Once depassivated, the rebar is susceptible to corrosion process. Traditional repair method consists in removing the affected portion of concrete, substituting it for a new and alkaline concrete, generating construction waste and bringing problems to the safety of construction workers, residents, and pedestrians. Chemical and electrochemical realkalisation arise as nondestructive methods to the presented pathology. Electrochemical realkalisation consists in connecting a direct current power supply to the interior rebar and to the metallic mesh on the outside, which is covered by an alkaline solution. The alkaline solution penetrates the concrete structure, while alkaline ions are generated around the interior rebar by electrolysis. Nowadays, electrochemical realkalisation is used as a prevention method to corrosion, before the carbonation front reaches the reinforcement. The present paper aims to study the influence of time and current density applied during the repair process on the efficiency of the ERA method. Mortar specimens were cast using the same mix and placed in a carbonation chamber. Absorption, compressive strength, carbonation depth, mercury intrusion porosimetry and thermogravimetric analysis tests were performed on three specimen groups: reference, carbonated and realkalised. It was concluded that the application of a current density of 0,5 A/m² for 7 days during the electrochemical realkalisation process was enough to reestablish the alkalinity of the specimens. Despite these results, the application of 1,5 A/m² for 14 days presented better changes in the mortar microstructure.

Keywords: Electrochemical Realkalisation. Carbonation. Corrosion. Repair. Concrete.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio Químicos: Boletim CP V-ARI-RS Agosto/2018.....	49
Tabela 2 - Ensaio Físicos e Mecânicos: Boletim CP V-ARI-RS Agosto/2018	49
Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado miúdo	50
Tabela 4 - Programação de corpos de prova	53
Tabela 5 - Programação de Ensaio	54
Tabela 6 - Espessura de cobrimento.....	55
Tabela 7 - Condições ambientes da câmara de carbonatação	58
Tabela 8 - Ajustes de corrente	62
Tabela 9 - Dados do ensaio de absorção.....	67
Tabela 10 - Dados do ensaio de Resistência a Compressão.....	69
Tabela 11 - Porosidade total (%).....	75
Tabela 12 - Comparação estatística entre grupos.....	76
Tabela 13 - Variações máximas no eixo Y - Mistura A - Amostras Internas.....	77
Tabela 14 - Variações máximas no eixo Y - Mistura A - Amostras Externas ...	78
Tabela 15 - Variações máximas no eixo Y - Mistura B - Amostras Internas.....	79
Tabela 16 - Variações máximas no eixo Y - Mistura B - Amostras Externas ...	81
Tabela 17 - Variações máximas no eixo Y - Mistura C - Amostras Internas	82
Tabela 18 - Variações máximas no eixo Y - Mistura C - Amostras Externas ...	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Carbonatação do concreto.....	19
Figura 2 - Diagrama de Pourbaix para o ferro.....	31
Figura 3 - Corrosão das armaduras.....	32
Figura 4 - Comparação entre a perda mássica medida experimentalmente e calculada.....	35
Figura 5 - Mecanismo de corrosão anterior ao reparo.....	37
Figura 6 - Mecanismo de corrosão posterior ao reparo.....	38
Figura 7 - Realcalinização Eletroquímica.....	40
Figura 8 - Curva granulométrica da areia.....	50
Figura 9 - Malha metálica: Aço Inox e feltro geotêxtil.....	51
Figura 10 - Barrilha leve.....	52
Figura 11 - Fonte de corrente contínua.....	52
Figura 12 - Corpos de prova com barra de aço central.....	56
Figura 13 - Câmara de carbonatação inicial.....	57
Figura 14 - Nova câmara de carbonatação.....	58
Figura 15 - Corpos de prova após preparo.....	59
Figura 16 - Preparação dos corpos de prova.....	60
Figura 17 - Montagem do sistema de realcalinização.....	61
Figura 18 - Sistema de RAE montado.....	61
Figura 19 - Sistema de realcalinização eletroquímica: Mistura A - 0,5 A/m ²	62
Figura 20 - Massa do corpo de prova em situação seca.....	63
Figura 21 - Massa do corpo de prova situação saturada.....	64
Figura 22 - Corpos de prova "C" fatiados com aspersão de fenolftaleína.....	65
Figura 23 - Verificação da eficácia do método com uso de fenolftaleína em grupo "7D B".....	65
Figura 24 - Ensaio de Absorção em CPs Referência e Carbonatado.....	67
Figura 25 - Ensaio de Resistência à Compressão em CPs Referência e Carbonatado.....	69
Figura 26 - CPs de 1 a 6 - 7 dias - 0,5 A/m ²	70
Figura 27 - CPs de 1 a 6 - 14 dias - 0,5 A/m ²	70
Figura 28 - CPs de 1 a 6 - 21 dias - 0,5 A/m ²	71
Figura 29 - CPs de 1 a 6 - 7 dias - 1,0 A/m ²	71
Figura 30 - CPs de 1 a 6 - 14 dias - 1,0 A/m ²	71
Figura 31 - CPs de 1 a 6 - 7 dias - 1,5 A/m ²	71
Figura 32 - Corpo de prova 6C 7D após realcalinização (1,5 A/m ²).....	73
Figura 33 - Malha de aço após 7 dias com aplicação de corrente de 0,5 A/m ²	73
Figura 34 - Malha de aço após 14 dias com aplicação de corrente de 0,5 A/m ²	74
Figura 35 - Malha de aço após 21 dias com aplicação de corrente de 0,5 A/m ²	74
Figura 36 - ATG para densidade de corrente 0,5 A/m ² - Mistura A - Amostras internas.....	77
Figura 37 - ATG para densidade de corrente 0,5 A/m ² - Mistura A - Amostras externas.....	78

Figura 38 - ATG Amostras para densidade de corrente 1,0 A/m ² - Mistura B - Amostra Interna.....	79
Figura 39 - ATG Amostras para densidade de corrente 1,0 A/m ² - Mistura B - Amostra Externa.....	80
Figura 40 - ATG para densidade de corrente 1,5 A/m ² - Mistura C - Amostra Interna.....	82
Figura 41 - ATG para densidade de corrente 1,5 A/m ² - Mistura C - Amostra Externa.....	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1.	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	DELIMITAÇÃO	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CARBONATAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	17
2.1.1	Processo de Carbonatação	18
2.1.2	Modelo Usual de Carbonatação	24
2.1.3	Carbonatação Artificial de Corpos de Prova	27
2.2	CORROSÃO DAS ARMADURAS	29
2.2.1	Passividade do Aço	29
2.2.2	Corrosão do Aço	31
2.3	REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	36
2.3.1	Processo de Realcalinização	36
2.3.2	Pesquisas Anteriores	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	MATERIAIS	48
3.1.1	Cimento	48
3.1.2	Aço	49
3.1.3	Areia	50
3.1.4	Malha Metálica e Feltro	51
3.1.5	Solução Alcalina	51
3.1.6	Fonte e Componentes Elétricos	52
3.2	MÉTODOS	53
3.2.1	Corpos de Prova	53
3.2.2	Definição do Traço	55
3.2.3	Moldagem e Cura	55
3.2.4	Carbonatação	56
3.3	REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	59
3.3.1	Preparo dos Corpos de Prova	59
3.3.2	Montagem do Sistema	60
3.3.3	Processo de Realcalinização	62
3.4	MÉTODOS DE ENSAIO	63
3.4.1	Absorção	63
3.4.2	Resistência à Compressão	64
3.4.3	Medidas de Carbonatação	64
3.4.4	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	66
3.4.5	Análise Termogravimétrica	66
	RESULTADOS E ANÁLISES	67
4.1	ABSORÇÃO	67
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	68
4.3	REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	70
4.3.1	Corpos de Prova	70
4.3.2	Malha Metálica	72
4.4	POROSIMETRIA	75

4.5	Análise Termogravimétrica.....	76
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.1	Conclusões	85
5.2	Trabalhos Futuros	87
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A - Análise ANOVA para os ensaios	97

1 INTRODUÇÃO

Em muitos países, o desenvolvimento acelerado da economia, combinado à deficiência na supervisão dos processos e na qualidade dos materiais culminou na baixa qualidade de concretos produzidos e na pequena camada de cobertura sobre o aço. Tais características acabam conduzindo as estruturas armadas a problemas de corrosão ocasionados pelo processo de carbonatação (BROOMFIELD, 2007). Em áreas urbanas, onde a concentração de dióxido de carbono presente no meio costuma ser elevada, devido à liberação de poluentes na atmosfera por veículos a combustão e indústrias, a corrosão ocorre principalmente por processo de carbonatação (GONZÁLEZ *et al.*, 2011).

Durante esse processo, o dióxido de carbono presente no meio penetra a estrutura de concreto armado e, ao encontrar água em seu interior, reage de forma a consumir, principalmente, os hidróxidos de cálcio (Ca(OH)_2). O consumo de Ca(OH)_2 produz carbonato de cálcio (CaCO_3), o que reduz o pH da pasta de cimento a níveis abaixo do necessário à manutenção da camada passivadora do aço. A redução do pH do meio favorece a ocorrência da corrosão da armadura que, devido ao processo de carbonatação, pode não mais possuir sua camada protetiva (BANFILL, 1994).

Considera-se assim a relação entre os materiais concreto e aço de benefício mútuo, uma vez que, além do incremento em resistência resultante da ação da armadura, o concreto provê uma camada protetora em torno do aço que, apesar de ser uma barreira eficaz a entrada de agentes corrosivos, é finita (DYER, 2014).

O processo de corrosão promove a redução da seção transversal da armadura através do consumo de ferro (Fe), assim diminuindo sua resistência e a resistência da estrutura armada à qual faz parte. Como seus produtos possuem volume muito maior que o do metal original, surgem grandes pressões internas em torno das barras que causam fissuras e desagregação da camada de cobertura de concreto (PAPADAKIS *et al.*, 1991; BERTOLINI, CARSANA e REDAELLI, 2008).

Para casos em que a peça de concreto armado foi comprometida pelos processos de carbonatação associadas ou não ao ataque por cloretos, o método

de reparo mais usual se baseia na retirada e substituição da porção afetada por concreto novo, após o tratamento adequado das armaduras. Essa metodologia torna o processo caro e perigoso, além de produzir resíduos da construção (GONZÁLEZ *et al.*, 2000).

As técnicas de reabilitação eletroquímica surgem como possibilidade à prevenção da rápida deterioração que estruturas de concreto armado sofrem em ambientes agressivos, resultando na corrosão de suas armaduras. Métodos como as realcalinizações química (RAQ) e eletroquímica (RAE) se destacam em relação ao método de reparo tradicional por serem menos nocivas ao meio ambiente (MIRANDA *et al.*, 2006).

A realcalinização eletroquímica é considerada um método não destrutivo de reabilitação que tem como objetivo restabelecer o pH alcalino da pasta de cimento. Este método apresenta-se como solução, principalmente, para estruturas históricas tombadas, com pouca seção ou baixa capacidade para acréscimo de carga (MIETZ, 1995).

Essa técnica se baseia na passagem de uma corrente elétrica pelo concreto até a armadura interna através da utilização de uma malha metálica externa, funcionando como ânodo do sistema, recobrindo a superfície da peça de concreto armado. Uma solução de carbonato de sódio é normalmente utilizada como eletrólito, recobrindo ambas a malha e a peça (YEIH e CHANG, 2005).

O presente método é descrito por alguns autores como uma técnica protetiva ou preventiva, não sendo considerada de reabilitação por não ser capaz de restaurar as condições iniciais dos materiais concreto e armadura. Sua função é de prevenir a propagação da frente de carbonatação e não de reparar o dano já existente (GONZÁLEZ *et al.*, 2000; MIRANDA *et al.*, 2006).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a influência da densidade de corrente contínua e o período de sua aplicação na eficiência da técnica de realcalinização eletroquímica para matrizes cimentícias.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como desdobramento do objetivo geral, os objetivos específicos envolvem os seguintes pontos:

- Estudar a influência da variação de corrente elétrica e do tempo de aplicação da técnica em sua capacidade de restauração da alcalinidade da pasta;
- Determinar a melhor relação corrente elétrica/tempo para aplicação do processo de realcalinização eletroquímica;
- Estudar a eficiência do tratamento empregado quanto à restauração da alcalinidade dos corpos de prova carbonatados;
- Analisar os possíveis efeitos causados pelo método de realcalinização na microestrutura da pasta de cimento e suas propriedades.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com Wangler *et al.*, (2019), o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo o segundo insumo mais utilizado depois da água. Sua popularidade se deve à disponibilidade, uso de materiais relativamente fáceis de se encontrar e característica fluida em estado inicial, o que lhe confere a possibilidade de tomar diversas formas quando endurecido, podendo ainda suportar grandes cargas.

Estruturas produzidas em concreto armado estão constantemente sujeitas à ação de agentes agressivos presentes no meio (CORSINI, 2013). Tendo apresentado um vasto número de manifestações patológicas devido a falhas de projeto, execução e manutenção, faz-se necessário o desenvolvimento

de estudos e métodos que priorizem a reabilitação de tais estruturas em contrapartida à substituição por peças novas, evitando assim a geração de resíduos e reduzindo o consumo de materiais de construção.

A corrosão das armaduras é considerada uma das mais significativas causas de deterioração das estruturas de concreto armado, provocando inúmeras outras manifestações patológicas como fissuras e desagregação do concreto. A presença na corrosão pode resultar no colapso da estrutura por falta de monitoramento e/ou correta manutenção. Em ambientes urbanos distantes de zonas marítimas, o processo de carbonatação é considerado um dos principais aceleradores de corrosão das armaduras presentes nas estruturas de concreto armado, pois consome os compostos alcalinos da pasta de cimento. Este consumo reduz o pH do meio e acarreta o comprometimento da camada passivadora da armadura.

O método eletroquímico, utilizado tanto para a realcalinização de concretos carbonatados, foco do presente estudo, quanto para a extração de cloretos em estruturas, é considerado um método não destrutivo por não necessitar a quebra e substituição de parte da massa de concreto da estrutura. Tal método é considerado uma solução à técnica atual utilizada de substituição da porção de concreto afetada, que tem restrições quanto ao uso em prédios históricos, além de questões ambientais e de segurança, tanto para os trabalhadores, quanto para a população no entorno da edificação.

No caso da realcalinização eletroquímica, o método atualmente apresenta alto custo devido aos componentes da célula de realcalinização que incluem a utilização de malha metálica de titânio. O custo de uma tela de titânio com as medidas 34x25 cm no mercado é de R\$275,00, conferindo ao metro quadrado o valor de R\$3.235,29 (DENTAL PROGRESSO, 2020)

Além do custo, o método, apesar de ter sido apresentado por Banfill (1994), necessita maior quantidade de estudos que relacionem a interferência das variáveis densidade de corrente aplicada, tipo de cimento e adições, malha metálica, tempo e solução alcalina na eficiência do método. A dúvida sobre a possibilidade de repassivação da armadura interna à peça estrutural carbonatada com a aplicação da realcalinização eletroquímica também permanece entre os pesquisadores, sendo por isso considerada uma ação preventiva.

Tendo em vista a necessidade de aprimoramento das especificações sobre a aplicação do método de realcalinização eletroquímica quando suas variáveis são alteradas, o presente trabalho tem a intenção de estudar a influência da variação da densidade de corrente e do tempo de aplicação da técnica sobre corpos de prova de argamassa carbonatados produzidos com cimento Portland CP V-ARI-RS.

1.3 DELIMITAÇÃO

A parte experimental apresentada neste trabalho foi realizada nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), entre os meses de setembro de 2018 e outubro de 2020 sendo utilizados os laboratórios de materiais de construção, agregados e argamassas.

A utilização de argamassa de cimento para o estudo da realcalinização eletroquímica em substituição ao concreto e a potência da fonte de corrente contínua são fatores delimitadores do presente projeto de pesquisa, bem como o tamanho dos corpos de prova em relação a estruturas de tamanho real. Devido à baixa capacidade da fonte e a alta resistividade de peças moldadas com argamassa, a quantidade de corpos de prova realcalinizados por vez foi limitada.

As diversas possibilidades de traço, condições de cura e ambiente inserido fazem com que cada estudo tenha suas particularidades devido às propriedades como porosidade, resistividade e composição dos corpos de prova de argamassa, concreto e até mesmo estruturas reais.

Também deve ser considerado que existem diferenças no avanço da frente de carbonatação, influência nas propriedades da pasta de cimento e consumo dos produtos alcalinos disponíveis entre os processos de carbonatação natural e artificial com suas variações de concentração de CO_2 .

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo desta dissertação faz uma breve apresentação do estudo, introduzindo o problema de pesquisa tratado, colocando suas justificativas e objetivos para o estudo de variáveis inerentes ao processo de

realcalinização eletroquímica, sem mudanças de composição ou traço de argamassa.

O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica sobre o assunto, abordando desde temas de maior conhecimento entre técnicos e acadêmicos como a corrosão e a carbonatação, até assuntos mais específicos como a realcalinização eletroquímica, objeto do presente trabalho. Neste, constam subcapítulos relacionados ao processo de carbonatação das estruturas, corrosão das armaduras e realcalinização de concretos carbonatados, além de seus subitens.

O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados durante a pesquisa, além do fluxo de atividades e metodologias aplicadas para a obtenção de resultados relacionados ao tema do estudo.

O quarto capítulo mostra os resultados e apresenta uma análise dos ensaios realizados durante os estudos. Também são discutidas, neste capítulo, algumas dificuldades enfrentadas durante a pesquisa e como estas foram mitigadas.

O quinto e último capítulo conclui de maneira sucinta os pontos de estudos levantados nos objetivos geral e específicos apresentados no primeiro capítulo. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARBONATAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

O concreto é considerado um material versátil e econômico, podendo ser moldado em diversos formatos e receber diversos acabamentos, além de apresentar prolongada vida útil. Apesar disso, sob condições desfavoráveis, o concreto sofre degradação, podendo apresentar danos severos em poucos anos, fazendo necessária a aplicação de medidas preventivas. Dentre as causas pelas quais o material pode não apresentar desempenho adequado, estão os problemas de projeto, construção e seleção inadequada de materiais, além da ação de agentes externos agressivos, que, quando somados, reduzem ainda mais a vida útil da estrutura. A utilização de reparos custosos ou até mesmo a demolição de parte ou totalidade da estrutura ocorre quando o concreto armado já foi afetado, pois os sinais de deterioração em estruturas desse tipo frequentemente aparecem quando o dano é quase irreversível (GONZÁLEZ *et al.*, 2000; BROOMFIELD, 2007).

Em estruturas que combinam concreto e aço, a armadura é naturalmente protegida da corrosão pela alta alcalinidade da pasta de cimento que mantém a camada passivadora do aço. A longevidade da vida útil das estruturas produzidas com esse tipo de material se baseia, além dos fatores já citados, na estabilidade das condições necessárias à manutenção da camada protetora do aço, que podem ser afetadas por agentes externos (YEIH e CHANG, 2005).

Em ambientes marinhos e costeiros, ou onde há presença de sais, o ataque por cloretos pode ser considerado o principal mecanismo a provocar a corrosão das armaduras. Em outras localizações, principalmente em áreas urbanas onde a concentração de dióxido de carbono presente no meio costuma ser elevada devido à liberação de poluentes por veículos e indústrias, considera-se o processo de carbonatação o maior responsável pela aceleração da corrosão das barras de aço presentes nas estruturas. (PAPADAKIS *et al.*, 1991; González *et al.*, 2011)

Nesses casos, o método de reparo tradicional das estruturas comprometidas consiste na retirada da porção afetada pela carbonatação e sua substituição por concreto novo, com pH alcalino, após o tratamento adequado das armaduras, o que torna o processo caro e gera riscos estruturais e a segurança das pessoas (GONZÁLEZ *et al.*, 2000).

Segundo Polder (2001), a ação da carbonatação aumenta a resistividade do concreto, enquanto a penetração de cloretos na peça estrutural tem pouca influência sobre os valores dessa propriedade. Estando a resistividade do concreto relacionada à facilidade dos íons em penetrar na estrutura, sendo que quanto menor o valor de resistividade mais alta a velocidade de penetração de íons, uma camada superficial de concreto carbonatado pode se tornar uma barreira ao ataque desses agentes agressivos, quando em ambientes marinhos ou costeiros.

Existem estudos que relacionam os efeitos das fissuras presentes nas peças de concreto armado com a corrosão do aço causada pelo processo de carbonatação. Apesar de ter sido observado que a corrosão ocorre mais cedo em peças com fissuras, Ghantous *et al.* (2017) observaram que os produtos provenientes do processo de corrosão podem selar essas fissuras e agir de maneira a dificultar a difusão de oxigênio e água, reduzindo a velocidade de propagação da corrosão na armadura.

Visto que a velocidade com que grande parte dos processos de degradação do concreto ocorrem depende da facilidade com a qual as substâncias adentram seus poros, infere-se que a constituição de sua microestrutura é de grande importância para sua durabilidade. Uma microestrutura densa, com baixa presença de poros interconectados, limita a penetrabilidade de agentes agressivos, prolongando sua vida útil, além de influenciar em outras propriedades como a resistência (TIBBETTS *et al.*, 2020).

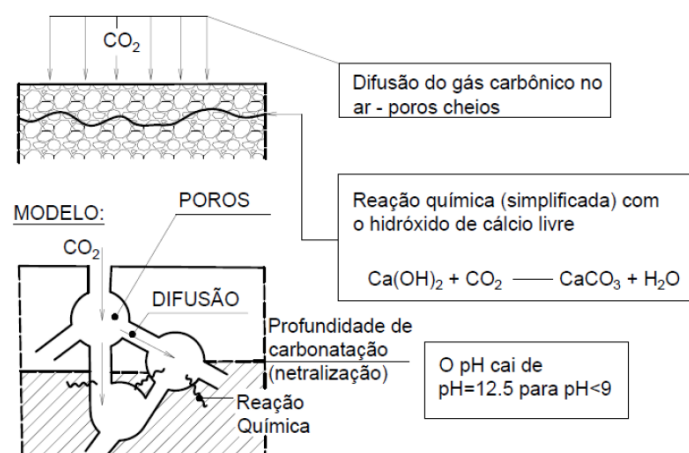
2.1.1 Processo de Carbonatação

O processo de carbonatação, como mostrado na Figura 1, ocorre quando o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera penetra na peça estrutural, por processo de difusão, e se dissolve na água existente nos poros do concreto, formando ácido carbônico (H_2CO_3). Esse ácido reage

principalmente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na pasta de cimento, segundo as Equações 1 e 2, resultando em carbonato de cálcio (CaCO_3) e água (H_2O).



Figura 1 - Carbonatação do concreto



Fonte: **BAKKER (1998) apud RIBEIRO (2009)**

A neutralização dos álcalis pelo ácido carbônico consome os produtos alcalinos da pasta e faz com que o pH do meio seja reduzido para valores abaixo do necessário à manutenção da passivação do aço (PAPADAKIS e VAYENAS, 1991; BANFILL, 1994; MIETZ, 1995). Nos casos em que a ocorrência da carbonatação é mais significativa que o ataque por penetração de cloretos e sulfatos no concreto, o processo de corrosão das armaduras internas às peças de concreto pode ser iniciado quando reações químicas inerentes ao processo de carbonatação ocasionam a redução do pH para valores próximos ou abaixo de 9 (TUUTTI, 1982).

Ao contrário do sódio (Na) e do potássio (K), considerados mais solúveis e por isso quase completamente dissolvidos na pasta de cimento, o hidróxido de cálcio tem solubilidade dependente da concentração de íons hidroxila (OH^-) disponíveis nos poros do concreto. Com isso, quanto maior a impermeabilidade do concreto, menor a reserva de hidroxilas disponíveis e menor a concentração

de CO₂ no meio, menor será a velocidade com a qual o processo de carbonatação ocorrerá na peça (TUUTTI, 1982).

A água, presente em maiores ou menores quantidades no interior do concreto, também possui importantes funções na ocorrência das reações. A primeira delas é a ação de bloquear os poros, dificultando a difusão do gás pela pasta de cimento, a outra de providenciar as condições necessárias à ocorrência de reações químicas (PAPADAKIS, VAYENAS e FARDIS, 1991).

As reações químicas mencionadas ocorrem em maior velocidade na presença de condições médias de umidade, entre 50 e 70% de umidade relativa do ar. Quando em condições saturadas, o dióxido de carbono não é capaz de penetrar a peça de concreto armado e reagir com o hidróxido de cálcio, enquanto um concreto seco não apresenta água suficiente para transformação do dióxido de carbono em ácido carbônico (BANFILL, 1994).

Estudo realizado por Possan *et al.* (2017) sobre a capacidade de absorção de CO₂ pela barragem de Itaipú (Brasil) confirma a influência da exposição à umidade em relação à possibilidade e velocidade da carbonatação em estruturas. Corpos de prova extraídos ao nível das fundações submersas da barragem (condição saturada) apresentaram profundidades de carbonatação próximas a zero, enquanto no topo da barragem, local sujeito às variações climáticas, as medidas chegaram a 30 mm.

Corpos de prova de concreto produzidos em 48 traços diferentes foram distribuídos entre 5 países diferentes (Lyon - França, Austin - Estados Unidos, Fredericton - Canadá, Chennai - Índia e Changsha - China). Nesses locais, os corpos de prova foram dispostos às condições ambientes com condições atmosféricas de concentração de CO₂ naturais em locais expostos a chuva e em locais abertos, mas protegidos por uma cobertura, pelo período de 5 anos. Durante a pesquisa foram realizados ensaios de profundidade de carbonatação em intervalos periódicos para analisar a influência das condições climáticas sobre a resistência do concreto à carbonatação. Apesar dos resultados não mostrarem uma diferença significativa entre o comportamento dos corpos de prova nas diversas localidades, foi possível notar que o número de dias com chuva possui maior influência sobre a profundidade de carbonatação do que a precipitação total de chuva na região. A curto prazo, quanto maior a quantidade de dias chuvosos, menor a taxa de carbonatação (VU *et al.*, 2019).

Quando a frente de carbonatação encontra a armadura e rompe a camada passivadora, a probabilidade de ocorrer corrosão aumenta devido à presença de água e gás oxigênio (O_2) no meio. A velocidade com que essa frente de carbonatação avança na peça tem relação com características do concreto e da peça como: espessura de cobrimento, compactação, relação água/cimento, taxa de cimento e condições de cura. Quanto piores as condições citadas, maior facilidade terá o dióxido de carbono de penetrar no concreto devido à alta porosidade da peça (MIETZ, 1995).

Martins *et al.* (2018) observaram em seus estudos que corpos de prova produzidos com grante de menor resistência à compressão (15 MPa) apresentavam um avanço da frente de carbonatação relativamente maior do que aqueles com resistências de 20 e 25 MPa. Combinando modelagem matemática com experimentos realizados em laboratório, o trabalho previu que as frentes de carbonatação atingiriam 15 mm de profundidade a idades de 20, 42 e 69 anos para as respectivas resistências à compressão.

Como maneira de dificultar a penetração de CO_2 no concreto e, conseqüentemente, postergar o avanço da frente de carbonatação na estrutura armada, Aguiar e Junior (2013) estudaram três diferentes materiais a serem aplicados sobre a superfície da peça com função impermeabilizante. Foram analisadas proteções do tipo epóxi, acrílica e siloxano. Os autores concluíram que o coeficiente de carbonatação foi menor nas peças com proteção do que nas sem, sendo que a resina epóxi apresentou os melhores resultados. Também foi confirmado que massas produzidas com menor relação água/cimento apresentam menores coeficientes devido à menor porosidade da peça, como descrito por Mietz (1995) e confirmado experimentalmente por Bertolini, Carsana e Redaelli (2008).

Nakayama *et al.* (2018) investigaram a performance de materiais para tratamento e impermeabilização de superfícies aplicados após a realcalinização de concretos carbonatados e dessalinização de concretos com ataque por cloretos. Em relação aos concretos realcalinizados, como resultado, foi observado que proteções aplicadas em epóxi e argamassa polimérica de cimento apresentaram maior durabilidade após 24 meses de carbonatação induzida em relação a peças que receberam impregnação à base de silano. Os

dois primeiros apresentaram uma taxa de 98% de supressão da penetração de água ao final dos ensaios, enquanto o último apresentou uma taxa de 52%.

Ao estudar os efeitos da carbonatação de concretos sobre a microestrutura da pasta (porosidade) e as propriedades relacionadas à umidade (quantidade de água), Morandeu, Thiéry e Dangla (2014) chegaram à conclusão de que o hidróxido de cálcio e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) presentes na pasta de cimento iniciam sua carbonatação simultaneamente. Apesar disso, o hidróxido de cálcio se torna menos acessível à carbonatação com o tempo e a velocidade de consumo desse composto reduz até parar. Observou-se que efeitos na microestrutura da pasta levam a uma redução da porosidade e que, durante a carbonatação, apenas as reações com hidróxido de cálcio resultam em liberação de água, enquanto reações C-S-H mantém essa água internamente ao processo. Corroborando com o apresentado por Morandeu, Thiéry e Dangla (2014), estudos feitos por Cui *et al.* (2015) apresentaram uma redução na porosidade dos corpos de prova de concreto utilizados de 11,2% para 9,8%, 8,7% e 8,1% quando expostos por 7 dias a concentrações de CO₂ de 10, 20 e 50% respectivamente.

Quando comparados os resultados dos ensaios de absorção de água e densidade dos corpos de prova referência, carbonatados por 1 dia e carbonatados por 7 dias, Zhan *et al.* (2019) também observaram variações nos valores obtidos. Os corpos de prova carbonatados foram primeiro armazenados em câmara a 25°C ± 1 e umidade de 50% ± 1 e, posteriormente, mantidos em câmara de carbonatação com 100% de concentração. Condizente com as consequências da precipitação do carbonato de cálcio formado durante o processo de carbonatação sobre as condições da pasta de cimento, os corpos de prova carbonatados apresentaram menor absorção de água (8,7% para um dia e 7,90% para 7 dias) e maior densidade (2105 kg/m³ para 7 dias) em relação aos corpos de prova referência com valores de 11,22% e 1988 kg/m³, respectivamente.

Para analisar os efeitos do processo de carbonatação sobre a microestrutura da pasta de cimento, Dos Reis *et al.* (2020) realizaram ensaios de absorção de nitrogênio, microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria derivada (DTG). Em geral, observou-se que a superfície específica do material analisado aumentou com o tempo de

carbonatação, o que demonstra o fato de que a cristalização dos minerais de cálcio cria superfícies porosas durante o processo. Com o aumento da área específica, entende-se que a precipitação do CaCO_3 preenche os espaços, tornando os poros cada vez menores. Os autores observam nos resultados do ensaio DTG que o primeiro pico, entre 74°C e 106°C , se refere à perda de umidade do material ensaiado (H_2O). Na sequência, à temperaturas em torno de 455°C , a perda mássica observada refere-se à desidratação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sendo mais intensa na amostra não carbonatada que contém maiores quantidades da substância. O último pico, a 710°C , corresponde à decomposição dos carbonatos (ex.: CaCO_3), observado mais intensamente na amostra carbonatada (DOS REIS *et al.*, 2020).

Apesar dos resultados apresentados acima demonstrarem uma alteração na porosidade das matrizes cimentícias submetidas ao processo de carbonatação, Tracz e Zdeb (2019) afirmam que os resultados provenientes do estudo realizado sobre a porosidade do concreto, utilizando os ensaios de porosidade por intrusão de mercúrio, picnometria de hélio e saturação de água, demonstram que a permeabilidade do material não sofre mudanças significativas ao longo do tempo, com o avanço da hidratação do cimento e da carbonatação, apesar das mudanças em sua microestrutura. Considera-se nesse estudo que a permeabilidade é referente a porcentagem de poros interconectados enquanto porosidade refere-se ao total de poros existente no material.

Tam, Butera e Le (2020) demonstram a diferença entre as perdas mássicas de amostras não carbonatadas e carbonatadas por meio de análise termogravimétrica. Considerando que o hidróxido de cálcio, substância consumida durante o processo de carbonatação, é eliminado a temperaturas entre 430°C e 500°C , os resultados mostraram que a perda mássica a essas temperaturas dos corpos de prova carbonatados foi menor que a das amostras não carbonatadas. Essa diferença se deve ao fato de que a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ existente em amostras carbonatada foi consumida, mas demonstra ainda que o processo de carbonatação ainda pode evoluir. Por isso, subentende-se que essa quantidade se torna cada vez menor à medida que o volume de carbonato de cálcio aumenta.

Os resultados apresentados por Kurda, Brito e Silvestre (2019) mostram que concretos contendo volumes significativos de agregado reciclado e/ou cinza

volante apresentaram uma redução na resistência à penetração da frente de carbonatação. Em relação a um concreto referência, sem adições, a utilização de 30 e 60% de cinza volante na mistura resultou em um aumento de 3 a 6 vezes na profundidade da frente de carbonatação, respectivamente. No mesmo estudo, a utilização de 100% de agregado reciclado levou a um aumento de 2,7 vezes na profundidade de carbonatação, causado pela maior porosidade deste agregado com relação ao natural. Todos os corpos de prova foram submetidos às mesmas condições, dispostos dentro da câmara de carbonatação de maneira que o dióxido de carbono se espalhasse de maneira homogênea pelo equipamento. Levando em consideração os benefícios ligados a sustentabilidade quando utilizadas adições e resíduos da construção civil, os autores recomendam que seja previsto uma maior espessura de cobertura de concreto para peças armadas a fim de atingir a vida útil desejada de 50 anos.

O acréscimo na profundidade de carbonatação em relação ao concreto referência também foi observado por Khan e Lynsdale (2002) com a adição de cinza volante e sílica ativa à mistura. Neste caso, notou-se que um aumento de 10% no conteúdo de cinza volante da mistura representava um acréscimo de 0,3 mm na profundidade de carbonatação dos corpos de prova estudados.

2.1.2 Modelo Usual de Carbonatação

Segundo Broomfield (2007), a taxa de difusão do dióxido de carbono pela peça de concreto armado se aproxima da primeira Lei de Fick, que descreve a difusão de matéria ou energia em um meio sem equilíbrio térmico ou químico. Quanto maior o gradiente de concentração de CO₂, maior a velocidade de penetração do gás na estrutura de concreto e conseqüentemente mais rapidamente ocorre a carbonatação (CUI *et al.*, 2015).

Para o cálculo da profundidade de carbonatação, Tuutti (1982) cita a equação mais antiga apresentada em literatura que é baseada no princípio da raiz quadrada. De acordo com esta equação, a frente de carbonatação avança de acordo com o descrito na Equação 3.

$$x = k * \sqrt{t} \quad (3)$$

Sendo,

x a profundidade onde se localiza a frente de carbonatação;

t o tempo de exposição da peça de concreto armado a atmosferas contendo dióxido de carbono;

e k a constante baseada na difusividade do CO_2 pelo concreto, na diferença de concentrações e na quantidade de CO_2 disponível no meio.

Leemann *et al.* (2015) utilizaram uma derivação da equação 3, expressa pela equação 4, para determinar, empiricamente, valores da constante k , considerando valores de profundidade de carbonatação inicial A .

$$k = \frac{x - A}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

Andrade (2020) apresentou estudo relacionado a quantidade de CO_2 que é absorvido pela pasta de cimento durante o avanço da frente de carbonatação. Em seu artigo, o autor menciona que a equação 3 considera um consumo de 100% do CO_2 que penetra no concreto e que Tuutti (1982) estabelece que o dióxido de carbono não avança sua frente de carbonatação até que haja um completo consumo dos elementos disponíveis na pasta de cimento. Os primeiros estudos sobre o assunto identificavam o avanço da frente de carbonatação utilizando o indicador de fenolftaleína, gerando modelos com foco na mudança do pH, sem considerar a quantidade de CO_2 consumida. Em sua conclusão, o autor menciona que a função que representa a absorção do gás durante o processo de carbonatação do concreto pode ser comparada ao consumo de CO_2 plantas durante a fotossíntese.

Modelos mais recentes para a previsão da profundidade de carbonatação levam em conta condições de umidade, temperatura, concentração de CO_2 na atmosfera, velocidade das reações químicas, porosidade e composição do concreto para resultados mais assertivos (TALUKDAR, BANTHIA e GRACE, 2012; MARQUES, CHASTRE e NUNES, 2013; BENÍTEZ *et al.*, 2019).

O modelo apresentado por Talukdar, Banthia e Grace (2012) é composto por duas equações finais (equações 5 e 6) que determinam a concentração de CO_2 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em um dado ponto da peça em função tempo. Considera-se que

a temperatura tem efeito sobre a solubilidade da substância na água presente nos poros do concreto (constante de Henry) e o coeficiente de difusão do CO₂. A intenção dos autores é de que, futuramente, o modelo apresentado, contendo as Equações 5 e 6, possa ser usado para prever o potencial efeito das mudanças climáticas sobre as estruturas de concreto armado.

$$\frac{\partial}{\partial t} [CO_{2(aq)}] = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} [CO_{2(g)}] HRT - k [CO_{2(aq)}] [Ca(OH)_{2(aq)}] \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [Ca(OH)_{2(aq)}] = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} [Ca(OH)_{2(aq)}] - k [CO_{2(aq)}] [Ca(OH)_{2(aq)}] \quad (6)$$

Marques, Chastre e Nunes (2013) utilizaram o modelo adaptado pela especificação LNEC E 465 para as condições ambientais de Portugal. Este modelo expressa a difusividade do concreto e calcula a profundidade de carbonatação de acordo com o tempo, indicando o início da despassivação do aço quando o resultado da equação (x) é igual a espessura da camada de cobertura de concreto, conforme apresentado na Equação 7.

$$x = \sqrt{\left(\frac{2 * \Delta C}{R_{C65}}\right) \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n} \quad (7)$$

Também levando em consideração o aquecimento global, causado pelo aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera, mudanças nos volumes de chuva, umidade relativa e temperaturas, Benítez *et al.* (2019), utilizaram modelo matemático previamente desenvolvido por Talukdar, Banthia e Grace (2012) com o objetivo de apresentar previsões mais realistas sobre a vida útil de serviço das estruturas armadas sujeitas a processos de corrosão por carbonatação situadas no Paraguai. Os resultados do modelo foram confrontados com os resultados dos ensaios empíricos realizados na cidade de Assunção.

O estudo realizado por Paul *et al.* (2018) expõe a importância de se conhecer o efeito do clima, tempo de exposição e composição do concreto. Segundo os autores, estudos anteriores apontam que, apesar de a composição

do concreto ser um fator de crítico para a velocidade de carbonatação, esta propriedade não tem sido modelada corretamente. Para reverter este cenário levantado, os autores utilizaram redes neurais para criar um modelo empírico com o intuito de avaliar e estimar a profundidade de carbonatação em estruturas com grandes diferenças entre traços de concreto.

2.1.3 Carbonatação Artificial de Corpos de Prova

Para que o processo ocorresse em laboratório, de maneira artificial, Castellote, *et al.* (2006) duas séries de corpos de prova cilíndricos de 2,2x6 cm foram moldados e curados durante 7 dias em câmara úmida. A primeira mistura era composta apenas por cimento, enquanto a segunda era composta possuía 35% de cinza volante. Após secos, os mesmos foram dispostos em câmara com umidade relativa do ar igual a 65%, temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e 100% de CO_2 . Os corpos de prova permaneceram submetidos a essas condições pelo período de um mês, até que um acréscimo em suas massas fosse notado. A certificação da carbonatação total dos corpos de prova foi feita aspergindo solução de fenolftaleína.

Nasser *et al.* (2010) confinaram 6 corpos de prova de concreto em local com concentração de CO_2 igual a 50%. O concreto foi produzido utilizando um consumo de cimento de 400 kg/m^3 e relação água/cimento de 0,45, obtendo-se uma resistência à compressão de 50 MPa aos 28 dias. A umidade relativa da câmara foi mantida em 65%, a uma temperatura de 20°C , condições consideradas ótimas ao processo de carbonatação. Juntamente aos corpos de prova, foram colocados cubos de concreto moldados em tamanho 10x10 cm, os quais foram utilizados como medida de profundidade de carbonatação, sendo um rompido a cada semana. Após 16 semanas, foi constatado, com aspensão de solução de fenolftaleína, que a frente de carbonatação havia alcançado 20 mm de profundidade, possivelmente levando a despassivação do aço que possuía cobertura de concreto de apenas 15 mm. Tong *et al.* (2012) realizaram procedimento de carbonatação em condições similares, mantendo os corpos de prova em câmara a 22°C pelo período de 2 meses até que a frente alcançasse profundidade de 22 mm.

Já González *et al.* (2011) utilizaram uma câmara de carbonatação com temperatura de 30 ± 2 °C, umidade relativa do ar entre 60 e 70 °C e concentração de CO₂ igual a $10 \pm 1\%$, onde os corpos de prova prismáticos com dimensões de 60x70x120 mm foram mantidos até que a profundidade de carbonatação medida fosse de 14 a 16 mm.

Após 180 dias de cura, corpos de prova prismáticos de concreto com duas barras de aço de 6,3 mm utilizados nos estudos de Ribeiro *et al.* (2013) foram carbonatados em câmara. As condições utilizadas para o processo de carbonatação foram de saturação da câmara com CO₂, umidade relativa de $75 \pm 5\%$ e temperatura de $28,5 \pm 1$ °C. Para monitorar o avanço da frente de carbonatação do concreto, corpos de prova cilíndricos foram submetidos às mesmas condições e fatiados para realização do teste de fenolftaleína. Junto à monitoração da carbonatação, medidas eletroquímicas foram verificadas para identificação da despassivação da armadura, indicado por potenciais de corrosão abaixo de -350 mV e densidades de corrente acima de $0,1 \mu\text{A}/\text{m}^2$. Os corpos de prova foram removidos da câmara de carbonatação quando identificada a despassivação das armaduras.

Cui *et al.* (2015) avaliaram a influência da concentração de CO₂, à qual corpos de prova de concreto eram expostos, na profundidade de carbonatação. As concentrações às quais os corpos de prova foram submetidos foram de 2, 10, 20, 50 e 100% em volume de CO₂. Como resultado, foi observado que as maiores taxas de avanço da frente de carbonatação ocorreram em corpos de prova submetidos a concentrações entre 2% a 10%. Quando avaliadas as faixas de concentração de 10-20%, 20-50% e 50-100% de CO₂ percebeu-se uma redução na taxa de avanço da frente de carbonatação. Com isso, os autores puderam concluir que até uma exposição de 20% na concentração de dióxido de carbono, o aumento na frente de carbonatação é notável. Acima de 20%, é possível que as rápidas mudanças na porosidade da primeira porção de concreto afetada pela carbonatação limitem a entrada do gás na peça, por deposição do produto carbonato de cálcio nos poros do concreto. Os menores avanços da frente de carbonatação foram observados em corpos de prova submetidos à concentração de 50 a 100% de CO₂.

2.2 CORROSÃO DAS ARMADURAS

2.2.1 Passividade do Aço

A ideia de utilizar aço em estruturas de concreto surgiu em 1867, quando a patente de tal procedimento foi concedida a Joseph Monier. Com a incorporação do aço, o concreto se tornou um material de inúmeras possibilidades, já que, além de sua resistência à compressão, estruturas feitas em concreto armado poderiam agora resistir também a esforços de flexão. Apesar de suas vantagens, a corrosão surgiu como um problema a ser combatido quando utilizado o aço em estruturas (DYER, 2014).

Além do fato de que a camada de cobertura de concreto sobre o aço age como uma barreira a entrada de agentes agressivos, a corrosão das armaduras presentes em concretos armados também pode ser considerada de difícil ocorrência devido ao ambiente de pH básico proporcionado pela alta alcalinidade da pasta de cimento. Tais características permitem a formação e manutenção de uma camada de proteção em torno do aço que fornece resistência à corrosão ao material (MIETZ, 1995; DYER, 2014).

A alta alcalinidade do concreto se deve a presença, em seus poros microscópicos, de altas concentrações de óxidos de cálcio (CaO), sódio (Na₂O) e potássio (K₂O) dissolvidos. A existência desses óxidos faz com que, na presença de água, hidróxidos como o de cálcio sejam formados, conferindo ao meio um pH alcalino de valores entre 12 e 13. (BANFILL, 1994; BROOMFIELD, 2007).

Esse ambiente alcalino permite a formação de uma camada passivadora em torno da barra de aço presente no concreto. Essa camada é formada em parte por óxidos/hidróxidos metálicos e minerais do cimento e se constitui de um filme denso e de baixa penetrabilidade, com espessura na ordem de 1 µm, que, se mantida, protege a armadura e reduz consideravelmente a velocidade de corrosão do aço (BROOMFIELD, 2007, DYER, 2014).

Estudos foram feitos com aço modificado com cromo (Cr) mantido em solução saturada de Ca(OH)₂ para avaliar a influência do Cr na formação da camada passivadora. Foi observado que o cromo inibe a formação da camada

passivadora durante as primeiras 72 h, mas que, após isso, um filme passivador ainda mais denso e compacto se forma. Segundo Liu *et al.* (2016), esse filme é composto por óxidos de ferro e cromo com espessura de 5 a 6 nm, divididos em duas camadas. Quanto maior o conteúdo de cromo presente no aço, maior a espessura da camada passivadora formada.

A estabilidade dessa camada, chamada passivadora, começa a ficar comprometida quando o pH do meio cai a valores abaixo de 11,5, resultado dos processos de carbonatação, ataque por cloretos e outros. A intensidade de ação desses agentes agressivos está ligada a fatores como a qualidade do concreto executado, suas características construtivas e o meio em que se encontra, comprometendo a durabilidade da proteção natural contra corrosão. A inexistência de uma camada passivadora pode acarretar problemas estruturais devido ao aumento da velocidade de corrosão das armaduras (MIETZ, 1995, DYER, 2014).

Em concretos carbonatados, o pH da pasta de cimento sofre redução, chegando a valores nos quais o meio não oferece mais as condições necessárias à manutenção da estabilidade da camada passivadora, sendo imprescindível a recuperação do pH alcalino da peça para prevenir o processo de corrosão da armadura (YEIH e CHANG, 2005).

Segundo manual da Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis (JSCE, 2007), estudos feitos em laboratório e análises de estruturas reais mostram que a corrosão do aço pode ocorrer até mesmo antes da profundidade de carbonatação exceder a espessura de cobrimento da armadura. Com uma diferença mínima de 10 mm entre o aço e a frente de carbonatação, poucas são as chances de ocorrer corrosão devido a carbonatação.

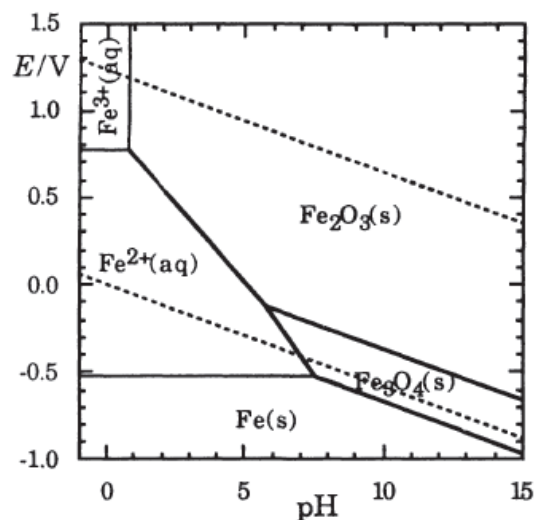
Revert *et al.* (2018) confirmam o início do processo de corrosão anteriormente a chegada da frente de carbonatação à armadura. Os autores sugerem que grandes espessuras de carbonatação podem gerar condições que possibilitem a ocorrência de corrosão localizada antes que a frente possa ser detectada na armadura. Também se destaca o fato de que, em alguns pontos, a profundidade de carbonatação pode ser maior do que a média, isso por diferenças na microestrutura do concreto.

2.2.2 Corrosão do Aço

A corrosão pode ser entendida, de maneira simples, como a perda de material ou deterioração de uma superfície metálica devido a reações eletroquímicas. Isso se torna um problema em estruturas de concreto armado, pois a perda de seção transversal afeta a capacidade do material em resistir a esforços, podendo tornar a estrutura frágil. É um processo eletroquímico que ocorre quando dois metais conectados entram em contato com a água resultando em uma perda de elétrons por parte do metal com maior potencial de corrosão (DYER, 2014; CHANG e GOLDSBY, 2013).

Em 1938, Marcel Pourbaix desenvolveu um compilado de diagramas que indicam a estabilidade termodinâmica das diversas fases de um sistema eletroquímico e suas fronteiras em função do potencial elétrico e do pH (OHRING, 1998; PEREZ, 2004). Analisando o diagrama de Pourbaix para o ferro (Fe) (Figura 2), é possível observar que este material está sujeito a oxidação em qualquer pH, quando em contato com a água e o gás oxigênio, sendo a sua corrosão inevitável se medidas preventivas não forem tomadas (RIEGER, 1994).

Figura 2 - Diagrama de Pourbaix para o ferro

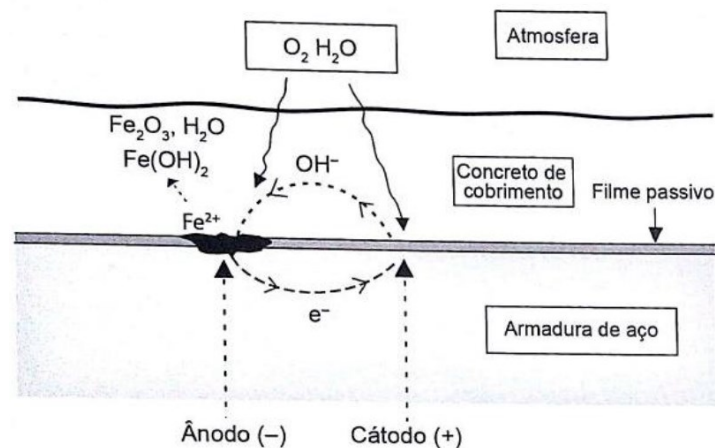


Fonte: RIEGER (1994)

As linhas horizontais presentes no diagrama apresentado na Figura 2 representam o equilíbrio eletroquímico independente da variação do pH, enquanto as linhas verticais representam o mesmo equilíbrio com relação a

variações no potencial elétrico (E). A região entre as linhas pontilhadas representa o domínio de estabilidade termodinâmica da água, onde ocorrem a maioria dos casos de corrosão. A região do ferro pode ser considerada de imunidade, onde o metal não corrói por estar abaixo do seu potencial de equilíbrio e onde existe o favorecimento da oxidação do oxigênio e do hidrogênio. A região onde pH e potencial elétrico são altos ocorre a passivação do metal devido à produção da camada de óxidos (Fe_3O_4 e Fe_2O_3), já as regiões de crescente potencial combinado a valores baixos de pH representam a tendência a corrosão do metal (ARAÚJO, PANOSSIAN e LOURENÇO, 2013; NUNES, 2016). O processo de corrosão, apresentado na Figura 3, envolve duas reações denominadas reações redox.

Figura 3 - Corrosão das armaduras

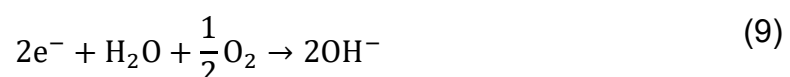


Fonte: BAROGHEL-BOUNY, CAPRA E LAURENS (2014)

A primeira reação de natureza anódica presente na Figura 3, denominada oxidação, é apresentada na Equação 8 (GONZÁLEZ *et al.*, 2000):



Seguido pela reação catódica, chamada redução, que utiliza os elétrons liberados, apresentada na Equação 9.



Séries galvânicas, como a apresentada no Quadro 1 abaixo, permitem que se identifique o metal com maior potencial de corrosão em um conjunto metálico (AHMAD, 2006; DYER, 2014).

Quadro 1 - Série galvânica

	Platina
	Ouro
	Grafita
	Titânio
↑	Prata
	Aço Inoxidável 316 (passivo)
	Aço Inoxidável 304 (passivo)
	Inconel 80Ni-13Cr-7Fe (passivo)
	Níquel (passivo)
	Monel 70Ni-30Cu
Progressivamente mais inerte	Ligas de Cobre-Níquel
(catódico)	Bronze (ligas Cu-Sn)
	Cobre
	Latões (ligas Cu-Zn)
	Inconel (ativo)
	Níquel (ativo)
	Estanho
	Chumbo
Progressivamente menos inerte	Aço Inoxidável 316 (ativo)
(Anódico)	Aço Inoxidável 304 (ativo)
	Ferro fundido
	Ferro e aço
	Ligas de alumínio
	Cadmio
	Alumínio comercialmente puro
	Zinco
↓	Magnésio e ligas de magnésio

Fonte: Adaptado de CALLISTER (2002)

Analisando o Quadro 1, observa-se que a utilização do zinco como metal de sacrifício em pintura sobre aço se deve ao fato do primeiro metal ser menos

inerte em comparação ao segundo. Assim, a pintura de zinco funciona como ânodo e o aço como cátodo no sistema, criando uma proteção adicional a camada passivadora da armadura contra o processo de corrosão.

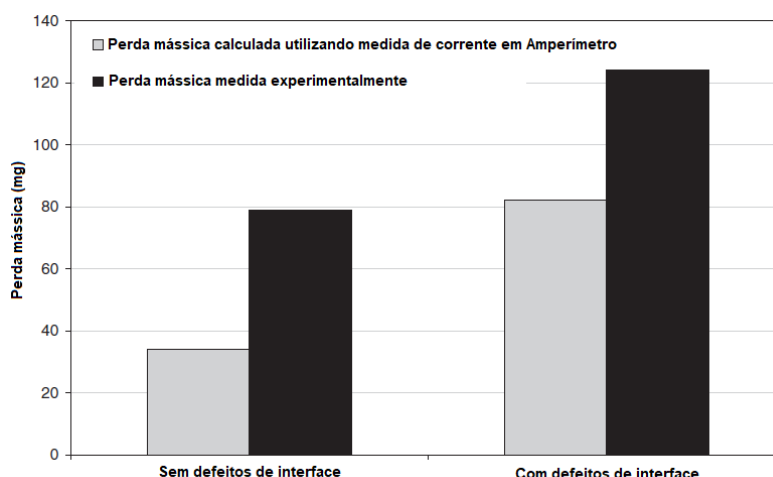
No caso da armadura de aço galvanizado utilizada em estruturas de concreto, o processo de corrosão eletroquímica é possível por diferenças de composição no material, regiões de tensão no material e concentração de oxigênio ou de eletrólitos na água (DYER, 2014).

A diferença de concentração de oxigênio no ambiente causa corrosão por pites, onde a parte do metal exposta a baixas concentrações de oxigênio se tornam mais anódicas, isto é, mais suscetíveis ao processo eletroquímico. O mesmo ocorre para um aço em contato com diferentes concentrações de eletrólito em água, onde o aço exposto a uma menor concentração também sofre oxidação. No caso de barras de aço sujeitas a esforços, as regiões tensionadas estão mais sujeitas ao processo, o que faz com que o processo de corrosão, nesse caso, seja mais importante em estruturas protendidas, onde os níveis de tensão são substancialmente maiores (DYER, 2014).

O processo de corrosão reduz a seção transversal das barras de aço utilizadas como armaduras em peças de concreto armado, o que leva a uma redução da resistência mecânica da peça. Além disso, os produtos provenientes da corrosão, por terem volumes muito maiores que os ocupados pelo metal original, criam tensões internas no entorno das barras, o que causa desagregação o concreto ali localizado (PAPADAKIS *et al.*, 1991).

Ao estudar a influência dos defeitos na interface aço-concreto sobre a corrosão das armaduras em concretos carbonatados, Nasser *et al.* (2010) chegaram à conclusão de que tais defeitos aceleram o processo de corrosão nas barras.

Figura 4 - Comparação entre a perda mássica medida experimentalmente e calculada.



Fonte: Adaptado de NASSER *et al.* (2010)

Em estudo experimental, os autores perceberam que a perda mássica devido à corrosão da armadura em região com defeitos na interface chegou a ser maior que 50% da perda ocorrida em armaduras em região sem defeitos, como é possível observar na Figura 4 (NASSER, *et al.*, 2010).

Apesar de não ser capaz de determinar se o processo de corrosão está ativo no aço, o mapeamento da resistividade em peças com corrosão mostra onde o processo está mais intensificado (POLDER, 2001).

A resistividade é uma propriedade que descreve a resistência elétrica, relacionando a potência aplicada e a corrente elétrica resultante em uma unidade de um dado material. Para o concreto, os valores de resistividade podem variar de 10^1 a 10^5 Ωm dependendo de fatores como a umidade e composição do material. Concretos porosos e com maior quantidade de água em seus poros apresentam valores de resistividade menores, enquanto para valores fixos de umidade o que influencia os valores de resistividade são a relação água/cimento, tempo de cura e uso de adições minerais (POLDER, 2001). Sendo inversamente proporcional a relação entre corrosão e resistividade, áreas onde o concreto possui valores baixos de resistência elétrica poderão apresentar maiores taxas de corrosão após afetadas, por exemplo, pela despassivação da armadura ocasionada por carbonatação (POLDER, 2001).

O uso de aço galvanizado por imersão a quente em armaduras é uma das maneiras existentes para aumentar a vida útil das barras submetidas à concretos carbonatados. Além da proteção extra com relação a carbonatação, a

camada de zinco que a armadura recebe também a confere maior resistência ao ataque por cloretos. Sistonen, Cwirzen e Puttonen (2008) estudaram a influência do material utilizado como armadura na durabilidade de estruturas de concreto armado submetidas ao meio. Os resultados confirmaram que a espessura da camada de zinco influencia no processo de corrosão.

Stefanoni, Angst e Elsener (2018) atentam para a necessidade de maiores estudos para análise sistemática sobre como a corrosão da armadura ocorre em concretos carbonatados produzidos com novas adições, a fim de prever com maior confiabilidade a vida útil dessas estruturas. A literatura revisada por estes autores mostra que a taxa de corrosão geralmente aumenta com a substituição do clínquer por adições.

2.3 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

2.3.1 Processo de Realcalinização

Os métodos eletroquímicos para a reabilitação de concretos armados comprometidos pela carbonatação foram desenvolvidos nas décadas de 1980 e 1990 como solução às desvantagens do método tradicional de substituição da porção afetada (MIETZ, 1995). Estes métodos se tornaram uma possibilidade à prevenção da rápida deterioração que estruturas de concreto armado sofrem em ambientes agressivos que resultam na corrosão de suas armaduras (MIRANDA *et al.*, 2006).

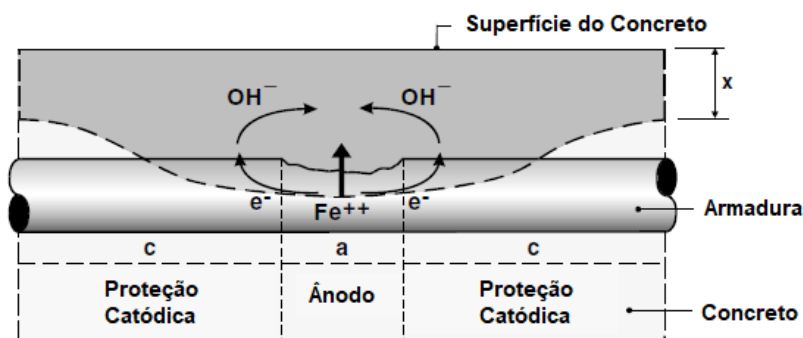
As técnicas de extração e realcalinização eletroquímicas são utilizadas, respectivamente, para reabilitação de peças de concreto armado afetadas por ataque de cloretos e carbonatação. Esses métodos apresentam a vantagem de serem mais rápidos que os processos degradantes, pois a migração de íons pelo campo elétrico utilizado se dá em maior velocidade que a difusão dos agentes agressivos externos (SIEGWART, LYNESS, MCFARLAND, 2003).

A realcalinização eletroquímica (RAE) é considerada um método não destrutivo de reabilitação que tem como objetivo restabelecer o pH alcalino da pasta de cimento. Apresenta-se como solução, principalmente, para fachadas históricas que não podem ser alteradas, peças estruturais esbeltas ou estruturas

onde o acréscimo de carga não é recomendado (MIETZ, 1995). Além da vantagem técnica, também se destaca em relação ao método de reparo tradicional, que consiste na substituição do concreto comprometido por um novo, por ser menos nociva ao meio ambiente e a saúde e segurança do trabalhador e da população no entorno (MIRANDA *et al.*, 2006).

Quando o método tradicional de reversão da carbonatação do concreto é utilizado em parte da estrutura, sem um estudo anterior sobre o tamanho da região de concreto afetada pela mudança de pH, podem surgir novos pontos de corrosão na armadura (RAUPACH, 2006). Na Figura 5, apresentada por Raupach (2006), é possível observar a região onde a profundidade de carbonatação é maior, já tendo atingido a superfície de armadura e facilitado o início do processo de corrosão.

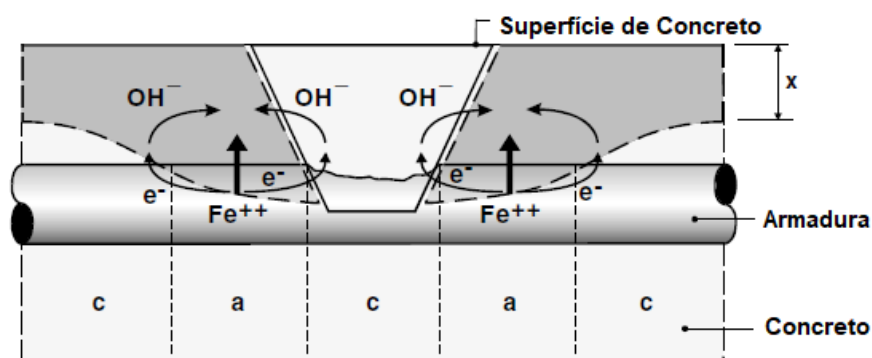
Figura 5 - Mecanismo de corrosão anterior ao reparo



Fonte: Adaptado de RAUPACH (2006)

Já na Figura 6, após a substituição do concreto afetado pela carbonatação por novo, surgem outras duas regiões mais suscetíveis à corrosão, resultado da substituição incompleta de concreto com pH reduzido. Isso ocorre, pois a região de ânodo de sacrifício onde a corrosão estava ocorrendo passa estar catodicamente protegida, mas parte do concreto carbonatado que não foi substituído continua em contato com outras regiões da armadura que sofrerão oxidação (RAUPACH, 2006).

Figura 6 - Mecanismo de corrosão posterior ao reparo



Fonte: Adaptado de RAUPACH (2006)

O método de realcalinização eletroquímica se baseia na passagem de uma corrente elétrica pelo concreto até a armadura interna através da utilização de uma malha metálica externa, geralmente aço ou titânio, funcionando como ânodo do sistema recobrindo a superfície da peça de concreto armado. Os ânodos são conectados em alguns pontos, através de uma fonte de corrente, à armadura interna da peça. Ao conectar a armadura ao polo negativo da fonte de corrente, essa se torna o cátodo do sistema. Uma solução de carbonato de sódio é normalmente utilizada como eletrólito, recobrindo ambas a malha e a peça (BANFILL, 1994; MIRANDA *et al.*, 2003, YEIH e CHANG, 2005).

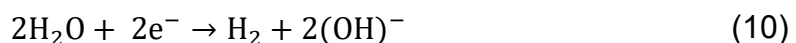
Para Banfil (1994), a corrente elétrica a ser utilizada deve ser de aproximadamente 1 A/m^2 . Já Mietz (1995) recomenda que o método seja aplicado durante 3 a 14 dias com uma densidade de corrente de $0,8$ a 2 A/m^2 .

Em contrapartida, Bertolini, Carsana e Redaelli (2006) discorrem que a profundidade de realcalinização resultante de uma dada corrente aplicada em um dado período depende de características do concreto, como tipo de cimento e relação água/cimento. Em experimento, foi comparada a eficácia do método de realcalinização mantendo-se a aplicação de uma corrente de 1 A/m^2 por 3 semanas em corpos de prova produzidos com relação água/cimento de $0,70$ e $0,55$. Observou-se que onde o concreto apresentava maior porosidade, isto é, a/c de $0,70$, as frentes de realcalinização interna e externa se encontravam, enquanto nos corpos de prova com a/c de $0,55$ havia ainda uma faixa carbonatada entre as frentes. Foi possível concluir que uma maior porosidade aumenta a difusividade em ambas as direções (da armadura para a superfície e o contrário).

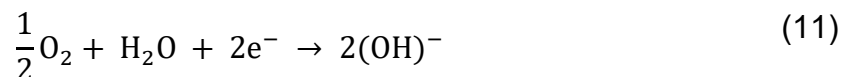
A principal consequência desejada da aplicação do método de realcalinização é o aumento do pH da pasta de cimento em torno da armadura presente na peça de concreto. Algumas desvantagens podem surgir da aplicação do método, como a redução da aderência, aumento do risco de reação álcali-agregado devido às maiores concentrações de sódio e potássio no concreto e mudanças na microestrutura da pasta de cimento que podem acarretar diferentes propriedades mecânicas e de durabilidade (BANFILL, 1994).

A penetração da solução alcalina na peça de concreto pode ocorrer através de três processos físicos: difusão simples dos íons por gradiente de concentração no concreto; migração dos íons carregados através do campo eletromagnético produzido entre o ânodo externo e o cátodo interno; movimento da solução por absorção direta ou por eletro osmose. Os mesmos são melhores descritos abaixo, apresentados nas Equações 10 a 14 e observados na Figura 7 (BANFILL, 1994; MIETZ, 1995):

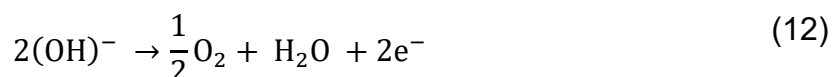
- Absorção do eletrólito por efeitos de capilaridade;
- Difusão dos componentes alcalinos devido ao gradiente de concentração;
- Migração dos íons pelo campo elétrico, sendo que os negativos se movem em direção ao ânodo (externo) e os positivos em direção ao cátodo (interno);
- Eletrólise nos eletrodos com geração de íons hidroxila (OH)⁻ em torno do cátodo (interno);



- Reações com gás oxigênio presente no concreto;

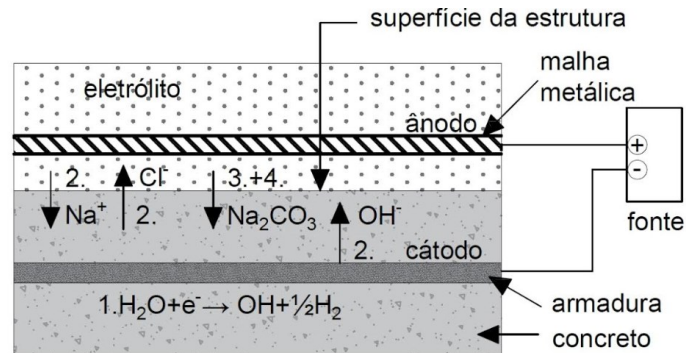


- Oxidação do ânodo (externo);



- Migração do eletrólito através do campo elétrico em direção ao cátodo (interno) em processo chamado eletro osmose.

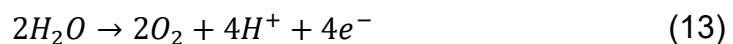
Figura 7 - Realcalinização Eletroquímica



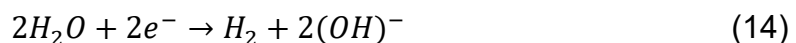
Fonte: Adaptado de YEIH e CHANG (2005)

Os tratamentos eletroquímicos tornam o aço catódico e geram íons hidroxila em torno do mesmo, o que fortalece a camada passivadora. Em casos mais severos, o processo de realcalinização pode gerar produtos nocivos à peça, como demonstrado nas Equações 13 e 14.

No ânodo:



No cátodo:



O hidrogênio (H_2) produzido em torno do cátodo, i.e. armadura, pode ser absorvido pelo mesmo e causar a perda de ductibilidade da barra, enquanto em concretos porosos a substância é liberada para a atmosfera através do processo de difusão (BANFILL, 1994).

A eletrólise ocorrida em torno da armadura faz com que o pH alcalino seja ali restabelecido, gerando condições à manutenção da camada passivadora. Por outro lado, a penetração do eletrólito na peça previne futuros

decréscimos no pH da peça a valores que provoquem o início da corrosão da armadura (MIETZ, 1995).

Em resumo ao funcionamento do método, a corrente aplicada produz alcalinidade na superfície da armadura, através da geração de íons alcalinos. Já a solução alcalina penetra no concreto através da superfície da peça em velocidade que é influenciada pelo nível de permeabilidade do concreto (BERTOLINI, CARSANA E REDAELLI, 2008).

Mudanças na temperatura influenciam os valores de resistividade da peça, sendo as duas inversamente proporcionais. Esse fenômeno se deve ao aumento da mobilidade iônica e das relações íon-íon e íon-sólido no concreto, facilitando a condução de corrente elétrica pelo meio, o que pode auxiliar a aplicação do método (POLDER, 2001).

Para superar as limitações da fonte de corrente contínua utilizada durante os ensaios de realcalinização eletroquímica, González *et al.* (2011) utilizaram potes de PVC onde os corpos de prova envoltos em malha de titânio foram parcialmente submergidos a fim de reduzir a resistência elétrica do material e facilitar a aplicação de corrente necessária.

Segundo González *et al.* (2000), o presente método é mais bem descrito como uma técnica protetiva ou preventiva, não sendo considerada de reabilitação por não ser capaz de restaurar as condições iniciais dos materiais concreto e armadura. Sua função é de prevenir a propagação da frente de carbonatação e não de reparar o dano já existente.

A maneira mais simples de se verificar a eficácia do método consiste em aspergir solução de fenolftaleína, um indicador de cor, sobre a superfície de concreto recém tratada. Durante esse teste, a não mudança de cor da superfície sugere a presença de pH ácido e, portanto, da carbonatação, já a coloração rosa indica um pH alcalino, logo, demonstrando o bom funcionamento do método de realcalinização (GONZÁLEZ *et al.*, 2000).

O sistema de realcalinização eletroquímica é aplicado apenas durante o tratamento. Terminada a aplicação, o sistema é desligado e a superfície permanece inalterada. Tal característica é de suma importância para reabilitação de edificações históricas, onde a manutenção da originalidade é o principal objetivo. Nesses casos, a substituição por materiais novos se dá apenas quando

o processo de corrosão já afetou a peça, causando fissuras e desagregação do concreto (BERTOLINI, CARSANA E REDAELLI, 2008).

2.3.2 Pesquisas Anteriores

Para Elsener (2001), o teste de potencial de meia-célula pode ser utilizado para verificar a eficiência e a durabilidade dos resultados obtidos com a aplicação da técnica de RAE. Para que a interpretação seja correta, é necessário levar em consideração que características como a condutividade e o pH do meio poroso do concreto sofreram alterações em comparação ao material carbonatado. Resultados negativos de potencial indicam a presença de armadura passivada no meio alcalino, mas não a presença de corrosão.

Em estudos desenvolvidos por Banfill (1994), as propriedades do concreto submetido ao método de realcalinização eletroquímica sofreram alterações condizentes ao com a deposição de material nos poros do concreto, provocando um aumento na densidade. Com um menor tamanho de poros, os processos de absorção decaíram, enquanto as resistências à compressão e flexão, o módulo de elasticidade e a velocidade no ultrassom aumentaram. Percebeu-se também que a tendência a reações expansivas de sílica-agregado reduziu.

Para mesmos valores de densidade de corrente aplicada, Yeih e Chang (2005) observaram que o pH do concreto aumenta com o aumento do período de aplicação do método de RAE. Para mesmos períodos de aplicação do método a eficácia do reestabelecimento da alcalinidade da peça aumenta com o aumento da densidade de corrente. Em seus estudos, os autores foram capazes de aumentar o pH do concreto para valores acima de 11, mas não de reestabelecer a alcalinidade inicial do material. Concluiu-se que a melhor relação corrente/tempo se baseia na aplicação de 1 A/m² de densidade de corrente por 3 a 14 dias para atingir o valor alvo de pH igual a 11.

Utilizando uma corrente de 1 A/m² e soluções alcalinas de carbonato de sódio (Na₂CO₃) e carbonato de potássio (K₂CO₃) com concentração 1 M, González *et al.* (2011) concluíram que, utilizando corpos de prova prismáticos de 6x7x12 cm, o início da recuperação do pH na superfície do concreto carbonatado

ocorreu após os 5 primeiros dias. No 13º dia de aplicação do método, a região carbonatada começou a apresentar coloração rosada, com a aspensão da solução de fenolftaleína, demonstrando um aumento de pH para valores acima de 9,5. Segundo os autores, o método de RAE pode ser aplicado de maneira preventiva em concretos parcialmente carbonatados. É ressaltada a importância das inspeções e manutenções de rotina em estruturas de concreto armado a fim de detectar patologias e aplicar técnicas de intervenção em tempo hábil.

Mietz (1995) afirma que o objetivo da técnica de realcalinização eletroquímica é de parar o processo de corrosão através de um método não destrutivo, restabelecendo a alcalinidade do concreto e gerando uma nova camada passivadora em torno da armadura atestada por polarização anódica. Segundo o autor, o sucesso maior do método se deu pela formação de íons hidroxila em torno da armadura interna, enquanto os mecanismos de eletro osmose foram os de menor importância. Apesar de ser um indicador de pH, concluiu-se por polarização anódica que testes realizados com fenolftaleína não são suficientes para comprovar o estado da superfície do aço quanto à possibilidade de repassivação. Apesar de confirmar os efeitos de repassivação da armadura, testes indicaram a não durabilidade da nova camada quando submetida novamente ao processo de carbonatação, sendo o efeito repassivador muito fraco para garantir uma nova camada passivadora estável.

Em contrapartida, González *et al.* (2000) consideram que o método de realcalinização eletroquímica é improvável de ser capaz de repassivar a armadura, pois para isso seria necessário remover todo o concreto e limpar a armadura, o que seria contraditório à sua característica não destrutiva. Os mesmos autores levantam o questionamento de como a RAE, método incapaz de reestabelecer o pH natural do concreto, seria capaz de recuperar a camada passivadora do aço se nem mesmo a substituição do concreto carbonatados por concreto novo é capaz de fazê-la.

Adicionalmente, Miranda *et al.* (2006) mostraram em sua pesquisa que concretos novos, sem presença do processo de carbonatação ou ataque por cloretos, não foram capazes de restabelecer a camada passivadora do aço que apresentava níveis de corrosão moderado a alto, durante a pesquisa. Por isso, foi concluído que a aplicação de técnicas de reabilitação eletroquímica não pode garantir a recuperação de armaduras já deterioradas pela corrosão, mesmo que

em condições ideais. Para os autores, as técnicas de realcalinização eletroquímica e extração de cloretos podem ser consideradas efetivas na prevenção da corrosão quando aplicadas antes que a frente de carbonatação ou os cloretos alcancem a armadura. Se aplicadas preventivamente e em repetição, tais técnicas podem postergar o início do processo de corrosão indefinidamente.

Bertolini, Carsana e Redaelli (2008) realizaram reparos nas colunas de concreto armado da torre do sino de uma igreja construída na década de 1920, utilizando realcalinização eletroquímica. Os elementos estruturais de concreto armado foram inspecionados, observando a profundidade de carbonatação das peças, o potencial de corrosão e o cobrimento do aço. As manifestações patológicas observadas eram, em sua maioria, em decorrência da corrosão das armaduras, causando desagregação do concreto. Para a aplicação do tratamento completo foi utilizada uma malha de aço galvanizado, material suscetível a oxidação. Os autores observaram que a contribuição do eletrólito sobre a realcalinização foi menor (realcalinização química), devido à baixa porosidade da peça, em comparação às reações ocorridas no entorno da armadura. Com isso, os autores concluíram que a proteção da armadura interna, após tratamento, se deve, em sua maioria, à produção de íons alcalinos no entorno das barras de aço, devido às reações eletroquímicas, protegendo-as do processo de corrosão.

Reou e Ann (2010) estudaram a influência do tratamento eletroquímico sobre a microestrutura da interface aço-concreto, levando em consideração mudanças na porosidade, concentrações de hidróxido de cálcio e C-S-H, além da existência de grãos de cimento não hidratados. Os mesmos chegaram à conclusão de que o tratamento aumentou em 12% a quantidade de hidróxido de cálcio presente na pasta, além de mostrar que tal composto não forma uma camada contínua na região de interface com a armadura. Também foi observado que a porosidade no entorno do aço aumenta com a aplicação da técnica eletroquímica e está relacionada a quantidade de corrente elétrica aplicada. Um maior número de grãos de cimento não hidratados e a menor concentração de C-S-H e outros produtos de hidratação nos corpos de prova sujeitos ao método também foram observados.

Tong *et al.* (2012) utilizaram uma malha produzida em liga de alumínio como ânodo de sacrifício para a aplicação da técnica de realcalinização

eletroquímica. O sistema foi mantido ligado pelo período de 33 dias, durante os quais a malha metálica foi consumida pelas reações de oxidação que ocorrem no ânodo. A manutenção da alcalinidade alcançada foi medida 12 meses após o término de aplicação da realcalinização eletroquímica, com redução na velocidade de corrosão das armaduras e sem sinais alteração na matriz cimentícia. Assim como em outros estudos já citados, a repassivação da armadura não pôde ser demonstrada.

Em 2020, Lachovicz estudou a influência da malha metálica utilizada no sistema de realcalinização eletroquímica, comparando o desempenho de três malhas metálicas, com mesmo diâmetro de fio e abertura: alumínio, aço galvanizado e aço inox. Em seu estudo, a malha de aço galvanizado foi a que apresentou o pior desempenho. Ambas as malhas de alumínio e aço inox resultaram na realcalinização dos corpos de prova de concreto, sendo que, após ensaio com fenolftaleína, a coloração do material relativo à primeira malha apresentou-se mais forte que o da segunda, indicando maior influência na reabilitação do pH. Apesar disso, a malha de alumínio foi consumida durante o processo de realcalinização, enquanto a de aço inox teve maior durabilidade, reflexo da posição do material na série galvânica (Quadro 1) sendo o alumínio menos inerte.

A fim de reduzir uma lacuna existente nos estudos sobre recuperação de concretos carbonatados, Ribeiro *et al.* (2013) estudaram a influência do tipo de cimento, relação água/cimento e cobertura da camada de concreto sobre o método de realcalinização eletroquímica e sua eficiência em repassar armaduras. Os autores utilizaram uma corrente de 2 A/m², malha de titânio e solução 1 M de carbonato de sódio. O estudo demonstrou que a eletrólise da água aparenta ser o principal fator para a realcalinização do concreto. Além disso, com o aumento da relação água/cimento, observou-se uma redução na resistividade do sistema, assim como o tempo necessário para tratamento completo das peças e corrente elétrica. Já o tipo de cimento mostrou influência na tendência de repassivação da armadura, sendo que uma menor alcalinidade da pasta demandaria maior tempo para desenvolvimento desta tendência.

Assim como nos estudos de Banfill (1994) e Bertolini, Carsana e Redaelli (2008), foi observado que a eletrólise no entorno da armadura aparenta ser o processo mais importante no reestabelecimento do pH alcalino ao redor das

armaduras. Concluiu-se que o tipo de cimento influencia na reserva de produtos alcalinos na pasta, sendo que quanto menor essa reserva (ex.: uso de adição pozolânica), maior o tempo e a corrente necessária para completar o tratamento. Os resultados apresentados no estudo corroboram com o citado no item 2.3.2 sobre a relação água/cimento ser inversamente proporcional à resistividade do concreto, facilitando o tratamento. Por fim, Ribeiro *et al.* (2013), concluem que quanto maior a camada de cobertura de concreto, maior o tempo de aplicação do método.

Zou *et al.* (2017) utilizaram traços contendo cinza volante e escória de alto forno nos estudos dos efeitos das adições minerais no avanço da frente de realcalinização e na resistência do concreto à carbonatação. Em ambos os casos, a profundidade da frente de realcalinização foi tão maior quanto a porcentagem de adição mineral presente no traço. Segundo os autores, no primeiro caso isso se deve à dificuldade das partículas de cinza volante em se combinarem aos produtos de hidratação do cimento, facilitando a penetração do eletrólito (frente externa). No segundo caso, o aumento da profundidade de realcalinização se deve a maior quantidade de componentes e óxidos metálicos da escória de alto forno, o que aumenta a condutividade elétrica do concreto (frente interna). Apesar de uma maior facilidade em serem realcalinizados, a pesquisa também mostrou que concretos contendo adições minerais também possuem menor resistência ao avanço da frente de carbonatação, o que condiz com os estudos apresentados por Khan e Lynsdale (2002) e Kurda, Brito e Silvestre (2019).

O estudo realizado por Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018) apresenta resultados que conflitam os de Zou *et al.* em 2017. No estudo mais recente foi observado que para concretos de cimento Portland, existe um aumento considerável na eficiência do método de realcalinização eletroquímica quando seu tempo de aplicação aumenta de 3 para 21 dias. O mesmo não ocorre para concretos com adição de metacaulim e cinza volante, que apresentam uma menor eficiência do método em relação ao concreto referência após 15 dias de aplicação da realcalinização. Para este estudo, os autores utilizaram solução alcalina de 1 M de carbonato de sódio, aplicando uma densidade de corrente de 1,0 A/m², envolvendo os corpos de prova em malha de aço inoxidável. Os autores também utilizaram o ensaio de análise termogravimétrica (ATG) para

avaliar a eficácia da técnica de RAE, esperando que uma perda mássica entre temperaturas de 600 °C a 850 °C, ou mais, demonstrassem a existência de carbonatos na amostra.

Com o intuito de restaurar prédios históricos e ao analisar a aplicação do método eletroquímico para tratamento de concretos afetados pela combinação da carbonatação com o ataque por cloretos, Tissier *et al.* (2019) observaram a agressividade dos dois processos sobre uma estrutura, quando simultâneos, em relação a concretos com ação de apenas um dos agentes externos. O método eletroquímico utilizado alcançou uma taxa de 90% de extração de cloretos e um aumento do pH para valores em torno de 10, o que mostrou a importância da elevação do pH sobre a velocidade de corrosão das armaduras. Apesar dos bons resultados, existem incertezas sobre a durabilidade do tratamento, pois a redução na taxa de corrosão e o aumento do pH não alcançaram valores iniciais.

Com o intuito de difundir a técnica de realcalinização química, que ocorre pela penetração dos íons alcalinos no meio, da superfície para o interior, Réus e Medeiros (2020) estudaram a eficiência de seis soluções e quatro métodos de aplicação das mesmas. Os resultados apresentados indicam que os métodos de imersão do concreto e cobrimento/envelopamento em substância alcalina foram os mais eficientes, aliados ao uso de soluções como as de KOH e NaOH.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental do presente estudo visa atender ao objetivo geral previamente determinado, ou seja, estudar a influência da densidade de corrente contínua e o período de sua aplicação na eficiência da técnica de realcalinização eletroquímica para matrizes cimentícias carbonatadas, bem como os objetivos específicos. Neste caso, foram utilizados corpos de prova moldados com argamassa para o estudo.

A fim de complementar os resultados obtidos, foram analisados fatores como a resistência à compressão dos corpos de prova em dois grupos: referência e carbonatados, além de ensaios de absorção, porosidade e possíveis mudanças microestruturais nas pastas de cimento submetidas ao processo, através de ensaios de porosidade por intrusão de mercúrio e análise termogravimétrica.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento Portland CP V-ARI-RS foi utilizado para a moldagem dos corpos de prova do presente estudo. Esse tipo de cimento foi escolhido por possuir elevada resistência inicial, o que faz com que o mesmo seja amplamente utilizado na confecção de peças estruturais em edificações onde há necessidade de desforma rápida.

O cimento utilizado foi doado por fábrica situada na região metropolitana de Curitiba e apresenta as características químicas, físicas e mecânicas descritas na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 - Ensaios Químicos: Boletim CP V-ARI-RS Agosto/2018

Parâmetros	Teores (%)			
	PF	MgO	SO ₃	RI
Limites da NBR 16697	≤ 6,5	N/A	≤ 4,5	N/A
Média	4,6	5,8	3,3	11,5
Desvio Padrão	0,5	0,1	0,2	1,4
Mínimo	3,7	5,4	2,8	9
Máximo	5,6	5,9	3,7	14,2

Fonte: Boletim de Ensaios de Cimento - Fabricante (2018)

Tabela 2 - Ensaios Físicos e Mecânicos: Boletim CP V-ARI-RS Agosto/2018

Parâmetros	Finura (%)		Blaine (cm ² /g)	Água de consi st. (%)	T pega (min)		Expa ns. a quent e (%)	Resistência à compressão (MPa)			
	#200	#325			início	fim		1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites da NBR 16697	≤ 6,0	N/A	≥ 3000	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	≥ 11,0	≥ 24,0	≥ 34,0	N/A
Média	0,1	1,1	5028	30,2	231	295	0,4	21,6	31,7	37,7	48,3
Desvio Padrão	0,1	0,6	145	0,4	17	20	0,4	1,1	1,3	1,1	1,2
Mínimo	0	0,6	4760	29,4	205	265	0	20,2	30,1	36	47,1
Máximo	0,3	2,4	5260	31	255	325	0,1	23,8	34,8	39,8	51,6

Fonte: Boletim de Ensaios de Cimento - Fabricante (2018)

Comparado ao valor mínimo limite da NBR 16697 (ABNT, 2018) apresentado na Tabela 2, o cimento CP V-ARI-RS apresenta alta resistência inicial, chegando a alcançar em média 10,6 MPa a mais de resistência. Isso pode ser explicado pelo alto valor resultante do método de Blaine (finura) que representa a superfície específica dos grãos, de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015), e está relacionado a velocidade das reações de hidratação do cimento. Quanto maior a superfície específica das partículas do cimento, maior a velocidade de hidratação do mesmo.

3.1.2 Aço

Barras de aço CA-60, diâmetro 4,2mm, foram utilizadas para a produção dos corpos de prova. As barras foram cortadas em pedaços de 13 cm de maneira

que, ao serem posicionadas dentro do corpo de prova, parte destas ficasse exposta e permitisse a conexão com os cabos elétricos. A escolha por esse tipo de aço se deve a ampla utilização no Brasil, o que confere ao conjunto argamassa/armadura maior proximidade com as características das construções existentes.

3.1.3 Areia

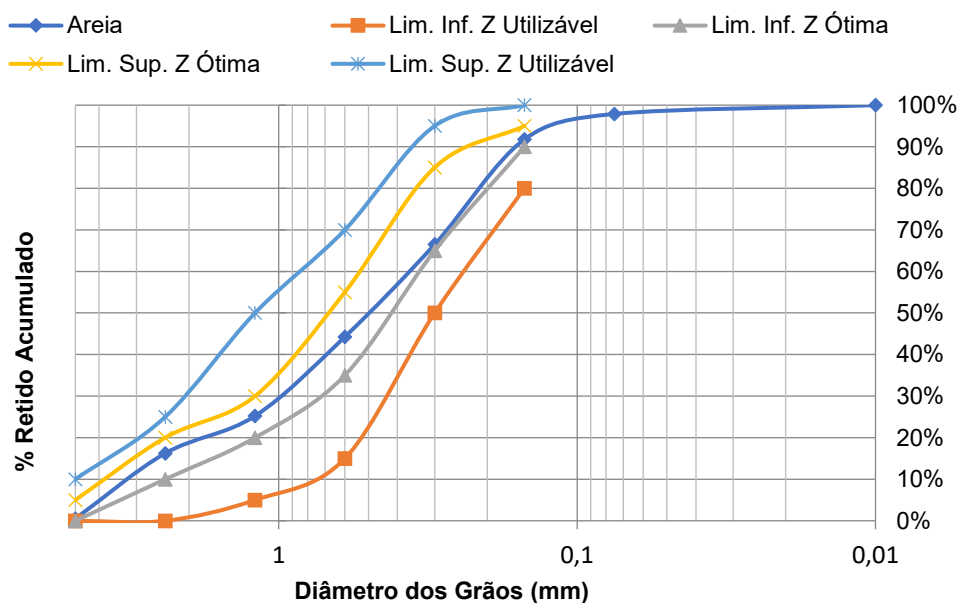
O agregado miúdo utilizado nessa pesquisa para a produção dos corpos de prova de argamassa foi uma areia de origem artificial, cujas propriedades físicas e curva granulométrica foram obtidas através de ensaios normatizados realizados na UTFPR e encontram-se descritas na Tabela 3 e Figura 8.

Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado miúdo

Ensaio	Norma (ABNT)	Resultado
Dimensão máxima do agregado (mm)	NBR NM 248/03	4,8
Módulo de finura	NBR NM 248/03	2,45

Fonte: Autoria própria

Figura 8 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Autoria própria

Comparando os resultados apresentados na Tabela 3, com a NBR 7211 (ABNT, 2019) e analisando o gráfico presente na Figura 8, é possível enquadrar a areia utilizada dentro da zona ótima, como uma areia média.

3.1.4 Malha Metálica e Feltro

Baseado nos estudos realizados por Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018) e Lachovicz (2020), optou-se pela utilização de malha metálica de aço inoxidável para a montagem do sistema de realcalinização eletroquímica, devido à facilidade de compra do material, além de eficácia e durabilidade demonstradas. A malha metálica foi cortada em pedaços retangulares com dimensões aproximadas de 0,17 m x 0,1 m, de maneira a envolver completamente as laterais dos corpos de prova de argamassa.

Um feltro geotêxtil sintético saturado em solução alcalina foi utilizado para envolver os corpos de prova (Figura 9).

Figura 9 - Malha metálica: Aço Inox e feltro geotêxtil



Fonte: Autoria própria

3.1.5 Solução Alcalina

A solução alcalina utilizada foi preparada misturando-se água com barrilha leve (Na_2CO_3) em pó em uma concentração de 5,3% em massa. Sendo a massa molar do carbonato de sódio de 106g/mol, produziu-se uma solução de

0,5 M (Figura 10). Apesar da literatura apontar a utilização de solução de 1 molar de Na_2CO_3 , durante o estudo observou-se que com a adição de 53 g em 1 l de água havia formação de precipitação da substância, indicando seu ponto de saturação.

Figura 10 - Barrilha leve



Fonte: Autoria própria

3.1.6 Fonte e Componentes Elétricos

Para a montagem da célula de realcalinização eletroquímica, uma fonte de corrente contínua de um canal com capacidade de 5 A foi utilizada (Figura 11). Cabos flexíveis nas cores preta e vermelha para ponta de prova com capacidade de 450/750 V com espessura de $1 \times 1,0 \text{ mm}^2$ foram utilizados nas conexões entre fonte, armadura e malha metálica de aço inoxidável.

Figura 11 - Fonte de corrente contínua



Fonte: Autoria própria

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Corpos de Prova

Um total de 72 corpos de prova cilíndricos de argamassa, dimensões 5x10 cm, foram produzidos. Deste total, 24 corpos de prova não foram armados, sendo que 18 deles foram denominados grupo referência e os outros 6 denominados grupo carbonatado. Os demais corpos de prova foram separados em grupos compostos por seis corpos de prova cada, denominados “misturas”, referentes às 7 combinações de densidade de corrente, sendo as misturas “A”, “B” e “C” referentes às correntes de 0,5 A/m², 1,0 A/m² e 1,5 A/m², respectivamente, e tempo (7, 14 e 21 dias) determinadas para o presente estudo, como indicado na Tabela 4. Os corpos de prova carbonatados utilizados no ensaio de absorção possuíam armadura e por isso não foram contabilizados como não armados.

Tabela 4 - Programação de corpos de prova

Mistura	I (A/m ²)	Tempo (dias)	Resistência			Absorção	RAE
			Ref. 28 dias	Ref. 720 dias	Carbonatado 720 dias		
Referência			6	6		6	-
Carbonatado				6		6	-
A 7D	0,5	7	-	-		-	6
A 14D	0,5	14	-	-		-	6
A 21D	0,5	21	-	-		-	6
B 7D	1	7	-	-		-	6
B 14D	1	14	-	-		-	6
C 7D	1,5	7	-	-		-	6
C 14D	1,5	14	-	-		-	6
TOTAL							72

Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Tabela 4, dentre os 18 corpos de prova do grupo referência, seis são destinados ao ensaio de resistência mecânica aos 28 dias, seis destinados ao ensaio de resistência mecânica em idade de carbonatação guardados em câmara úmida e seis destinados ao ensaio de absorção. Dentre os 12 corpos de prova do grupo carbonatado, seis são referentes ao ensaio de

resistência mecânica e seis referentes ao ensaio de absorção, ambos após carbonatação. Dos corpos de prova realcalinizados, os apresentados na Tabela 5 foram submetidos a ensaios complementares.

Tabela 5 - Programação de Ensaios

CPs	Porosimetria	TG
6A 7D	x	x
1A 14D	x	x
3A 14D	x	x
6A 14D	x	x
6A 21D	x	x
6B 7D	x	x
1B 14D	x	x
3B 14D	x	x
6B 14D	x	x
6C 7D	x	x
1C 14D	x	x
3C 14D	x	x
6C 14D	x	x
Carbonatado	x	x

Fonte: Autoria própria

Conforme demonstrado na Tabela 5, por limitações de tempo, apenas a corrente de 0,5 A/m² foi aplicada na técnica de realcalinização eletroquímica por 21 dias. Devido, também, a limitações orçamentárias, foram escolhidas 1 amostra de cada corrente aplicada durante 7 dias e 3 amostras de cada corrente aplicada durante 14 dias, sendo elas referentes aos corpos de prova 1, 3 e 6. Considerando a influência da carbonatação e da realcalinização eletroquímica sobre propriedades como absorção, os corpos de prova submetidos à 14 dias de aplicação da técnica devem apresentar maiores diferenças na microestrutura da pasta de cimento.

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios complementares de porosimetria por intrusão de mercúrio e análise termogravimétrica. Para cada ensaio, foram colhidas uma amostra externa, exposta ao processo de realcalinização química e uma amostra interna exposta ao processo de realcalinização eletroquímica.

3.2.2 Definição do Traço

Com a intenção de se produzir uma argamassa com características propícias à penetração acelerada de dióxido de carbono, isto é, com alta porosidade, optou-se por um traço com alto teor de areia e relação água/cimento.

O consumo de cimento utilizado para essa pesquisa foi de 314 kg/m³ de argamassa, com uma relação a/c de 0,65 e traço de 1:6:0,65. Com isso, foi necessário a utilização de 4,88 kg de cimento, 29,27 kg de areia e 3,17 kg de água, produzindo um volume total de 15,6 litros de argamassa.

3.2.3 Moldagem e Cura

Moldes metálicos de dimensões 5x10 cm foram utilizados para a produção dos corpos de prova de argamassa, tamanho escolhido para replicar de maneira aproximada o cobrimento nominal mínimo da armadura de 2,5 cm em lajes para a classe de agressividade II, ambiente urbano, descrita na NBR 6118 (ABNT, 2014), apresentado na Tabela 6, condição compatível com a cidade de Curitiba-PR.

Tabela 6 - Espessura de cobrimento

Tipo de Estrutura	Componente ou Elemento	Classe de Agressividade Ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo		30	40	50

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014)

Para a moldagem dos corpos de prova necessários, os materiais cimento e areia foram separados de forma a respeitar a capacidade mássica de 2500 g de material seco da argamassadeira utilizada no estudo. Para cada argamassada foram separados em sacos plásticos um total de 550 g de CP V-ARI-RS e 1650 g de areia, totalizando 2200 g de material seco, referente a

quantidade de 5 corpos de prova. Anteriormente a adição de água em argamassadeira, os materiais secos foram misturados, visando uma melhor homogeneização da argamassa de cimento resultante.

Os corpos de prova foram moldados em 4 camadas e compactados com 30 golpes em cada camada, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019). Após a compactação da última camada, foi inserida uma barra de aço de 4,2 mm de diâmetro e comprimento aproximado de 13 cm no centro de cada corpo de prova a ser realcalinizado para futura conexão do sistema elétrico (Figura 12).

Figura 12 - Corpos de prova com barra de aço central



Fonte: Aatoria própria

Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados. Os corpos de prova do grupo referência foram dispostos em prateleira dentro de câmara úmida até a idade do ensaio de resistência a compressão, os demais corpos de prova foram colocados em câmara de carbonatação.

3.2.4 Carbonatação

Em tentativa inicial (Figura 13), foi utilizado um tambor plástico com mecanismo de vedação composto por uma tampa translúcida de encaixe e uma tampa superior azul de rosquear. O cilindro de CO₂ foi conectado ao tambor

através de uma tubulação flexível e a quantidade de gás liberada foi controlada por uma válvula ligada a um relógio medidor de vazão. Após alguns meses de exposição, notou-se que apenas os corpos de prova localizados no fundo do tambor apresentavam níveis de carbonatação. Segundo o site Mundo Educação (FOGAÇA, 2020), o ar consiste em uma mistura gasosa entre gás nitrogênio (78%), gás oxigênio (21%) e outros gases (1%), com massa molar aparente de 28,9 g/mol, enquanto o gás carbônico possui massa molar de 44 g/mol. Com isso, acredita-se que a situação foi devida ao acúmulo do gás carbônico no fundo da câmara plástica, justificada pela diferença de 1,52 vezes da densidade relativa entre o CO₂ e o ar.

Figura 13 - Câmara de carbonatação inicial



Fonte: Autoria própria

Uma nova câmara de carbonatação (Figura 14) foi construída utilizando MDF revestido externamente e internamente por fibra de vidro coberta por resina de poliuretano. A porta possui uma janela em acrílico transparente que permite a visualização dos corpos de prova e controle das condições ambientes sem necessidade de abertura. Em seu interior, uma serpentina feita em tubulação de cobre 3/16" com pequenos furos ao longo da sua extensão, conectada ao cilindro externo de CO₂, permite uma liberação mais homogênea do gás sobre os corpos de prova. Um sistema eletrônico montado em um Arduíno registra a temperatura, umidade e concentração de CO₂ no interior da câmara a cada minuto. Para que o CO₂ não acumule no fundo, foram instaladas duas ventoinhas, como as

utilizadas em computadores, posicionadas na base da câmara de carbonatação mantendo uma circulação constante do gás, reduzindo a sua precipitação.

Figura 14 - Nova câmara de carbonatação



Fonte: Aatoria própria

Os corpos de prova foram dispostos em prateleiras vasadas para que todos pudessem estar em contato com a atmosfera rica em CO_2 e permanecem na câmara de carbonatação de junho de 2019 até junho de 2021, quando ocorreu a utilização dos mesmos para aplicação do processo de realcalinização eletroquímica e realização dos demais ensaios. A câmara foi ajustada três vezes por semana para que a concentração de dióxido de carbono (CO_2) no seu interior fosse mantida. O ajuste se dava através da abertura da válvula de controle do cilindro à uma vazão de 8 l/min pelo tempo de 1 minuto. Na Tabela 7 são apresentados os valores médios de umidade, temperatura e concentração de CO_2 mantidos na câmara de carbonatação e aos quais os corpos de prova foram submetidos.

Tabela 7 - Condições ambientes da câmara de carbonatação

Umidade (%)	Temperatura (°C)	Concentração CO_2 (%)
78	23	8,29

Fonte: Aatoria própria

3.3 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

3.3.1 Preparo dos Corpos de Prova

No intuito de reduzir a resistividade do concreto e facilitar a condução de corrente pelo sistema, os corpos de prova foram previamente saturados em água. Após a saturação, uma serra circular foi utilizada para cortar o corpo de prova transversalmente, a 1 cm da base. Este corte foi realizado para verificar o estágio de carbonatação dos corpos de prova após terem sido mantidos em câmara de carbonatação por 24 meses.

Na Figura 15, é apresentada a maneira como os corpos de prova foram identificados. Para cada combinação de corrente e tempo, os corpos de prova foram identificados entre “A”, “B” e “C”, sendo “A” submetido a $0,5 \text{ A/m}^2$, “B” a 1 A/m^2 e “C” a $1,5 \text{ A/m}^2$. Os corpos de prova também foram numerados de maneira que o CP 1 estivesse conectado ao polo positivo da fonte (malha) e o CP 6 conectado ao polo negativo da fonte (armadura).

Figura 15 - Corpos de prova após preparo



Fonte: Autoria própria

Após o corte e a identificação dos corpos de prova, os mesmos foram secos superficialmente com um pano e aspergidos com solução de fenolftaleína para verificar a eficácia do processo de carbonatação. Na Figura 15 pode-se observar que apenas o CP 1 apresentou coloração rosada (indicativo de pH básico) em baixa intensidade e os demais permaneceram sem alteração (indicativo de pH ácido).

3.3.2 Montagem do Sistema

A montagem do sistema de realcalinização eletroquímica foi feita de acordo com os seguintes passos e de acordo com a Figura 16 e a Figura 17:

- Saturação de feltro e papel superabsorvente para cozinha em solução alcalina de concentração 5 %;
- Envolvimento de cada corpo de prova conectado ao sistema em feltro saturado;
- Posicionamento de malha metálica sobre o feltro saturado, cobrindo toda a superfície lateral dos corpos de prova;
- Utilização de papel superabsorvente saturado em solução sobre malha metálica;
- Envolvimento do corpo de prova com folha plástica para reduzir a evaporação;

Figura 16 - Preparação dos corpos de prova



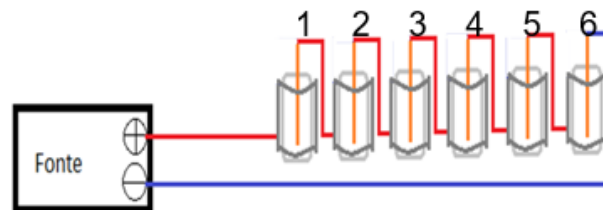
Fonte: Autoria própria

- Conexão do cabo de coloração preta entre polo negativo da fonte de corrente contínua e a armadura do último corpo de prova conectado ao sistema (CP 6);
- Conexão do cabo de coloração vermelha entre o polo positivo da fonte de corrente contínua e a malha metálica envolta no primeiro corpo de prova conectado ao sistema (CP 1);

- Conexão entre corpos de prova feita com cabo para ponta de prova de cor vermelha realizada entre a armadura anterior e a malha metálica envolta no seguinte;

- Conexão entre a armadura do último corpo de prova e o polo negativo da fonte feita com cabo de ponta de prova na cor preta.

Figura 17 - Montagem do sistema de realcalinização

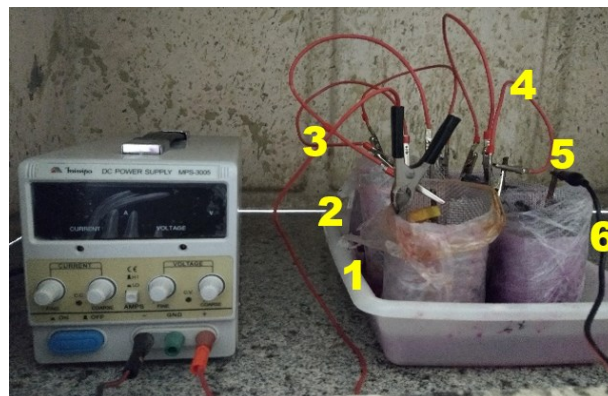


Fonte: Autoria própria

O sistema (Figura 18) foi montado em série, pois dessa maneira todos os corpos de prova receberiam a mesma corrente devido ao caminho dos elétrons do sistema ser único. Nesse caso, pode ter ocorrido variação nos valores de tensão aplicada sobre cada corpo de prova, se a resistividade dos mesmos for diferente. Isso ocorre pela corrente (I) ser diretamente proporcional a tensão (V) segundo a lei de Ohm, representada pela Equação 15.

$$V = R * I \quad (15)$$

Figura 18 - Sistema de RAE montado



Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova, como mostrado na Figura 18, foram dispostos sempre na mesma sequência de 1 a 6, com 1 conectado ao polo positivo e 6 ao polo negativo, a fim de comparar o efeito da realcalinização sobre os corpos de prova de mesma numeração e as diferenças entre as posições adotadas.

3.3.3 Processo de Realcalinização

Para cada combinação de densidade de corrente aplicada ($0,5 \text{ A/m}^2$, 1 A/m^2 e $1,5 \text{ A/m}^2$) e tempo (7, 14 e 21 dias) foram conectados seis corpos de prova em série à fonte de corrente contínua. A corrente foi ajustada diariamente de acordo com a Tabela 8 e como mostrado na Figura 19.

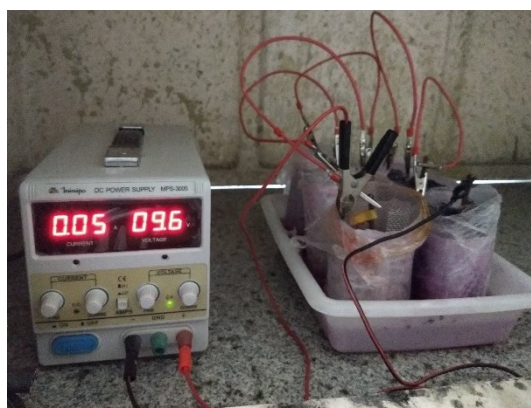
Os valores de corrente foram calculados com base na área da superfície dos 6 corpos de prova cilíndricos envolta pelo feltro saturado em solução alcalina, coberto pela malha metálica e finalizado pelo plástico filme para evitar a evaporação da solução.

Tabela 8 - Ajustes de corrente

Área (m^2)		Corrente (A)		
1 CP	6 CPs	$0,5 \text{ A/m}^2$	1 A/m^2	$1,5 \text{ A/m}^2$
0,02	0,09	0,05	0,09	0,14

Fonte: Autoria própria

Figura 19 - Sistema de realcalinização eletroquímica: Mistura A - $0,5 \text{ A/m}^2$



Fonte: Autoria própria

A capacidade de entrega de corrente elétrica ao sistema de realcalinização eletroquímica foi mantida através da saturação dos corpos de

prova, o que faz com que a resistividade do meio sofra redução. A saturação ocorreu antes da ligação do sistema elétrico e foi mantida pelo filme plástico envolvido em torno de cada corpo de prova já em contato com o feltro saturado em solução alcalina, malha metálica e papel superabsorvente.

3.4 MÉTODOS DE ENSAIO

3.4.1 Absorção

Os ensaios de absorção dos corpos de prova de argamassa foram realizados de acordo com a NBR9778 (ABNT, 2005). Foram escolhidos seis corpos de prova do grupo referência (28 dias) e seis do carbonatado.

As amostras foram, primeiramente, colocadas em estufa à temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ e após 72 horas a massa seca (m_s) de cada um dos corpos de prova foi aferida, como mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Massa do corpo de prova em situação seca



Fonte: Autoria própria

Seguinte as medidas de massa, os corpos de prova foram imersos em tanque com água e lá permaneceram por outras 72 horas até sua completa saturação, quando foram retirados, secos com pano e suas massas foram novamente aferidas (m_{sat}), como mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Massa do corpo de prova situação saturada



Fonte: Autoria própria

3.4.2 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) utilizando-se uma prensa localizada nos laboratórios do Campus Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os corpos de prova foram rompidos em amostras compostas por 6 espécimes com o uso de base de neoprene para melhor ajuste das cargas sobre a área de aplicação das mesmas.

O primeiro ensaio de resistência foi realizado após 28 dias de cura em câmara úmida sem submersão utilizando seis dos corpos de prova *referência* com o intuito de verificar a resistência característica para a realização do presente estudo.

Após o período de carbonatação dos corpos de prova mantidos em câmara, foram realizados ensaios de resistência à compressão em seis corpos de desses corpos de prova com o objetivo de identificar se houve impacto do processo de consumo dos álcalis da pasta de cimento, ocasionado pelo CO₂, sobre a resistência mecânica dos corpos de prova expostos ao gás, como consequência da diminuição da porosidade da argamassa descrita na literatura.

3.4.3 Medidas de Carbonatação

Para verificar a profundidade de carbonatação, os corpos de prova a serem realcalinizados foram cortados transversalmente, com o auxílio de uma

serra circular, aproximadamente 1cm acima de sua base, de maneira a se extrair uma “bolacha” do corpo de prova.

Após o corte, os seis corpos de prova a serem utilizados foram aspergidos com solução de 1% de fenolftaleína a fim de se observar a profundidade de carbonatação atingida durante o período na câmara, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Corpos de prova "C" fatiados com aspersão de fenolftaleína



Fonte: Autoria própria

Ao final do processo de realcalinização eletroquímica, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral com o intuito de se verificar o grau de realcalinização dos corpos de prova após aplicação do método.

Novamente, utilizou-se a solução de fenolftaleína para verificar a eficácia do método de realcalinização eletroquímica sobre os corpos de prova de argamassa utilizados no estudo (Figura 23).

Figura 23 - Verificação da eficácia do método com uso de fenolftaleína em grupo “7D B”



Fonte: Autoria própria

3.4.4 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado no Campus Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A faixa de pressão do equipamento pode variar de 0,2 a 33.000 psi, com a faixa de tamanho dos poros variando de 1100 μm a 0,0064 μm . O equipamento utiliza ar sintético a 60 psi e temperatura de 20 °C.

As amostras apresentadas na Tabela 5 foram ensaiadas a fim de se entender a influência do processo de carbonatação e posterior realcalinização eletroquímica sobre as matrizes cimentícias.

3.4.5 Análise Termogravimétrica

O ensaio de análise termogravimétrica foi realizado no Campus Ecoville da Universidade Tecnológica Federal. A temperatura do equipamento possui configuração indicada de 25 °C a 1000 °C com taxa de 10 °C/min.

O equipamento é constituído por uma balança eletrônica, funcionando pelo princípio de zero constante, possuindo tara automática e sensibilidade de 0,01gr. Pode-se utilizar amostras de cerca de 5 a 10 g, moídas, acondicionadas em cadinho de níquel, suspenso por haste de alumina. Além da balança, um forno tubular com núcleo de alumina possui sistema de aquecimento realizado por resistência metálica solidária a concreto refratário, com isolamento de fibra cerâmica, podendo atingir temperaturas até 1200 °C.

A análise termogravimétrica de uma amostra permite que a sua massa seja medida ao longo do tempo, concomitantemente ao aumento de temperatura, gerando gráficos indicativos de perda de massa.

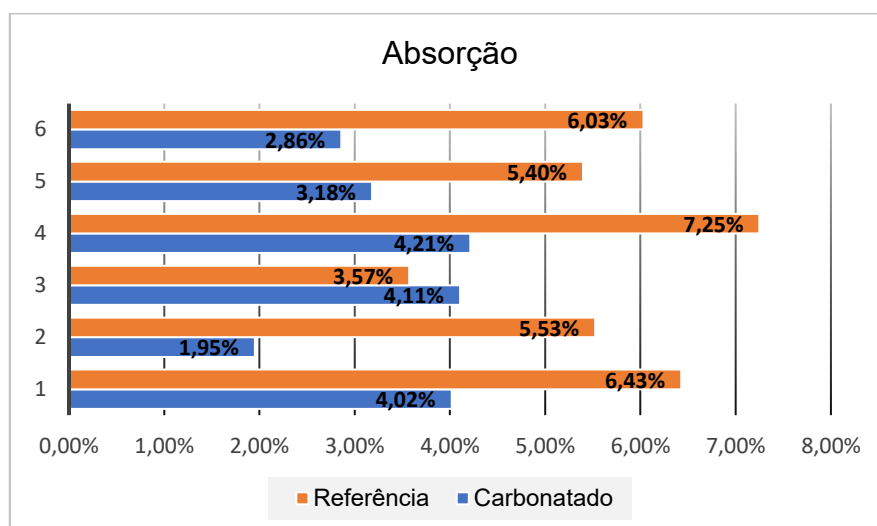
RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 ABSORÇÃO

Seis corpos de prova do grupo *referência* e seis corpos de prova do grupo carbonatado foram ensaiados quanto à absorção, seguindo os procedimentos descritos na NBR 9778 (ABNT, 2005).

Os resultados obtidos por meio do ensaio de absorção são apresentados na Figura 24 e na Tabela 9.

Figura 24 - Ensaio de Absorção em CPs Referência e Carbonatado



Fonte: Autoria própria

Tabela 9 - Dados do ensaio de absorção

Corpo de prova (CP)	Referência 28 dias (%)	Carbonatado (%)
Média	5,70	3,39
Desvio Padrão	0,012	0,009
Coef. Variação (%)	21,75	26,31

Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico presente na Figura 24 observa-se que a absorção dos corpos de prova *referência*, isto é, não carbonatados, aparenta ter sido maior que a absorção medida nos corpos de prova do grupo *carbonatado*, indicando uma maior porosidade. Ao realizar a análise de variância pelo método ANOVA,

utilizando o software *Past 4*, apresentando $p < 0,005$, foi possível constatar que, de fato, o comportamento das argamassas de *referência* e *carbonatada* neste ensaio foi diferente, com uma confiabilidade de 95%. A análise é apresentada no Apêndice A. Este resultado corrobora com a teoria de que o processo de carbonatação reduz a porosidade do concreto por deposição das partículas de carbonato de cálcio, fechando seus poros, demonstrado nos estudos realizados por Morandeu, Thiéry e Dangla (2014), Cui *et al.* (2015) e Zhan *et al.* (2019).

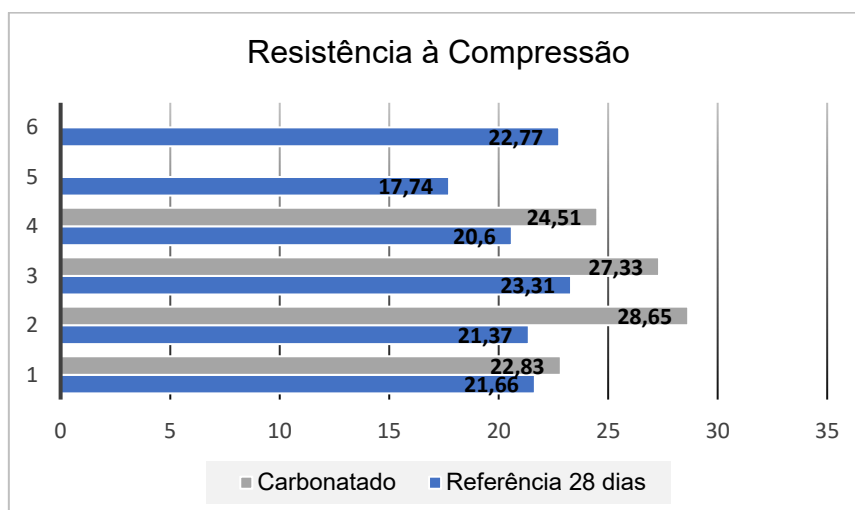
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A fim de avaliar se o processo de carbonatação das estruturas de concreto tem influência sobre a resistência à compressão da argamassa de cimento, os corpos de prova foram ensaiados.

Os corpos de prova do grupo referência foram ensaiados aos 28 dias para obtenção da resistência característica do traço de argamassa utilizado para os experimentos. Após 720 dias, outros 4 corpos de prova referência foram também ensaiados e apresentaram resultados de resistência à compressão menores que aos 28 dias, com diferença estatística evidenciada por teste ANOVA realizado com o software *Past 4*. Como o cimento utilizado na mistura foi de alta resistência inicial, a premissa de que o incremento de resistência dos corpos de prova após os 28 dias pode ser desconsiderado foi adotada. Os corpos de prova *carbonatado* foram ensaiados após dois anos em câmara de carbonatação.

Os resultados obtidos por meio dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova referência aos 28 dias e carbonatados são apresentados na Figura 25 e na Tabela 10.

Figura 25 - Ensaio de Resistência à Compressão em CPs Referência e Carbonatado



Fonte: Autoria própria

Tabela 10 - Dados do ensaio de Resistência a Compressão

Corpo de Prova (CP)	Referência 28dias	Carbonatado
	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
Média	21,2	25,83
Desvio Padrão	2,0	2,642
Coef. Variação (%)	9,292	10,23

Fonte: Autoria própria

Na Figura 25 é possível observar que os valores de resistência à compressão dos corpos de prova *carbonatado* aparentam ser ligeiramente maiores que os dos corpos de prova *referência* a 28 dias. Isso seria devido ao efeito da redução de porosidade causada pela cristalização dos produtos do processo de carbonatação, o que levaria a um aumento na resistência mecânica, considerando que, quanto menor a porosidade, maior a resistência.

Ao realizar análise de variância pelo método ANOVA, utilizando o software *Past 4*, apresentando $p < 0,005$, foi possível constatar que os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova *referência* a 28 dias e *carbonatado* podem ser considerados estatisticamente diferentes, com uma confiabilidade de 95%. A análise é apresentada no Apêndice A.

Portanto, é possível afirmar que o processo de carbonatação elevou a resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa como consequência da redução na porosidade da matriz cimentícia.

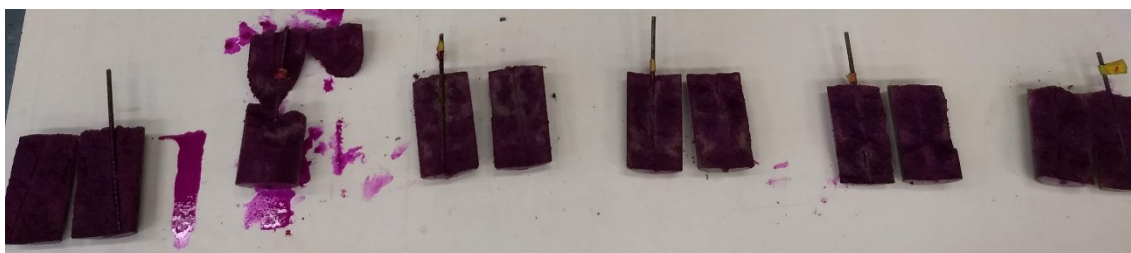
4.3 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

4.3.1 Corpos de Prova

Após a aplicação do processo de realcalinização eletroquímica sobre os corpos de prova carbonatados, durante 7, 14 e 21 dias para a corrente de densidade $0,5 \text{ A/m}^2$ e 7 e 14 dias para as densidades de corrente $1,0 \text{ A/m}^2$ e $1,5 \text{ A/m}^2$, os mesmos foram rompidos por compressão diametral com a intenção de se verificar a eficácia do processo. Após rompidos, utilizou-se solução de fenolftaleína para indicar se o pH do material havia sido reestabelecido.

Na Figura 26 a Figura 31, são apresentados os corpos de prova com aspersão de solução de fenolftaleína após a realcalinização eletroquímica.

Figura 26 - CPs de 1 a 6 - 7 dias - $0,5 \text{ A/m}^2$



Fonte: Autoria própria

Figura 27 - CPs de 1 a 6 - 14 dias - $0,5 \text{ A/m}^2$



Fonte: Autoria própria

Figura 28 - CPs de 1 a 6 - 21 dias - 0,5 A/m²



Fonte: Aatoria própria

Figura 29 - CPs de 1 a 6 - 7 dias - 1,0 A/m²



Fonte: Aatoria própria

Figura 30 - CPs de 1 a 6 - 14 dias - 1,0 A/m²



Fonte: Aatoria própria

Figura 31 - CPs de 1 a 6 - 7 dias - 1,5 A/m²



Fonte: Aatoria própria

Ao observar os corpos de prova presentes da Figura 26 à Figura 31, referente aos corpos de prova após aplicação do método RAE e aspersão de fenolftaleína, percebe-se que a coloração atingida, indicativa do

reestabelecimento do pH neutro, demonstrou a eficácia do processo de realcalinização eletroquímica.

Não foram observadas, visualmente, diferenças significativas de coloração entre os grupos A, B e C, o que pode indicar que a utilização da corrente de $0,5 \text{ A/m}^2$ durante 7 dias é suficiente para o reestabelecimento do pH.

Notam-se diferenças de coloração entre os corpos de prova de 1 a 6, o que pode ser indicativo de que ligar estruturas em série a uma única fonte de corrente contínua não seja tão eficaz. A exemplo, na Figura 28, referente a corrente de $0,5 \text{ A/m}^2$ aplicada por 21 dias, o CP1 apresenta coloração rosada em sua região mais externa, o que indica a eficácia do processo de realcalinização química que ocorre da superfície para o interior através da penetração da solução alcalina na matriz cimentícia. Os CPs 2, 3 e 4 apresentam coloração mais homogênea por toda sua extensão, indicando a ação de ambos os processos de realcalinização química e eletroquímica. Já os CPs 5 e 6 apresentaram coloração rosada apenas na região no entorno da armadura e na base do corpo de prova, o que indica a reversão do pH para neutro pelo processo de RAE e o efeito da RAQ através da absorção por capilaridade da solução existente no fundo da bandeja onde foram posicionados os corpos de prova.

Condições similares são observadas nos demais grupos de corpos de prova realcalinizados.

4.3.2 Malha Metálica

Após processo de realcalinização eletroquímica, observou-se que a malha metálica do corpo de prova 6, isto é, conectado ao polo negativo pela armadura, apresentou corrosão, provocando manchas de coloração marrom alaranjadas que atingiram a matriz cimentícia, mesmo com o feltro protegendo o corpo de prova (Figura 32).

Figura 32 - Corpo de prova 6C 7D após realcalinização (1,5 A/m²)



Fonte: Autoria própria

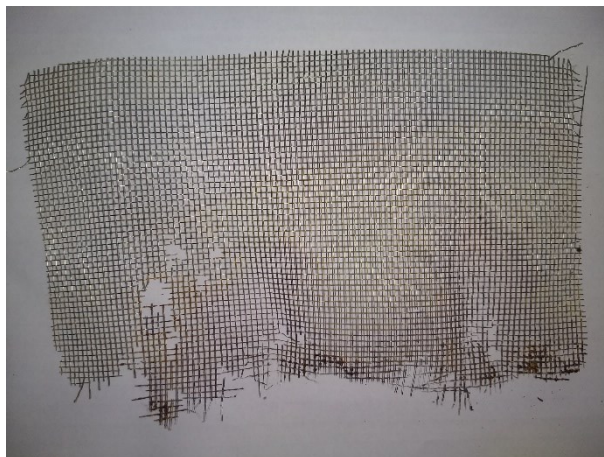
A intensidade da corrosão foi tanto maior quanto mais prolongada a aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica sobre os corpos de prova, como é possível observar na Figura 33, na Figura 34 e na Figura 35, referentes à situação da malha após aplicação da menor densidade de corrente contínua (0,5 A/m²) durante 7, 14 e 21 dias.

Figura 33 - Malha de aço após 7 dias com aplicação de corrente de 0,5 A/m²



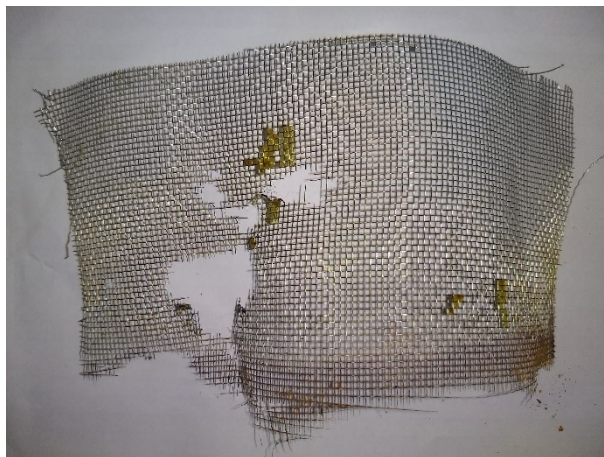
Fonte: Autoria própria

Figura 34 - Malha de aço após 14 dias com aplicação de corrente de 0,5 A/m²



Fonte: Autoria própria

Figura 35 - Malha de aço após 21 dias com aplicação de corrente de 0,5 A/m²



Fonte: Autoria própria

Após 21 dias de aplicação de 0,5 A/m² (Figura 35) nos seis corpos de prova conectados em série ao sistema de realcalinização eletroquímica, observou-se que boa parte da malha de aço inoxidável havia sido consumida.

Este fenômeno foi observado em todas as combinações de tempo e densidade de corrente e apenas no corpo de prova conectado ao polo negativo, pelo cabo preto, com a armadura.

Considerando que os elétrons produzidos pela reação de oxidação do ânodo se movimentam em direção ao polo positivo, malha metálica do último corpo de prova se comporta como metal de sacrifício, sendo a primeira a ser consumida em um sistema ligado em série.

4.4 POROSIMETRIA

Os valores de porosidade total provenientes dos resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio realizados nas amostras 1, 3 e 6 mantidas 14 dias em processo de realcalinização eletroquímica são apresentados na Tabela 11. Para o cálculo da média foram desconsiderados os valores referentes às amostras 1B 14D E, 1C 14D I e 6A 14D E, sendo E para amostras retiradas da região mais externa no corpo de prova e I da região mais interna, próxima à armadura. Os demais valores em amarelo foram considerados como dados espúrios e não compuseram a análise estatística ANOVA.

Tabela 11 - Porosidade total (%)

Amostras	0,5 A/m²	1,0 A/m²	1,5 A/m²
1 14D E	3,81	324,35	4,75
1 14D I	2,93	2,67	23,05
3 14D E	3,26	3,94	2,41
3 14D I	2,69	3,54	4,94
6 14D E	3,04	15,18	4,15
6 14D I	3,70	3,94	3,43
Média	3,15	3,74	4,15
Des. Padrão	0,44	0,60	1,04
Limite Mín.	2,71	3,14	3,11
Limite Máx.	3,59	4,33	5,18
Carbonatado		2,72	

Fonte: Autoria própria

Ao realizar análise de variância pelo método ANOVA, utilizando o software *Past 4*, foi possível constatar, com $p > 0,005$, que existe diferença estatística entre os resultados de porosidade total do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio dos grupos de amostra, conforme apresentado no Apêndice A.

Os valores na Tabela 12, apresentados acima da diagonal principal são referentes às diferenças observadas entre as estimativas das médias dos tratamentos, enquanto os valores abaixo da diagonal principal referem-se à probabilidade mínima para que as diferenças sejam consideradas significativas (p-valores). Destacam-se as comparações significativas na matriz.

Tabela 12 - Comparação estatística entre grupos

	A	B	C
A		0,209	0,02546
B	2,684		0,3822
C	4,877	2,008	

Fonte: Autoria própria

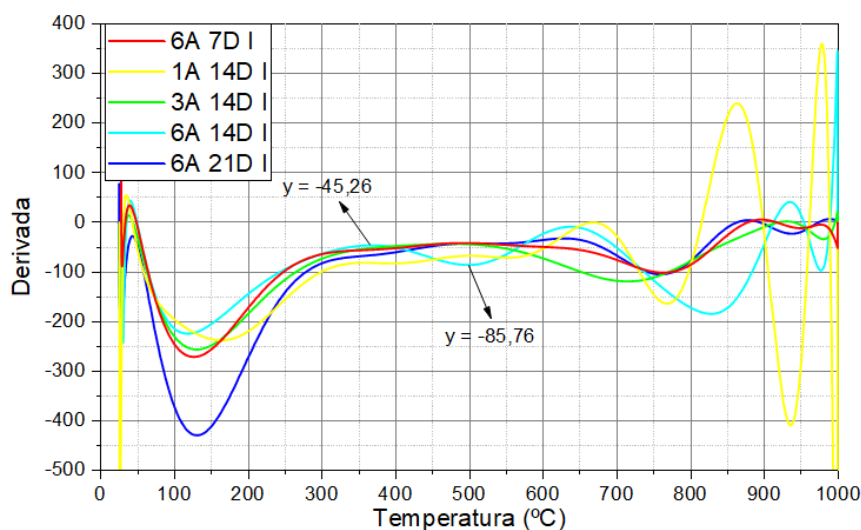
Em termos de porosidade após a realcalinização observa-se, na Tabela 12 que os grupos de amostra “A” (0,5 A/m²) e “B” (1,0 A/m²) são estatisticamente iguais, assim como os grupos de amostra “B” e “C” (1,5 A/m²), mas que existe diferença estatística entre os grupos de amostra “A” e “C”.

Estando o valor de porosidade total da amostra carbonatada dentro dos limites mínimo e máximo da amostra “A”, apresentados na Tabela 11, entende-se que a densidade de corrente de 1,0 A/m² representa o valor de transição a partir do qual as partículas de carbonato de cálcio formadas durante o processo de carbonatação começam a reagir devido aos processos de realcalinização eletroquímica (em torno da armadura) e realcalinização química (parte externa dos corpos de prova), aumentando a porosidade da matriz cimentícia para valores mais próximos aos originais.

4.5 Análise Termogravimétrica

Os resultados obtidos através do ensaio de Análise Termogravimétrica realizado nas amostras realcalinizadas eletroquimicamente dos grupos “A” (0,5 A/m²), “B” (1,0 A/m²) e “C” (1,5 A/m²), porções externas (face) e internas (armadura) dos corpos de prova, são apresentados da Figura 36 à Figura 41. Com base nos gráficos plotados com os resultados do ensaio de ATG, foram destacados os valores referentes aos picos e vales que ocorrem nas temperaturas de 430 °C e 500 °C e de 600°C - 850°C, apresentados da Tabela 13 à Tabela 17, e marcados em amarelo os que representam as maiores diferenças. Os gráficos apresentados na Figura 36 e na Figura 37 demonstram exemplos dos locais onde foram verificados os valores do eixo Y.

Figura 36 - ATG para densidade de corrente 0,5 A/m² - Mistura A - Amostras internas



Fonte: Autoria própria

Tabela 13 - Variações máximas no eixo Y - Mistura A - Amostras Internas

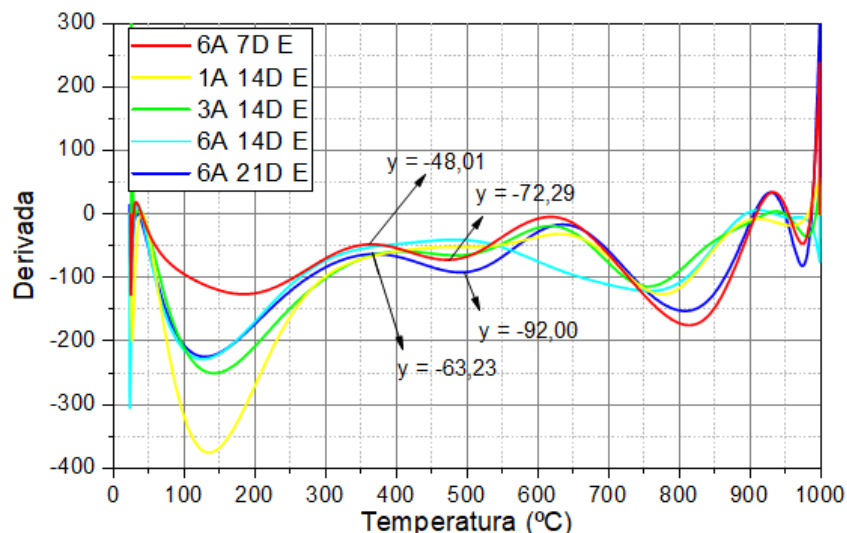
0,5 A/m ²	430°C - 550°C			600°C - 850°C			%
	Dmáx	Dmín	Diferença	Dmáx	Dmín	Diferença	
6A 7D I	-	-	-	-41,95	-103,87	61,92	0
1A 14D I	-	-	-	-0,98	-162,95	161,97	0
3A 14D I	-	-	-	-41,95	-118,41	76,46	0
6A 14D I	-45,26	-85,76	40,5	-8,5	-183,63	175,13	18
6A 21D I	-	-	-	-33,38	-103,87	70,49	0

Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 36 e os dados apresentados na Tabela 13, observa-se que as amostras retiradas da porção interna dos corpos de prova submetidos a densidade de corrente de 0,5 A/m² apresentaram oscilações mássicas menos acentuadas à temperaturas próximas a 500 °C que à temperaturas próximas a 800 °C. Apenas a amostra 6A 14D I apresentou variação perceptível no eixo Y, com diferença de 40,5, indicando perda mássica entre as temperaturas de 430 °C e 500 °C, correspondente ao início da reversão do carbonato de cálcio em hidróxido de cálcio utilizando esta densidade de corrente durante a aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica dos corpos de prova de argamassa. Em temperaturas entre 600 °C e 850 °C, observou-se perda mássica em todas as amostras, referente à calcinação do CaCO₃, produto do processo de carbonatação ao qual as amostras foram submetidas anteriormente, sendo as perdas mais expressivas referentes às

amostras 1A 14D I e 6A 14D I, com diferenças de 161,97 e 175,13, respectivamente.

Figura 37 - ATG para densidade de corrente 0,5 A/m² - Mistura A - Amostras externas



Fonte: Autoria própria

Tabela 14 - Variações máximas no eixo Y - Mistura A - Amostras Externas

0,5 A/m ²	430°C - 550°C			600°C - 850°C			%
	Dmáx	Dmín	Diferença	Dmáx	Dmín	Diferença	
6A 7D E	-48,01	-72,29	24,28	-4,73	-175,19	170,46	12,5
1A 14D E	-	-	-	-32,05	-126,3	94,25	0
3A 14D E	-59,03	-63,72	4,69	-19,1	-114,14	95,04	4,7
6A 14D E	-	-	-	-40,58	-121,14	80,56	0
6A 21D E	-63,23	-92	28,77	-17,87	-152,8	134,93	17,6

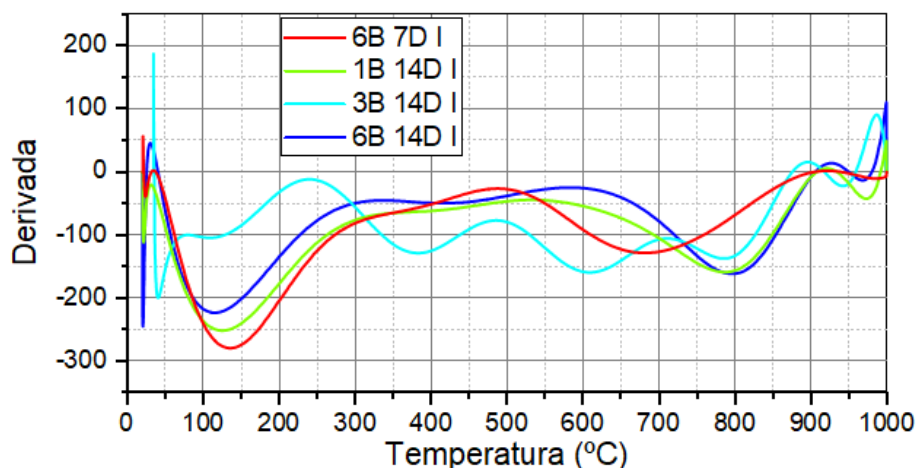
Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 37 e os dados apresentados na Tabela 14, observa-se que as amostras retiradas da porção externa dos corpos de prova submetidos a densidade de corrente de 0,5 A/m² também apresentaram oscilações mássicas menos acentuadas à temperaturas próximas à 500 °C que à temperaturas próximas à 800 °C. As amostras 6A 7D E, 3A 14D E e 6A 14D E apresentaram variação perceptível no eixo Y, com diferenças de 24,28, 4,69 e 28,77, respectivamente, indicando perda mássica entre as temperaturas de 430 °C e 500 °C, correspondente ao início da reversão do carbonato de cálcio em hidróxido de cálcio utilizando esta densidade de corrente

durante a aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica dos corpos de prova de argamassa. Em temperaturas entre 600 °C e 850 °C, observou-se perda mássica em todas as amostras, referente à calcinação do CaCO_3 , produto do processo de carbonatação ao qual as amostras foram submetidas anteriormente, sendo as perdas mais expressivas referentes às amostras 6A 7D E e 6A 21D E com diferenças de 170,46 e 134,93, respectivamente.

Dentre os representantes do grupo A, com aplicação de densidade de corrente de 0,5 A/m², a amostra 6A 14D I apresentou resultados que indicam as maiores quantidades de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio, sendo que a amostra 6A 7D E apresentou resultados que indicam a segunda maior quantidade de carbonato de cálcio.

Figura 38 - ATG Amostras para densidade de corrente 1,0 A/m² - Mistura B - Amostra Interna



Fonte: Autoria própria

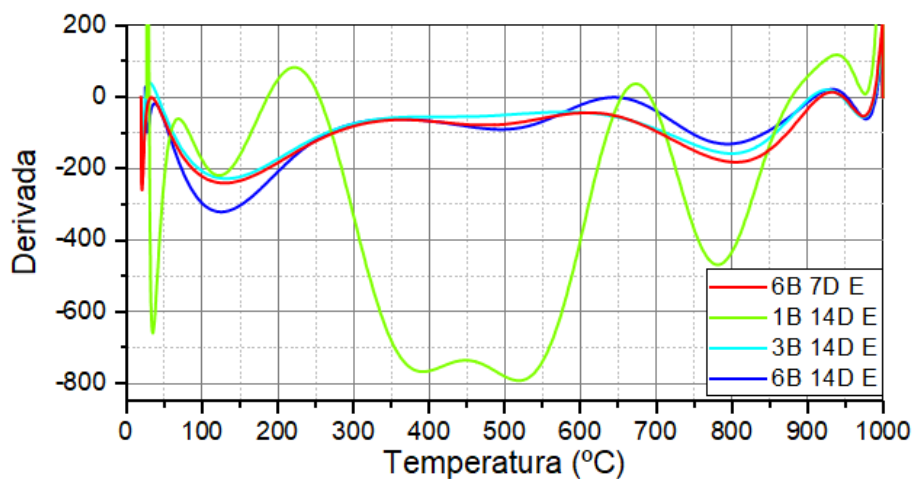
Tabela 15 - Variações máximas no eixo Y - Mistura B - Amostras Internas

1,0 A/m ²	430°C - 550°C			600°C - 850°C			%
	Dmáx	Dmín	Diferença	Dmáx	Dmín	Diferença	
6B 7D I	-	-	-	-26.3	-128.15	101.85	0
1B 14D I	-	-	-	-44.91	-128.15	83.24	0
3B 14D I	-11.49	-128.4	116.91	-76.88	-159.02	82.14	58,7
6B 14D I	-45.44	-48.96	3.52	-24.61	-161.19	136.58	2,5

Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 38 e os dados apresentados na Tabela 15, observa-se que apenas duas amostras retiradas da porção interna dos corpos de prova submetidos a densidade de corrente de $1,0 \text{ A/m}^2$ apresentaram oscilações mássicas à temperaturas próximas a $500 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto todas as amostras apresentaram oscilações à temperaturas próximas à $800 \text{ }^\circ\text{C}$. A amostra 3B 14D I apresentou a maior variação, com diferença de 116,91, indicando perda mássica entre as temperaturas de $430 \text{ }^\circ\text{C}$ e $500 \text{ }^\circ\text{C}$, correspondente ao início da reversão do carbonato de cálcio em hidróxido de cálcio utilizando esta densidade de corrente durante a aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica dos corpos de prova de argamassa. Em temperaturas entre $600 \text{ }^\circ\text{C}$ e $850 \text{ }^\circ\text{C}$, observou-se perda mássica em todas as amostras, referente à calcinação do CaCO_3 , produto do processo de carbonatação ao qual as amostras foram submetidas anteriormente, sendo as perdas mais expressivas referentes às amostras 6B 14D I e 6B 7D I, com diferenças de 136,58 e 101,85, respectivamente.

Figura 39 - ATG Amostras para densidade de corrente $1,0 \text{ A/m}^2$ - Mistura B - Amostra Externa



Fonte: Autoria própria

Tabela 16 - Variações máximas no eixo Y - Mistura B - Amostras Externas

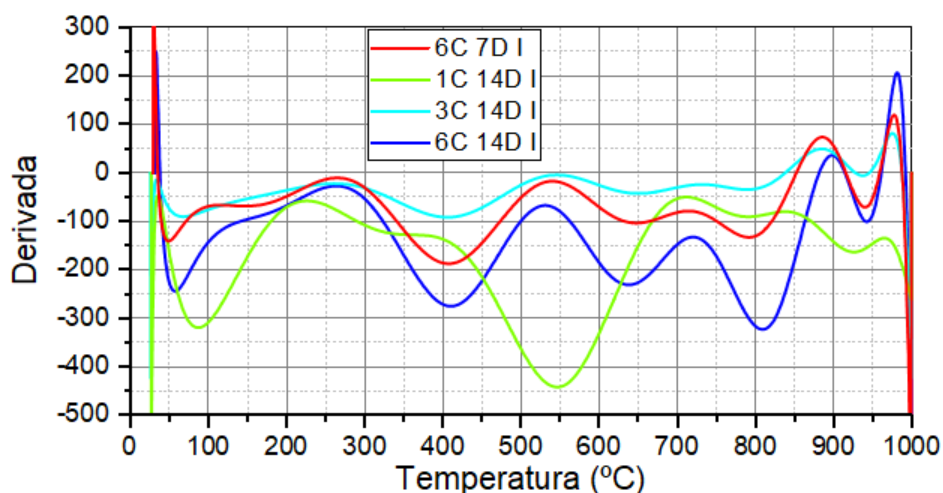
1,0 A/m ²	430°C - 550°C			600°C - 850°C			%
	Dmáx	Dmín	Diferença	Dmáx	Dmín	Diferença	
6B 7D E	-61.01	-77.62	16.61	-44.54	-180.67	136.13	10,9
1B 14D E	83.19	-790.07	873.26	37.78	-466.77	504.55	63,4
3B 14D E	-	-	-	-44.54	-156.88	112.34	0
6B 14D E	-61.01	-89.11	28.1	-0.19	-130.18	129.99	17,8

Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 39 e os dados apresentados na Tabela 16, observa-se que as amostras retiradas da porção externa dos corpos de prova submetidos a densidade de corrente de 1,0 A/m² já apresentaram oscilações mássicas acentuadas à temperaturas próximas a 500 °C. As amostras 6B 7D E, 1B 14D E e 6B 14D E apresentaram variação perceptível no eixo Y, com diferenças de 16,61, 873,26 e 28,1, respectivamente, indicando perda mássica entre as temperaturas de 430 °C e 500 °C, correspondente ao início da reversão do carbonato de cálcio em hidróxido de cálcio utilizando esta densidade de corrente durante a aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica dos corpos de prova de argamassa. Em temperaturas entre 600 °C e 850 °C, observou-se perda mássica em todas as amostras, referente à calcinação do CaCO₃, produto do processo de carbonatação ao qual as amostras foram submetidas anteriormente, sendo a perda mais expressiva referente à amostra 1B 14D E com diferença de 504,55.

Dentre os representantes do grupo B, com aplicação de densidade de corrente de 1,0 A/m², a amostra 1B 14D E apresentou as maiores diferenças em ambas as faixas de temperatura. Apesar disso, a diferença entre o gráfico desta amostra e os demais gráficos plotados a partir dos dados coletados de termogravimetria indicam a possibilidade de erro durante o ensaio. Sendo assim, considera-se que os valores apresentados pela amostra 3B 14D I indicam as maiores quantidades de hidróxido de cálcio, enquanto os valores das amostras 6B 14D I e 6B 7D E indicam as maiores quantidades de carbonato de cálcio.

Figura 40 - ATG para densidade de corrente 1,5 A/m² - Mistura C - Amostra Interna



Fonte: Autoria própria

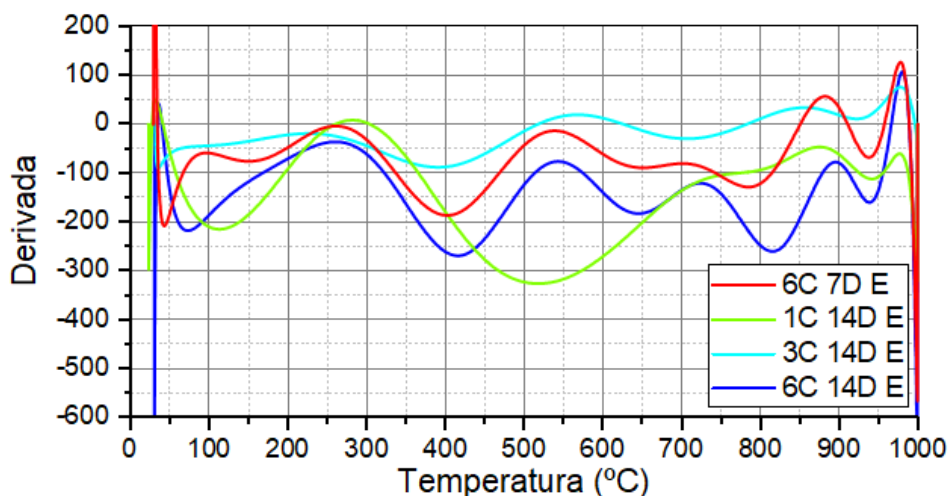
Tabela 17 - Variações máximas no eixo Y - Mistura C - Amostras Internas

1,5 A/m ²	450°C - 550°C			600°C - 850°C			%
	Dmáx	Dmín	Diferença	Dmáx	Dmín	Diferença	
6C 7D I	-10.2	-186.8	176.6	-17.05	-102.95	85.9	67,3
1C 14D I	-57.35	-123	65.65	-	-	-	100
3C 14D I	-22	-91.08	69.08	-3.93	-42.09	38.16	64,4
6C 14D I	-26.78	-273.71	246.93	-66.93	-230.18	163.25	60,2

Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 40 e os dados apresentados na Tabela 17, observa-se que as amostras retiradas da porção interior dos corpos de prova submetidos a densidade de corrente de 1,5 A/m² apresentaram oscilações mássicas tanto à temperaturas próximas à 500 °C quanto à temperaturas próximas à 800 °C. As amostras 6C 7D I e 6C 14D I apresentaram variações perceptíveis no eixo Y, com diferenças de 176,6 e 246,93, respectivamente, indicando perdas mássicas entre as temperaturas de 430 °C e 500 °C, correspondente ao início da reversão do carbonato de cálcio em hidróxido de cálcio utilizando esta densidade de corrente durante a aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica dos corpos de prova de argamassa. Em temperaturas entre 600 °C e 850 °C, observou-se perda mássica em 3 das 4 amostras, referente à calcinação do CaCO₃, produto do processo de carbonatação ao qual as amostras foram submetidas anteriormente, sendo a perda mais expressiva referente à amostra 6C 14D I, com diferenças de 163,25.

Figura 41 - ATG para densidade de corrente $1,5 \text{ A/m}^2$ - Mistura C - Amostra Externa



Fonte: Autoria própria

Tabela 18 - Variações máximas no eixo Y - Mistura C - Amostras Externas

$1,5 \text{ A/m}^2$	450°C - 550°C			600°C - 850°C			%
	Dmáx	Dmín	Diferença	Dmáx	Dmín	Diferença	
6C 7D E	-4.12	-185.49	181.37	-13.56	-128.37	114.81	61,2
1C 14D E	7.78	-325.75	333.53	-	-	-	100
3C 14D E	-19.23	-88.03	68.8	19.15	-29.66	48.81	58,5
6C 14D E	-36.23	-268.52	232.29	-77.03	-259.88	182.85	56,0

Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 41 e os dados apresentados na Tabela 18, observa-se que as amostras retiradas da porção externa dos corpos de prova submetidos a densidade de corrente de $1,5 \text{ A/m}^2$ também apresentaram oscilações mássicas tanto à temperaturas próximas à $500 \text{ }^\circ\text{C}$ quanto à temperaturas próximas à $800 \text{ }^\circ\text{C}$. As amostras 6C 7D E, 1C 14D E e 6C 14D E apresentaram variações perceptíveis no eixo Y, com diferenças de 181,37, 232,29 e 333,53, respectivamente, indicando perda mássica entre as temperaturas de $430 \text{ }^\circ\text{C}$ e $500 \text{ }^\circ\text{C}$, correspondente ao início da reversão do carbonato de cálcio em hidróxido de cálcio utilizando esta densidade de corrente durante a aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica dos corpos de prova de argamassa. Em temperaturas entre $600 \text{ }^\circ\text{C}$ e $850 \text{ }^\circ\text{C}$, observou-se perda mássica em 3 das 4 amostras, referente à calcinação do CaCO_3 , produto do

processo de carbonatação ao qual as amostras foram submetidas anteriormente, sendo as perdas mais expressivas referentes às amostras 6C 14D I e 6C 14D E com diferenças de 163,25 e 182,85, respectivamente.

Dentre os representantes do grupo C, com aplicação de densidade de corrente de $1,5 \text{ A/m}^2$, a amostra 1C 14D E apresentou resultados que indicam as maiores quantidades de hidróxido de cálcio, enquanto a amostra 6C 14D E apresentou resultados que indicam a maior quantidade de carbonato de cálcio.

Considerando que a soma das diferenças em ambas as temperaturas representa a quantidade de carbonato de cálcio existente e revertido em hidróxido de cálcio, a combinação de tempo com densidade de corrente de maior eficácia possui as maiores porcentagens. Com isso, destacam-se os valores apresentados pelas amostras submetidas a $1,5 \text{ A/m}^2$ durante 14 dias, sendo que as amostras internas - onde houve eletrólise - possuem as maiores porcentagens.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo geral estudar a influência da densidade de corrente contínua e o período de sua aplicação na eficiência da técnica de realcalinização eletroquímica para matrizes cimentícias.

O ensaio qualitativo de aspersão de fenolftaleína sobre os corpos de prova realcalinizados eletroquimicamente, após processo de carbonatação, apresentou resultados similares entre os grupos, o que indica que a aplicação da densidade e corrente de $0,5 \text{ A/m}^2$ durante 7 dias já seria suficiente para reestabelecer o pH da peça. Apesar disso, apenas o ensaio de fenolftaleína não foi suficiente para determinar a influência da variação de corrente elétrica e do tempo de aplicação da técnica em sua capacidade de restauração da alcalinidade da pasta. Para isso foram realizados ensaios de porosidade e termogravimetria.

Tanto o ensaio de porosidade, quanto a análise termogravimétrica apresentaram resultados que indicam que a melhor relação corrente elétrica/tempo para aplicação do processo de realcalinização eletroquímica é a de $1,5 \text{ A/m}^2$ durante 14 dias.

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio durante 14 dias mostrou que a maior densidade de corrente aumentou a porosidade das amostras de argamassa. Isso indica que o carbonato de cálcio proveniente do processo de carbonatação foi revertido, reestabelecendo a porosidade da peça ao consumir esta substância. Houve diferença estatística significativa apenas entre os grupos “A” e “C”, indicando que a densidade de corrente de $1,0 \text{ A/m}^2$ funciona como uma zona de transição entre a quantidade de corrente menos eficaz e a mais eficaz na reversão da carbonatação. Esta diferença pode estar relacionada a durabilidade do tratamento de realcalinização.

Corroborando com o ensaio de porosimetria, os resultados da análise termogravimétrica apresentam as maiores perdas mássicas após a temperatura de $400 \text{ }^\circ\text{C}$, com densidade de corrente aplicada de $1,5 \text{ A/m}^2$, indicando que

quanto maior a densidade de corrente aplicada, maiores são as mudanças na microestrutura da peça.

Com base nos resultados obtidos através dos ensaios e aspensão de fenolftaleína, porosimetria por intrusão de mercúrio e análise termogravimétrica concluiu-se que a aplicação da densidade de corrente de $0,5 \text{ A/m}^2$ durante 7 dias já é capaz de reestabelecer o pH da peça. No entanto, é necessário a aplicação de uma corrente maior e durante um período mais longo de tempo para sejam observadas mudanças na microestrutura da matriz cimentícia, como a redução do carbonato de cálcio e o reestabelecimento da porosidade, tornando o tratamento mais duradouro.

Portanto, a melhor relação corrente elétrica/tempo varia de acordo com o resultado requerido por aquele que utiliza o método. A relação $0,5 \text{ A/m}^2$ durante 7 dias é eficaz no reestabelecimento do pH mas pode exigir que o processo seja repetido em um menor período de tempo que a aplicação da relação $1,5 \text{ A/m}^2$ durante 14 dias.

O método de realcalinização eletroquímica dos corpos de prova de argamassa foi capaz de reestabelecer a alcalinidade do material em todas as combinações de densidade de corrente e tempo.

5.2 Trabalhos Futuros

Sugere-se que, em próximas pesquisas, sejam realizados os seguintes estudos:

- Verificar a durabilidade do tratamento utilizando as diferentes combinações de densidade de corrente e tempo para verificar se a teoria de que a aplicação de $1,5 \text{ A/m}^2$ durante 14 dias produz efeitos mais estáveis na peça do que a aplicação de $0,5 \text{ A/m}^2$ durante 7 dias;
- Realcalinizar as amostras carbonatadas, a fim de se verificar a estabilidade da alcalinidade da peça após aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica;
- Comparar a efetividade da técnica quando os corpos de prova são ligados em série e quando os corpos de prova são ligados em paralelo;
- Aplicar a técnica a um corpo de prova por vez para entender o impacto na eficácia da conexão em série;
- Realizar a aplicação da técnica em uma estrutura real.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, J. B.; JÚNIOR, C. Carbonation of surface protected concrete. **Construction and Building Materials**. N. 49, PP. 478-483, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.058>

AGUIRRE-GUERRERO, A. M.; GUTIÉRREZ, R. M. Efficiency of electrochemical realkalisation treatment on reinforced blended concrete using FTIR and TGA. **Construction and Building Materials**. N. 193, PP. 518-528, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195>

AHMAD, Z. Capítulo 9 - Selection of material for corrosive environment. In: **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control**. 1 ed. Butterworth-Heinemann, 2006.

ANDRADE, C. Evaluation of the degree of carbonation of concretes in three environments. **Concrete and Building Materials**. N. 230, 116804, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116804>

ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z.; LOURENÇO, Z. Proteção catódica de estruturas de concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. V. 6, N. 2, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000200002>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

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

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BANFILL, P. F. G. Features of the mechanism of electrolytic re-alkalisation and desalination treatments for reinforced concrete. **Heriot-Watt University: Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete**, 1994.

BAROGHEL-BOUNY, V; CAPRA, B; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento in: Ed. OLLIVER, J. P.; VICHOT. Ed. Tradução CASCUDO, O; CARASEK, H. **A Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap. 8 e Cap. 9.

BENÍTEZ, P.; RODRIGUES, F.; TALUKDAR, S.; GAVILÁN, S.; VARUM, H; SPACONE, E. Analysis of correlation between real degradation data and a carbonation model for concrete structures. **Cement and Concrete Composites**. N. 95, PP. 247-259, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.019>

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; REDAELLI, E. Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation. **Proceedings of the 2nd FIB International Congress**. 2006.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; REDAELLI, E. Conservation of historical reinforced concrete structures by means of electrochemical realkalisation. **Journal of Cultural Heritage**. N. 9, PP. 376-385, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.006>

BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair**. 2 ed. Nova Iorque - NY: Taylor & Francis Group, 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CASTELLOTE, M.; LLORENTE, I.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; ALONSO, C.; CAMPO, J. In-situ monitoring the realkalisation process by neutron diffraction: Electroosmotic flux and portlandite formation. **Cement and Concrete Research**. N. 36, PP. 791-800, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.014>

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 11ª Edição. McGraw Hill Education, 2013.

CORSINI, R. Ambiente agressivos. **Revista Técnica**. N. 196, 2013.

CUI, H.; TANG, W.; LIU, W.; DONG, Z.; XING, F. Experimental studies on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**. N. 93, PP. 522-527, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.007>

DENTAL PROGRESSO. Membrana surgitime tela titânio 34x25 - Esp 04 - Fu 15 Disponível em <http://dentalprogressosp.com.br/Produto.aspx?idProduto=17369>. Acessado em 28/02/2021.

DOS REIS, G.S.; THUE, P.S.; CAZACLIU, B.G.; LIMA, E.C.; SAMPAIO, C.H.; QUATTRONE, M.; OVSYANNIKOVA, E.; KRUSE, A.; DOTTO, G.L. Effect of concrete carbonation on phosphate removal through adsorption process and its potential application as fertilizer. **Journal of Cleaner Production**. N. 256, 120416, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120416>

DYER, T. **Concrete Durability**. 1 ed. Boca Raton - FL: Taylor & Francis Group, 2014.

ELSENER, B. Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures. **Construction and Building Materials**. N. 15, PP 133-139, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00062-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00062-3)

FOGAÇA, J. R. V. Densidade Relativa dos Gases. **Mundo Educação**. Disponível em <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/densidade-relativa-dos-gases.htm>. Acesso em 28/02/2021

GHANTOUS, R. M.; POYET, S.; L'HOSTIS, V.; TRAN, N. C.; FRANÇOIS, R. Effect of crack openings on carbonation-induced corrosion. **Cement and Concrete Research**. N. 95, PP. 257-269, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.014>

GONZÁLEZ, F.; FAJARDO, G.; ARLIGUIE, G.; JUÁREZ, C. A.; ESCADEILLAS, G. Electrochemical realkalisation of carbonated concrete: an alternative approach to prevention of reinforcing steel corrosion. **International Journal of Electrochemical Science**. N. 6, PP. 6332-6349, 2011.

GONZÁLEZ, J. A.; COBO, A.; GONZÁLEZ, M. N.; OTERO, E. On the effectiveness of realkalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures. **Material and Corrosion**. N.51, PP 97-103, 2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4176\(200002\)51:2<97::AID-MAC097>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4176(200002)51:2<97::AID-MAC097>3.0.CO;2-3)

Japan Society of Civil Engineers. Standard specifications for concrete structures: Design. **JSCE Guidelines for Concrete**. N. 15, 2007.

KHAN, M. I.; LYNSDALE, C. J. Strength, permeability and carbonation of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. N. 32, PP. 123-131, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00641-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00641-X)

KURDA, R.; BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO₂. **Journal of CO₂ utilization**. N. 29, PP. 12-19, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.11.004>

LACHOVICZ, P. O.; **Influência do tipo de malha e do tipo de argamassa na realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado**. 2020. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2020.

LEEMANN, A.; NYGAARD, P.; KAUFMANN, J.; LOSER, R. Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. **Cement and Concrete Composites**. N. 62, PP. 33-43, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.020>

LIU, M.; CHENG, X.; LI, X.; PAN, Y.; LI, J. Effect of Cr on the passive film formation mechanisms of steel rebar in saturated calcium hydroxide solution. **Applied Surface Science**. N. 389, PP. 1182-1191, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.074>

MARQUES, P. F.; CHASTRE, C.; NUNES, A. Carbonation service life modelling of RC structures for concrete with Portland and blended cements. **Cement and Concrete Composites**. N. 37, PP. 171-184, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.007>

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**. N. 159, PP. 261-268, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.111>

MIETZ, I. J. Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures. **Materials and Corrosion**. n. 46, PP. 527-533, 1995.

MIRANDA, J. M.; GONZÁLEZ, J. A.; COBO, A.; OTERO, E. Several questions about electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures. **Corrosion Science**. N.48 PP. 2172-2188, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.08.014>

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and

moisture properties. **Cement and Concrete Research**. N. 56, PP. 153-170, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015>

NAKAYAMA, Z.; UEDA, T.; TSUKAGOSHI, M.; NANASAWA, A.; Influence of surface treatment after applying electrochemical repair method on protection effect against steel corrosion in concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**. N. 16, PP. 84-96, 2018. <https://doi.org/10.3151/jact.16.84>

NASSER, A.; CLÉMENT, A.; LAURENS, S.; CASTEL, A. Influence of steel-concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete. **Corrosion Science**. N. 52, PP. 2878-2890, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.037>

NUNES, G. F. M. Aula 13: Diagrama Pourbaix. Disponível em < http://www.tecquimica.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/9_-_diagrama_de_pourbaix.pdf >. Acessado em 19/11/2019.

OHRING, M. **Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices**. 1 ed. Elsevier Academic Press, 1998.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. **Chemical Engineering Science**. Vol. 46, n. 5/6, PP. 1333-1338, 1991.

PAUL, S. C.; PANDA, B.; HUANG, Y.; GARG, A.; PENG, X. An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete. **Measurement**. N. 124, PP. 205-210, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.033>

PEREZ, N. **Electrochemistry and Corrosion Science**. 1 ed. Boston - USA: Kluwer Academic Publishers, 2004.

POLDER, R. B. Test methods for onsite measurements of resistivity of concrete - RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**. N. 15, PP. 125-131, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)

POSSAN, E.; THOMAZ, W. A.; ALEANDRI, G. A.; FELIX, E. F.; SANTOS, A. C. P. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**. N. 6, PP. 147-161, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>

RAUPACH, M. Patch repairs on reinforced concrete structures: Model investigations on the required size and practical consequences. **Cement and Concrete Composites**. N. 28, PP. 679-684, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.016>

REOU, J. S.; ANN, K. Y. The distribution of hydration products at the steel-concrete interface for concretes subjected to electrochemical treatment. **Corrosion Science**. N. 52, PP. 2197-2205, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.02.037>

RÉUS, G.C.; MEDEIROS, M.H.F. Chemical realkalisation for carbonated concrete treatment - alkaline solutions and application methods. **Construction and Building Materials**. N. 262, 120880, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120880>

REVERT, A. B.; WEERDT, K.; HOMBOSTEL, K. GEIKER, M. R. Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset. **Construction and Building Materials**. N. 162, PP. 847-856, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.066>

RIEGER, P. H. **Electrochemistry**. 2 ed. Chapman & Hall, 1994.

RIBEIRO, P. H. L. C. **Realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano: influência de características da estrutura no comportamento do tratamento**. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

RIBEIRO, P. H. L. C.; MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; PERAZZO, N. Electrochemical realkalisation of carbonated concretes: Influence of material characteristics and thickness of concrete reinforcement cover. **Construction and Building Materials**. N. 40, PP. 280-290, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.076>

SIEGWART, M.; LYNESS, J.F.; MCFARLAND, B. J. Change of pore size in concrete due to electrochemical chloride extraction and possible implications for the migration of ions. **Cement and Concrete Research**. N. 33, PP. 1211-1221, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00047-4)

SISTONEN, E.; CWIRZEN, A.; PUTTONEN, J. Corrosion Mechanism of hot-dip galvanized reinforcement bar in cracked concrete. **Corrosion Science**. N. 50, PP. 3416-3428, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.050>

STEFANONI, M.; ANGST, U.; ELSENER, B. Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete - A critical review. **Cement and Concrete Research**. N. 103, PP. 35-48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>

TALUKDAR, S.; BANTHIA, N.; GRACE, J. R. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change - Part 1: Experimental results and model development. **Cement and Concrete Composites**. N. 34, PP. 924-930, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.011>

TAM V. W. Y.; BUTERA, A.; LE K. N. Microstructure and chemical properties for CO₂ concrete. **Construction and Building Materials**. N. 262, 120584, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120584>

TIBBETTS, C.M.; TAO, C.; PARIS, J.M.; FERRARO, C.C. Mercury intrusion porosimetry parameters for use in concrete penetrability qualification using the Katz-Thompson relationship. **Construction and Building Materials**. N. 263, PP. 119834, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119834>

TISSIER, Y.; BOUTEILLER, V.; MARIE-VICTOIRE, E.; JOIRET, S.; CHAUSSADENT, T.; TONG, Y. Electrochemical chloride extraction to repair combined carbonated and chloride contaminated reinforced concrete. **Electrochimica Acta**. N. 317, PP. 486-493, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.05.165>

TONG, Y.; BOUTEILLER, V.; MARIE-VICTOIRE, E.; JOIRET, S. Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete - Part 1: Sacrificial anode process. **Cement and Concrete Research**. N. 42, PP. 84-94, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.008>

TRACZ, T.; ZDEB, T. Effect of hydration and carbonation progress on the porosity and permeability of cement pastes. **Materials**. N.12, PP.192, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12010192>

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Suíça, CBI, 1982.

VU, T. H.; PHAM, G.; CHONIER, A.; BROUARD, E.; RATHNARAJAN, S.; PILLAI, R.; GETTU, R.; SANTHANAM, M.; AGUAYO, F.; FOLLIARD, K. J.; THOMAS, M. D.; MOFFAT, T.; SHI, C.; SARNOT, A. Impact of different climates on the resistance of concrete to natural carbonation. **Construction and Building Materials**. N. 2016, PP. 450-467, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.263>

WANGLER, T; ROUSSEL, N; BOS, F.P.; SALET, T.A.M; FLATT, R.J. Digital Concrete: A Review. **Cement and Concrete Research**. N. 123, 105780, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>

YEIH, W.; CHANG, J. J. A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete. **Construction and Building Materials**. n. 19, PP. 516-524, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.006>

ZHAN, B. J.; XUAN, D. X.; ZENG, W.; POON, C. S. Carbonation treatment of recycled concrete aggregate: Effect on transport properties and steel corrosion of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**. N. 104, 103360, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103360>

ZOU, Z.; WU, J.; YU, W.; WANG, Z. Influence of mineral admixtures on the electrochemical realkalisation of carbonated concrete. **American Society of Civil Engineering**. 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001981](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001981)

APÊNDICE A - Análise ANOVA para os ensaios

Análise ANOVA para o ensaio de absorção

Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	16,0545	1	16,0545	13,74	0,004065
Within groups:	11,6864	10	1,16864		Permutation p (n=99999)
Total:	27,7409	11			0,0085

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	2,48098	Var(error):	1,16864	ICC:	0,679792
-------------	---------	-------------	---------	------	----------

ω^2 : 0,5149

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,7032

Levene's test, from medians p (same): 0,7134

Welch F test in the case of unequal variances: $F=13,74$, $df=9,083$, $p=0,004795$

Análise ANOVA para ensaio de resistência à compressão entre Ref. 28 dias e Ref. 720 dias

Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	15,4128	1	15,4128	1,361	0,2769
Within groups:	90,579	8	11,3224		Permutation p (n=99999)
Total:	105,992	9			0,2778

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,852173	Var(error):	11,3224	ICC:	0,0699963
-------------	----------	-------------	---------	------	-----------

ω^2 : 0,03487

Levene's test for homogeneity of variance, from means p (same): 0,08043

Levene's test, from medians p (same): 0,0941

Welch F test in the case of unequal variances: $F=0,9768$, $df=3,667$, $p=0,3836$

Análise ANOVA para ensaio de resistência à compressão entre Ref. 28 dias e Carbonatado

Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	<i>p</i> (same)
Between groups:	50,5267	1	50,5267	9,999	0,01335
Within groups:	40,4235	8	5,05294		Permutation <i>p</i> (n=99999)
Total:	90,9502	9			0,00925

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	9,47371	Var(error):	5,05294	ICC:	0,652161
-------------	---------	-------------	---------	------	----------

*omega*²: 0,4737

Levene's test for homogeneity of variance, from means	<i>p</i> (same):	0,319
Levene's test, from medians	<i>p</i> (same):	0,3193

Welch *F* test in the case of unequal variances: *F*=8,791, *df*=5,214, *p*=0,02977

Análise ANOVA dos resultados de porosidade total

Test for equal means

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	<i>p</i> (same)
Between groups:	2,64035	2	1,32018	5,949	0,03093
Within groups:	1,55341	7	0,221915		Permutation <i>p</i> (n=99999)
Total:	4,19376	9			0,04347

Components of variance (only for random effects):

Var(group):	0,332806	Var(error):	0,221915	ICC:	0,599952
-------------	----------	-------------	----------	------	----------

*omega*²: 0,4974

Levene's test for homogeneity of variance, from means	<i>p</i> (same):	0,06833
Levene's test, from medians	<i>p</i> (same):	0,1211

Welch *F* test in the case of unequal variances: *F*=12,01, *df*=4,461, *p*=0,01601