

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GIOVANA COSTA RÉUS

ELEVAÇÃO DA ALCALINIDADE DO CONCRETO E RESTAURAÇÃO DA CAMADA DE  
PASSIVAÇÃO DO AÇO POR MEIO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA

CURITIBA

2022

GIOVANA COSTA RÉUS

ELEVAÇÃO DA ALCALINIDADE DO CONCRETO E RESTAURAÇÃO DA CAMADA DE  
PASSIVAÇÃO DO AÇO POR MEIO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutora em Engenharia Civil, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Renan Pícolo Salvador

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Réus, Giovana Costa

Elevação da alcalinidade do concreto e restauração da camada de passivação do aço por meio da realcalinização química. / Giovana Costa Réus. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Renan Pícolo Salvador

1. Concreto - Corrosão. 2. Carbonatos. I. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. II. Salvador, Renan Pícolo. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **GIOVANA COSTA RÉUS** intitulada: **Elevação da alcalinidade do concreto e restauração da camada de passivação do aço por meio da realcalinização química**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Março de 2022.

Assinatura Eletrônica  
25/03/2022 03:45:28.0

MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
24/03/2022 16:19:35.0

FERNANDA WANDERLEY CORRÊA DE ARAÚJO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE  
PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica  
24/03/2022 09:51:57.0

JUAREZ HOPPE FILHO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA)

Assinatura Eletrônica  
25/03/2022 09:42:51.0

RICARDO PIERALISI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
24/03/2022 10:26:41.0

EDUARDO PEREIRA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Marcelo Medeiros, e ao meu coorientador, Renan Pícolo Salvador, pela grande contribuição e apoio durante todo o desenvolvimento dessa tese. Foi essencial poder contar com vocês. Ao professor Juarez Hoppe Filho, pela ajuda com ensaios e por me ajudar com tantas dúvidas e conversas.

Aos professores Fernanda Araújo, Juarez Hoppe Filho, Eduardo Pereira e Ricardo Pieralisi, pela valiosa contribuição ao melhoramento desta tese. Fico muito contente em tê-los como banca avaliadora. Aos técnicos do laboratório LaME.

À grande amiga, irmã de coração, Andressa, obrigada pela disponibilidade e ajuda. É muito importante saber que posso contar contigo. À grande amiga Eloise, foi um prazer estar ao seu lado durante esses anos de doutorado.

Às minhas queridas amigas, companheiras de sala de doutorado, Ana Paula, Ana Paula, Maria Clara, Thaísa, Renathielly e Sarah. Os momentos que passamos juntas ficarão sempre guardados. Já sinto saudades de vocês.

À minha mãe, Marilane, e ao meu pai, Cláudio, que me ensinaram a estudar e a trabalhar com dedicação. Ao meu irmão, Renan, por sempre acreditar em mim.

Ao meu marido, Rodrigo, pelo amor, companheirismo e incentivo. É uma satisfação ter você ao meu lado durante todos esses anos.

Em especial ao amor da minha vida, Martim, que chegou trazendo o maior aprendizado de minha vida. Meu filho, meu amor sempre estará contigo!

Obrigada!

## RESUMO

O concreto de estruturas recém executadas possui elevada alcalinidade. Com isso forma-se uma camada de passivação ao redor das armaduras, que protege o aço da corrosão. Com o passar do tempo, o dióxido de carbono presente no ambiente penetra na matriz e reage com componentes da pasta de cimento, diminuindo a alcalinidade do concreto. Este processo faz com que a camada de passivação seja rompida, deixando as armaduras suscetíveis à corrosão. As manutenções corretivas e principalmente as preventivas tratam e/ou previnem as manifestações patológicas e aumentam a vida útil das estruturas, postergando os impactos negativos mencionados. A realcalinização química é um método de tratamento para estruturas de concreto armado carbonatadas, que consiste em manter o concreto em contato com uma solução alcalina para que a mesma penetre, por meio da absorção e difusão, elevando novamente o pH do concreto. Com isso é possível prevenir o surgimento da corrosão de armaduras devido à carbonatação, desde que a carbonatação ainda não tenha atingido as armaduras. Neste contexto, o objetivo principal desse trabalho é verificar se a realcalinização é capaz de promover a repassivação de armaduras em processo de corrosão. Além disso, tem-se como objetivo analisar se há reações químicas da solução alcalina de hidróxido de potássio com a pasta de cimento e possíveis produtos formados. O processo da realcalinização foi verificado por meio de aspersão de solução de fenolftaleína, difração de raios-X, análise termogravimétrica, determinação do pH, determinação do potencial de corrosão e determinação do grau de corrosão da armadura. Verificou-se que há a formação de portlandita após o processo de realcalinização química. E que a quantidade de portlandita formada eleva de forma significativa o pH das amostras realcalinizadas, reestabelecendo a reserva alcalina. Por fim, observou-se que a cinética de corrosão diminui após a realcalinização e que a camada de repassivação das armaduras foi restaurada logo após o término da aplicação da realcalinização química. Isso indica que a realcalinização química pode ser utilizada como método para tratar estruturas onde a frente de carbonatação já atingiu as armaduras e a corrosão já iniciou. Verificou-se, por meio da aplicação de modelos matemáticos que RAQ foi capaz de prolongar o tempo para redução de 20% de seção das armaduras em 5 vezes. e que a RAQ aumentou em mais de 5 vezes o tempo para que o processo de corrosão de armaduras origine uma fissura com abertura de 0,3 mm (limite de fissuração estabelecido pela NBR 6118).

**Palavras-chaves:** concreto; realcalinização química; carbonatação; corrosão.

## ABSTRACT

New concrete structures have high alkalinity. This forms a passivation layer around the reinforcement, which protects the steel from corrosion. The carbon dioxide present in the environment penetrates in the matrix, then reacts with cement paste components, decreasing the concrete alkalinity. This process leads the passivation layer to be broken and it leads the reinforcement susceptible to corrosion. Corrective maintenance and especially preventive maintenance prevent pathological manifestations and increase the life span of the structures. It postpones the remove negative impacts. Não entendi nada aqui Realkalization is a method of treating carbonated reinforced concrete structures. It consists of keeping the concrete in contact with an alkaline solution. So, the alkaline solution penetrates, by absorption and diffusion, restoring the concrete pH to its standard range/levels. With this, it is possible to avoid the appearance of corrosion of the reinforcements due to carbonation. In this context, the main objective of this work is to analyze if the realkalization is able to promote the reinforcement repassivation of samples in ongoing corrosion process. In addition, the secondary objective is to analyze if there are chemical reactions between of potassium hydroxide solution and cement paste. The realkalization process was verified through spraying a phenolphthalein solution, X-ray diffraction, thermogravimetric analysis, concrete pH, and corrosion potential and corrosion degree. It was found that portlandite is formed after the chemical realkalization process. And that the amount of portlandite formed is enough to raise the samples pH, by restoring the alkaline reserve. Finally, it was observed that the corrosion kinetics decrease after realkalinization. Also, the reinforcement repassivation layer was restored as soon as the chemical realkalinization was applied. This indicates that chemical realkalization can be used as a method to treat structures where carbonation has already reached the reinforcement cover and corrosion has already started. It was verified, by means of mathematical models application, that RAQ was able to prolong the time to reduce 20 % of the reinforcement section by 5 times. RAQ also increased, by more than 5 times, the time for the reinforcement corrosion process to originate a crack with an opening of 0.3 mm (cracking limit established by NBR 6118).

**Key-words:** concrete; chemical realkalisation; carbonation; corrosion.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – INCIDÊNCIA DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO . . . . .	16
FIGURA 2 – MAPA DE INCIDÊNCIA E DOS CUSTOS ADVINDOS DA CORROÇÃO . . . . .	18
FIGURA 3 – ESTRUTURA DA TESE . . . . .	20
FIGURA 4 – APLICAÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA EM UM PILAR . . . . .	24
FIGURA 5 – ESQUEMA DA APLICAÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA EM LABORATÓRIO . . . . .	24
FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA AO LONGO DO TEMPO . . . . .	26
FIGURA 7 – ESQUEMA DA APLICAÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA EM LABORATÓRIO . . . . .	26
FIGURA 8 – EVOLUÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA AO LONGO DO TEMPO . . . . .	27
FIGURA 9 – CARBONATAÇÃO E REACALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS AO LONGO DO TEMPO . . . . .	34
FIGURA 10 – GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO UTILIZADO NOS CAPÍTULOS 4 E 5 . . . . .	42
FIGURA 11 – GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO NOS CAPÍTULOS 4 E 5 . . . . .	42
FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO UTILIZADO NO CAPÍTULO 6 . . . . .	44
FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO NO CAPÍTULO 6 . . . . .	44
FIGURA 14 – MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE (A) CARBONATAÇÃO E (B) REALCALINIZAÇÃO . . . . .	46
FIGURA 15 – PARTE DAS AMOSTRAS (A) MANTIDAS EM REALCALINIZAÇÃO E (B) RETIRADAS DO TRATAMENTO PARA ANÁLISE DA REALCALINIZAÇÃO . . . . .	47
FIGURA 16 – ÂNGULOS DE CONTATO ENTRE UM SÓLIDO E UM LÍQUIDO . . . . .	49
FIGURA 17 – ESQUEMA DAS AMOSTRAS . . . . .	51

FIGURA 18 – MICROSCÓPIO ÓPTICO UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO DE UMA GOTA DE SOLUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO ALCALINO COM E SEM TENSOATIVO E AMOSTRA DE CONCRETO COM CP V-ARI . . . . .	51
FIGURA 19 – COMPORTAMENTO EXPONENCIAL AO LONGO DO TEMPO DAS AMOSTRAS DO CAPÍTULO 4 . . . . .	53
FIGURA 20 – VALORES DE R <sup>2</sup> DAS VELOCIDADE DE REALCALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DO CAPÍTULO 4 . . . . .	53
FIGURA 21 – PROFUNDIDADE DE REALCALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS TRATADAS COM DIFERENTES SOLUÇÕES ALCALINAS . . . . .	54
FIGURA 22 – COE REALCALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS TRATADAS COM DIFERENTES SOLUÇÕES ALCALINAS . . . . .	54
FIGURA 23 – ÂNGULO DE CONTATO ENTRE A SOLUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO ALCALINO SEM TENSOATIVO E A AMOSTRA DE CONCRETO CONTENDO CP V-ARI . . . . .	55
FIGURA 24 – ÂNGULO DE CONTATO ENTRE A SOLUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO ALCALINO COM TENSOATIVO E A AMOSTRA DE CONCRETO CONTENDO CP V-ARI . . . . .	56
FIGURA 25 – AMOSTRAS SEM PRÉ TRATAMENTO E SEM TENSOATIVO APÓS (A) 40 DIAS DE RAQ COM KOH E (B) 99 DIAS DE RAQ COM SILICATO DE SÓDIO ALCALINO . . . . .	56
FIGURA 26 – DISTRIBUIÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO PRODUZIDOS NO BRASIL ANO DE 2013 . . . . .	58
FIGURA 27 – ESQUEMA DE PREPARO DE AMOSTRAS E ENSAIOS EM CONCRETO . . . . .	60
FIGURA 28 – ESQUEMA DE PREPARO DE AMOSTRAS E ENSAIOS EM PASTA DE CIMENTO . . . . .	62
FIGURA 29 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO COM 28 DIAS DE CURA ÚMIDA E TRAÇO 1 : 2,60 : 3,20 E RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO DE 0,70 . . . . .	65
FIGURA 30 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E PROFUNDIDADE DE REALCALINIZAÇÃO AO LONGO DA RAIZ QUADRADA DO TEMPO (EM AMOSTRAS DE CONCRETO APÓS 28 DIAS DE CURA ÚMIDA)	66
FIGURA 31 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO EM AMOSTRAS DE CONCRETO COM OS CIMENTOS CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z E CP IV . . . . .	67
FIGURA 32 – COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO EM AMOSTRAS DE CONCRETO COM OS CIMENTOS CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z E CP IV . . . . .	67

FIGURA 33 – CORRELAÇÕES ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E O $K_{REALC}$ PARA AS AMOSTRAS DE CONCRETO . . . . .	68
FIGURA 34 – POROSIDADE APARENTE DAS AMOSTRAS DE PASTA DE CIMENTO . . . . .	69
FIGURA 35 – MEDIÇÃO INDIRETA DO PH DAS PASTAS DE CIMENTO . . . . .	70
FIGURA 36 – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS DE PASTA DE CIMENTO	71
FIGURA 37 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS DE PASTA DE CIMENTO . . . . .	71
FIGURA 38 – TEOR DE PORTLANDITA NO ENSAIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA . . . . .	72
FIGURA 39 – TEOR DE ÁGUA QUIMICAMENTE COMBINADA COMO HIDRATOS NO ENSAIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA . . . . .	73
FIGURA 40 – TEOR DE CARBONATOS NO ENSAIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA . . . . .	73
FIGURA 41 – ESQUEMA DAS ETAPAS DE ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS . . . . .	78
FIGURA 42 – ESQUEMA DAS AMOSTRAS DE 25 X 25 X 7 CM . . . . .	78
FIGURA 43 – ESQUEMA DE PROTEÇÃO DAS ARMADURAS . . . . .	79
FIGURA 44 – (A) EQUIPAMENTO GECOR 10 UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELETROQUÍMICOS, (B) CONEXÃO ENTRE O EQUIPAMENTO E O SENSOR E (C) SENSOR DO EQUIPAMENTO GECOR 10 . . . . .	81
FIGURA 45 – TÉCNICA DE CONFINAMENTO MODULADO UTILIZADA INTERNAMENTE NO EQUIPAMENTO GECOR 10 . . . . .	81
FIGURA 46 – POTENCIAL DE CORROSÃO DAS AMOSTRAS . . . . .	84
FIGURA 47 – CORRENTE DE CORROSÃO DAS AMOSTRAS . . . . .	85
FIGURA 48 – ASPERSÃO DE FENOLFTALEÍNA NA AMOSTRA NO DIA 924, APÓS O PROCESSO DE REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA E ALGUMAS MEDIDAS DE $E_{CORR}$ E $I_{CORR}$ COM A IMERSÃO POR 24H EM ÁGUA . . . . .	87
FIGURA 49 – PERDA DE SEÇÃO DA ARMADURA AO LONGO DO TEMPO COM BASE NA TAXA DE CORROSÃO ANTES E DEPOIS DA REALCALINIZAÇÃO . . . . .	89
FIGURA 50 – ABERTURA DE FISSURAS NO CONCRETO AO LONGO DO TEMPO ANTES E DEPOIS DA REALCALINIZAÇÃO CONSIDERANDO $P_x$ PELO MODELO DE ANDRADE, ALONSO E MOLINA (1993) E $\beta= 12,5$ (EUROCODE 2, 1992) . . . . .	91

FIGURA 51 – ABERTURA DE FISSURAS NO CONCRETO AO LONGO DO TEMPO ANTES E DEPOIS DA REALCALINIZAÇÃO CONSIDERANDO $P_x$ PELO MODELO DE STEWART E ROSOWSKY (1998) E $\beta = 12,5$ (EUROCODE 2, 1992) . . . . .	92
FIGURA 52 – COMPARAÇÃO ENTRE O TEMPO PARA INICIAR A ABERTURA DE FISSURAS E PARA ABRIR UMA FISSURA DE 0,3 MM, ANTES E DEPOIS DA REALCALINIZAÇÃO, CONSIDERANDO OS MODELOS DE (ANDRADE; ALONSO; MOLINA, 1993) E (STEWART E ROSOWSKY, 1998) NO CÁLCULO DE $P_x$ . . . . .	92
FIGURA 53 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO DE VIDA ÚTIL DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO RELACALINIZADA . . . . .	93

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TÉCNICAS DE PROTEÇÃO DA CORROSÃO EM ARMADURAS	18
TABELA 2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS DA TESE . . . . .	19
TABELA 3 – RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL . . . . .	21
TABELA 4 – CLASSIFICAÇÃO DOS ESTUDOS PUBLICADOS SOBRE REAL- CALINIZAÇÃO QUÍMICA DO CONCRETO . . . . .	29
TABELA 5 – RESUMO DAS SOLUÇÕES ALCALINAS UTILIZADAS POR DI- VERSOS AUTORES PARA A RAQ . . . . .	31
TABELA 6 – TIPOS DE CIMENTO . . . . .	35
TABELA 7 – RESUMO DOS ESTUDOS SOBRE A CORROSÃO DE ARMADU- RAS E A RAQ . . . . .	38
TABELA 8 – RESUMO DOS ESTUDOS SOBRE A CORROSÃO DE ARMADU- RAS E A RAQ E SUAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA QUANTO A PASSIVAÇÃO . . . . .	39
TABELA 9 – PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS CIMENTOS UTILIZADOS NOS CAPÍTULOS 4 E 5 . . . . .	41
TABELA 10 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CIMENTOS UTI- LIZADOS NOS CAPÍTULOS 4 E 5 . . . . .	41
TABELA 11 – PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CIMENTO CP V-ARI UTILIZADO NO CAPÍTULOS 6 . . . . .	43
TABELA 12 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO CP V- ARI UTILIZADO NO CAPÍTULOS 6 . . . . .	43
TABELA 13 – PROPRIEDADES DO AGREGADO MIÚDO UTILIZADOS NO CA- PÍTULO 6 . . . . .	43
TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS DO SILICATO DE SÓDIO ALCALINO . . . .	45
TABELA 15 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM CP V-ARI AOS 28 DIAS . . . . .	52
TABELA 16 – RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE CORROSÃO E O GRAU DE CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO . . . . .	82
TABELA 17 – RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE CORROSÃO E O GRAU DE CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO UTILIZADOS NO PRESENTE TRABALHO . . . . .	82
TABELA 18 – PROBABILIDADE DE CORROSÃO PELO POTENCIAL DE COR- ROSÃO COM ELETRODO DE $Cu/SO_4Cu$ . . . . .	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFm	- Monossulfoaluminato
AFt	- Etringita
CARB	- Carbonatadas
C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado
DRX	- Difração de raios-X
ICDD	- International Center for Diffraction Data
PET	- Polietileno tereftalato
PIB	- Produto Interno Bruto
RAE	- Realcalinização eletroquímica
RAQ	- Realcalinização química
REF	- Referência
REALC	- Realcalinizadas
SNIC	- Sindicato Nacional das Indústrias do Cimento
TG/DTG	- Termogravimetria

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS	19
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
1.2.1 Inovação da tese	20
<b>2 ESTADO DA ARTE</b>	<b>23</b>
2.1 A CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS	23
2.2 A REALCALINIZAÇÃO	23
2.3 AVANÇO NAS PESQUISAS SOBRE A REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA	28
2.3.1 Métodos de aplicação	29
2.3.2 Soluções alcalinas	30
2.3.3 O efeito das adições pozolânicas na realcalinização química	33
2.3.4 Possíveis efeitos colaterais	36
2.3.5 Quando utilizar a realcalinização química	36
<b>3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</b>	<b>40</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	40
3.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIOS	45
<b>4 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ALCALINAS E PRÉ-TRATAMENTO</b>	<b>48</b>
4.1 INTRODUÇÃO	48
4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.4 CONCLUSÕES	57
<b>5 O PROCESSO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA EM AMOSTRAS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO PORTLAND</b>	<b>58</b>
5.1 INTRODUÇÃO	58
5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
5.2.1 Estudo em amostras de concreto	59
5.2.2 Estudo em amostras de pasta de cimento	61
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.3.1 Estudo em amostras de concreto	65
5.3.2 Estudo em amostras de pasta de cimento	68
5.4 CONCLUSÕES	75

<b>6 A REALCALINIZAÇÃO E A CORROSÃO DE ARMADURAS . . . . .</b>	<b>76</b>
6.1 INTRODUÇÃO . . . . .	76
6.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL . . . . .	77
6.2.1 Procedimento geral . . . . .	77
6.2.2 Técnica de monitoramento da corrosão e critérios de avaliação . . . . .	80
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	83
6.4 DISCUSSÃO USANDO MODELOS DE VIDA ÚTIL . . . . .	87
6.5 CONCLUSÕES . . . . .	93
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>95</b>
7.1 CONCLUSÕES GERAIS . . . . .	95
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	95
7.3 ATUAÇÃO NA ELABORAÇÃO DE ARTIGOS . . . . .	96
7.3.1 Artigos relacionados a realcalinização química . . . . .	96
7.3.2 Outros artigos . . . . .	96
<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE A TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO COM KOH . . . . .</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE B TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO COM SILICATO DE SÓDIO ALCALINO . . . . .</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE C TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO COM KOH E SILICATO DE SÓDIO ALCALINO . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE D TESTE TUKEY PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO . . . . .</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE E TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO . . . . .</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE F TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE G TESTE TUKEY PARA A POROSIDADE APARENTE . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE H TESTE TUKEY PARA O PH DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA . . . . .</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE I TESTE TUKEY PARA O PH DAS AMOSTRAS CARBONATADAS . . . . .</b>	<b>117</b>

**APÊNDICE J   TESTE TUKEY PARA O PH DAS AMOSTRAS REALCALINIZADAS . . . . . 118**

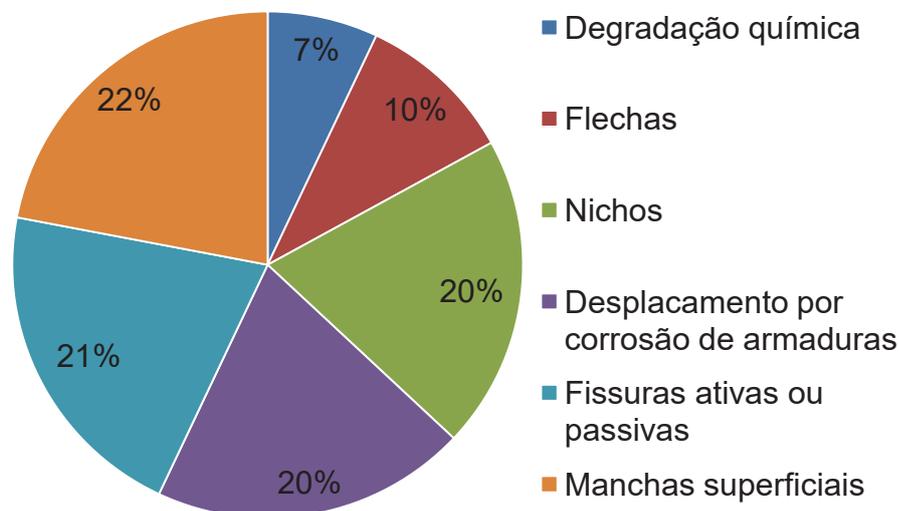
**APÊNDICE K   TESTE TUKEY PARA O PH DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA, CARBONATADAS E REALCALINIZADAS . . . . . 119**

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado na construção civil no Brasil e no mundo (HELENE; ANDRADE, 2017), (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017), (MILLER; A.; MONTEIRO, 2016). De acordo com dados da *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado* do ano de 2021, conforme citado por Monteiro, Moita Neto e Silva (2021), é estimado que sejam consumido anualmente 11 bilhões de toneladas de concreto no mundo, aproximadamente 1,9 toneladas por habitante por ano.

A produção atual de cimento e seus compósitos, como concreto, resulta em aproximadamente 8 % a 9 % das emissões globais de gases de efeito estufa (MILLER; A.; MONTEIRO, 2016), 2 % a 3 % do uso de energia em todo o mundo (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017) e 1 % a 2 % da retirada global de água (MILLER; HORVATH; MONTEIRO, 2018). Além disso, a produção de concreto gera outros impactos ambientais importantes, como emissões de material particulado, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono (MILLER; MOORE, 2020).

FIGURA 1 – INCIDÊNCIA DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO



FONTE: Adaptado de Helene (2003).

As estruturas estão íntegras quando recém construídas, porém com o passar do tempo podem surgir manifestações patológicas que diminuem sua durabilidade e vida útil, gerando prejuízos econômicos e ambientais. A redução da vida útil antecipa a necessidade de demolições e novas construções, o que produz resíduos e retira matéria-prima da natureza, contribuindo para o esgotamento de agregados naturais e geração de resíduos (RADONJANIN *et al.*, 2013). Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2012), os

resíduos da construção civil consistem em cerca de 50% a 70% dos resíduos sólidos urbanos.

A corrosão de armaduras é um mecanismo de elevada incidência em estruturas de concreto armado, como pode ser observado na FIGURA 1. Além disso, em alguns países, como a Austrália, África do Sul, Brasil e Índia, o gasto com a corrosão pode apresentar uma parcela significativa do PIB (produto interno bruto), como é possível observar na FIGURA 2.

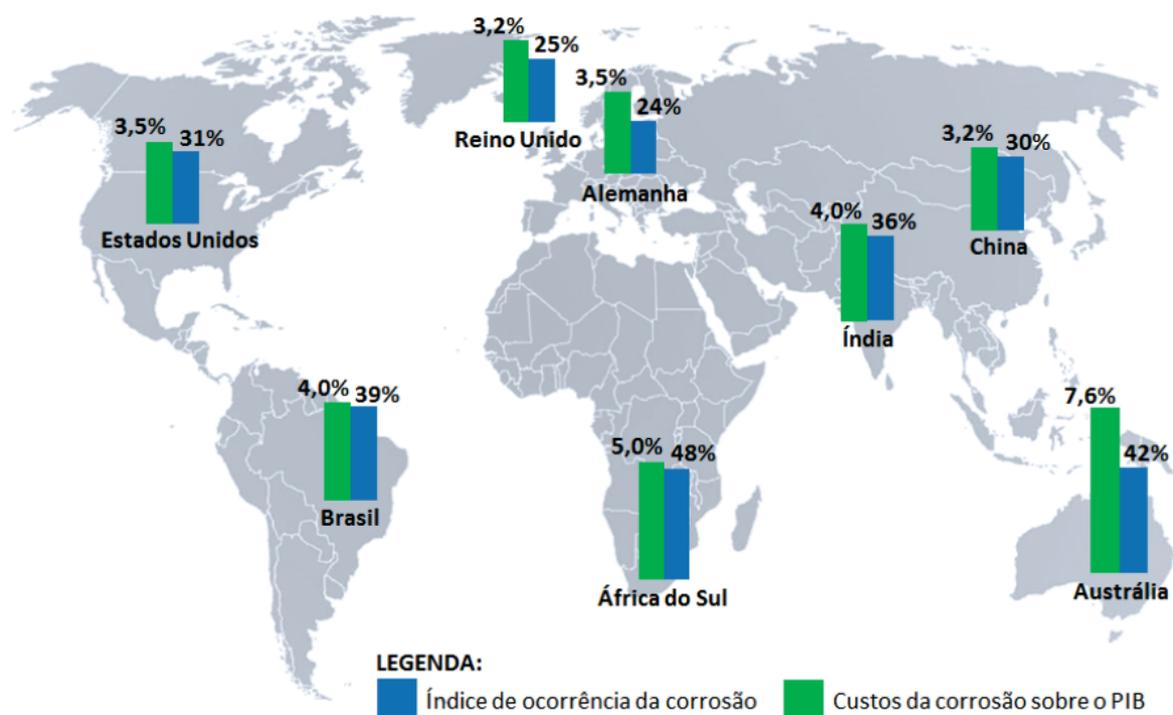
As manutenções corretivas e principalmente as preventivas tratam e/ou previnem as manifestações patológicas e aumentam a vida útil das estruturas, postergando os impactos negativos. Assim, destaca-se a importância do estudo de técnicas que evitem ou tratem a corrosão, como as apresentadas na TABELA 1.

Algumas técnicas para prevenir ou tratar a corrosão podem ser utilizadas no momento da construção ou em conjunto com reparos localizados, como as técnicas de revestimento de armaduras, armaduras especiais e inibidores de corrosão. Outras técnicas, como a proteção superficial, normalmente empregadas antes do início da corrosão, são aplicadas na superfície do concreto como forma de evitar o ingresso de substâncias que dão início a esse processo. Essas técnicas de proteção superficial também podem ser utilizadas após o início da corrosão, pois uma vez que diminuem o ingresso de substâncias nocivas no concreto, reduzem a velocidade de corrosão.

Dentre as técnicas eletroquímicas, há a proteção catódica, a extração de cloretos e a realcalinização eletroquímica (RAE). A proteção catódica é uma técnica permanente que visa evitar a corrosão de armaduras polarizando o aço carbono de modo que ele tenha um comportamento anódico. A extração de cloretos é uma técnica temporária que ocasiona a descontaminação do concreto por cloretos e, conseqüentemente, evita o surgimento ou a evolução da corrosão, a depender do momento em que o tratamento for aplicado.

A RAE é uma técnica de tratamento para estruturas de concreto armado carbonatadas, que podem ser utilizada para tratar a diminuição de pH causada pela carbonatação (BERTOLINI; CARSANA; REDAELLI, 2008), e, conseqüentemente, para prevenir ou desacelerar o processo de corrosão, a depender do momento da vida útil que o tratamento for aplicado. Isso ocorre elevando o pH, que foi diminuído em função da carbonatação. Essa técnica é realizada colocando-se uma solução alcalina em contato com a estrutura de concreto a ser tratada. E fazendo uma ligação a uma fonte de energia, a fim de aumentar a velocidade do tratamento. A RAE é uma técnica que possui diversos estudos científicos, tais como Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018), Ribeiro *et al.* (2013), Tong *et al.* (2012), Redaelli e Bertolini (2011) e González *et al.* (2011). Esse método de tratamento já é aplicado em casos reais, conforme relatado por Bertolini, Carsana e Redaelli (2008).

FIGURA 2 – MAPA DE INCIDÊNCIA E DOS CUSTOS ADVINDOS DA CORROSÃO



FONTE: Felix (2018).

TABELA 1 – TÉCNICAS DE PROTEÇÃO DA CORROSÃO EM ARMADURAS

Divisão das técnicas	Descrição das técnicas
Revestimento das armaduras	Galvanização
	Resina epóxi
Armaduras especiais	Aço inoxidável
	Polimérica reforçada com fibras
Inibidores de corrosão	Orgânicos
	Inorgânicos
Proteção superficial	Formadores de película
	Hidrofugantes
	Bloqueadores de poros
Técnicas eletroquímicas	Proteção catódica
	Extração de cloretos
	Realcalinização eletroquímica
Técnicas químicas	Realcalinização química

Fonte: Adaptado de Réus (2017).

A realcalinização química (RAQ) também visa tratar a diminuição de pH de concretos carbonatados. Essa técnica é realizada colocando o elemento de concreto em contato com uma solução alcalina, que é absorvida e difundida no interior do concreto. Diferentemente da RAE, a RAQ não necessita de uma ligação a uma fonte de energia. Com isso essa técnica tende a ser mais facilmente aplicada do que a RAE.

Destaca-se que dentre as técnicas citadas na TABELA 1, apenas a RAE e a RAQ visam tratar a diminuição de pH causada pela carbonatação, sendo que a RAQ é uma técnica não destrutiva que tem potencial para ser aplicada de forma mais simples que a RAE. Além disso, a RAQ ainda é pouco estudada, com isso há várias lacunas a serem preenchidas a respeito desse assunto. Ainda não há uma explicação que descreva de fato o processo da elevação da alcalinidade do concreto pela RAQ. Além disso, ainda não foi viabilizada uma maneira de aplicar essa técnica em estruturas reais.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é avaliar a eficiência da RAQ na repassivação de armadura em processo avançado de corrosão. Para tanto os objetivos específicos estão descritos na TABELA 2.

TABELA 2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS DA TESE

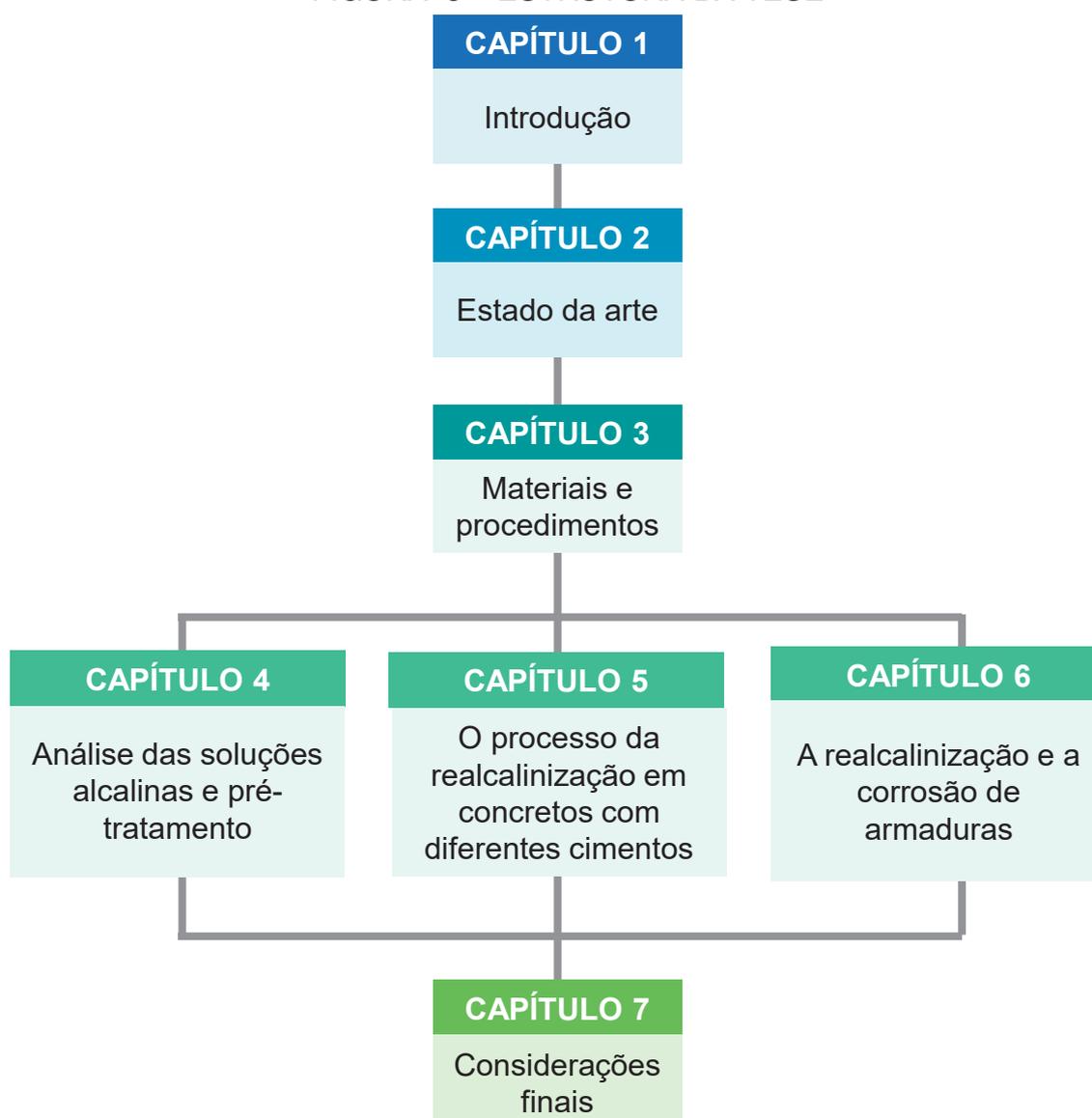
Temas	Objetivos específicos
Soluções alcalinas	Analisar e comparar a eficácia da realcalinização com solução de silicato de sódio alcalino e hidróxido de potássio
	Analisar a eficácia do pré-tratamento com limpeza superficial do concreto com ácido sulfúrico
	Analisar a eficiência da utilização de tensoativos juntamente com as soluções alcalinas
Influência do tipo de cimento Portland no mecanismo de realcalinização	Verificar o avanço da frente de realcalinização em concretos contendo CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z e CP IV
	Verificar os produtos formados após a RAQ
Repassivação de armaduras por meio da RAQ	Verificar se a RAQ é capaz de repassar armaduras de amostras apresentando corrosão e carbonatadas por mais de 3 anos
	Avaliar, por meio de modelos de previsão, a contribuição da RAQ perante a perda de seção das armaduras e abertura de fissuras devido à corrosão

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho aborda diferentes enfoques no estudo da realcalinização. Para melhor dispor esses enfoques, divide-se a tese em sete capítulos, conforme a FIGURA 3. A introdução e objetivo da tese são apresentados no primeiro capítulo. O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica e estado da arte das pesquisas sobre realcalinização. O Capítulo 3 apresenta os procedimentos de ensaio e caracterização dos materiais que são comuns aos capítulos que contém programas experimentais. Os capítulos 4 a 6 contém programas experimentais e por isso, são abordados de forma

independente. Em cada um deles encontram-se introdução, programa experimental, resultados, discussão e conclusões parciais. O Capítulo 4 descreve um ensaio preliminar, cuja finalidade é definir a solução alcalina a ser utilizada nos processos descritos nos capítulos seguintes. O Capítulo 5 trata da realcalinização em concretos com diferentes tipos de cimento e como ocorre o processo da realcalinização. Analisa-se no Capítulo 6 se a realcalinização química reverte o processo de corrosão de armaduras. O último capítulo visa apresentar as conclusões globais de todos os experimentos realizados, e apresentar as perspectivas futuras relativas ao estudo da realcalinização.

FIGURA 3 – ESTRUTURA DA TESE



### 1.2.1 Inovação da tese

Na seção 2.3 é apresentada uma busca sobre a realcalinização química em bases de dados, a fim de verificar estudos publicados sobre o tema. Com isso, verificou-

se que há algumas lacunas a serem estudadas sobre a RAQ, sendo que algumas delas compreendem o caráter inovador da presente tese e estão apresentadas nos capítulos 4, 5 e 6. Apresenta-se na TABELA 3 um resumo dos principais materiais e métodos utilizados nesses capítulos.

TABELA 3 – RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Capítulo	Materiais	Métodos
Capítulo 4 Soluções alcalinas	Concreto CP V-ARI Hidróxido de potássio Silicato de sódio alcalino Tensoativo (ácido sulfônico) Pré-tratamento com ácido sulfúrico	Fenolftaleína
Capítulo 5 O processo da RAQ em concretos com diferentes cimentos	CPV-ARI CP II-F CP II-Z CP IV	Fenolftaleína DRX Análise termogravimétrica pH
Capítulo 6 A realcalinização e a corrosão de armaduras	Concreto CP V-ARI Barra de aço Hidróxido de sódio	Corrente de corrosão Potencial de corrosão

No transcorrer da tese (Capítulo 2) é apresentada uma discussão teórica detalhada das possíveis soluções alcalinas a serem utilizadas para a RAQ. Discussão essa que ainda não havia sido realizada anteriormente nas pesquisas apresentadas nos trabalhos verificados nesse estudo (TABELA 4). Com base nessa exposição, utilizaram-se no Capítulo 4 soluções de hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino. Verificou-se também a influência da utilização de tensoativo (ácido sulfônico) e realização de pré-tratamento com solução de ácido sulfúrico. Ambos foram utilizados para tentar aumentar a absorção da solução alcalina e, conseqüentemente, a velocidade de realcalinização. Destaca-se que o uso de tensoativo nas soluções alcalinas, pré-tratamento do concreto ao processo de RAQ e solução de silicato de sódio alcalino, ainda não foram utilizados para a RAQ, tratando-se de inovações do presente estudo. Para avaliar a influência desses materiais, utiliza-se a aspersão de solução de fenolftaleína.

No Capítulo 5, analisou-se por meio de aspersão de solução de fenolftaleína, a influência de 4 diferentes tipos de cimento (CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z e CP IV com mesma relação água/cimento) no avanço da RAQ. Realizaram-se ensaios de difração de raios-X (DRX), termogravimetria e pH em pastas de cimento. Esses ensaios resultaram nos primeiros indícios já registrados de que a RAQ forma portlandita e eleva a reserva alcalina das amostras cimentícias, sendo essa a principal inovação da tese.

No Capítulo 6 utilizou-se o equipamento GECOR 10, que mede a corrente e o

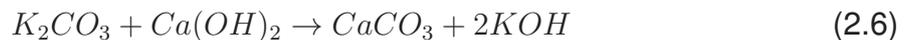
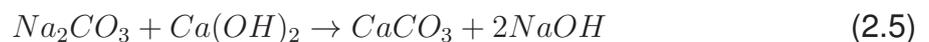
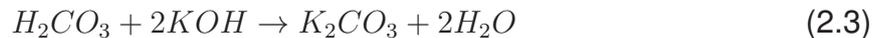
potencial de corrosão. Nesse capítulo há uma contribuição científica no que se refere ao estudo do comportamento de armaduras com estágio avançado de corrosão frente a RAQ. Além disso, os resultados e conclusões são significativos, indicando que a RAQ pode ser utilizada após a carbonatação atingir e despassivar as armaduras. Portanto os resultados e conclusões obtidos nesse capítulo também abrangem o caráter inovador da presente tese.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 A CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O  $CO_2$  presente na atmosfera penetra nos poros do concreto e reage com íons solubilizados na água presente nos poros, sendo eles  $K^+$ ,  $Na^+$  e principalmente o  $Ca^{2+}$ , que está presente em maior quantidade na pasta de cimento.

Primeiramente o  $CO_2$  reage com a água formando o ácido carbônico, conforme Equação (2.1) (WOLF, 2010). Posteriormente o ácido carbônico reage com os  $Na^+$ ,  $K^+$  e  $Ca^{2+}$  formando carbonato de sódio, carbonato de potássio e bicarbonato de cálcio, conforme Equações (2.2), (2.3) e (2.4) (WOLF, 2010). Essas reações formam produtos mais estáveis (HOPPE FILHO, 2008), conforme descrito nas Equações (2.5), (2.6) e (2.7).



### 2.2 A REALCALINIZAÇÃO

A realcalinização é um método utilizado para tratar estruturas de concreto armado que estejam carbonatadas, reestabelecendo o elevado pH do concreto (BERTOLINI; CARSANA; REDAELLI, 2008). Essa técnica é aplicada colocando-se uma solução alcalina em contato com a estrutura de concreto a ser tratada. Além do contato

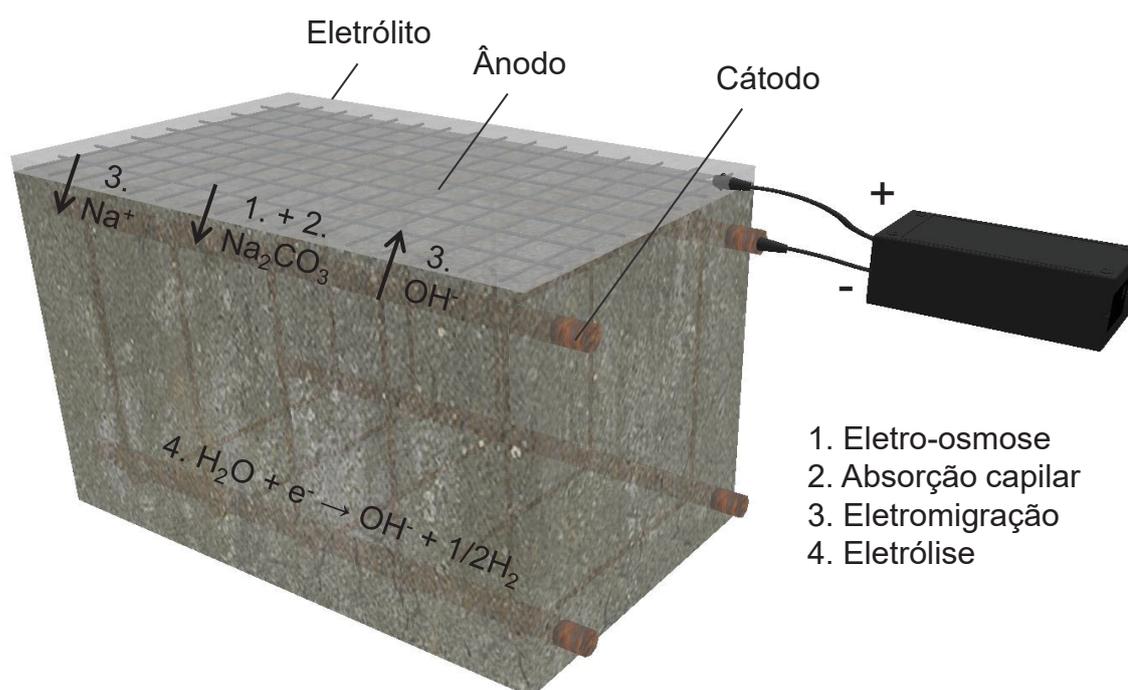
com a solução, pode ou não haver a ligação a uma fonte de energia, a fim de aumentar a velocidade do tratamento. A técnica que utiliza a passagem de corrente elétrica é denominada realcalinização eletroquímica (RAE), e a técnica que não utiliza corrente elétrica chama-se realcalinização química (RAQ).

FIGURA 4 – APLICAÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA EM UM PILAR



FONTE: Bertolini, Carsana e Redaelli (2008).

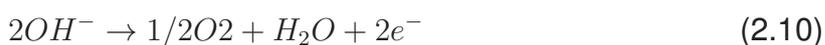
FIGURA 5 – ESQUEMA DA APLICAÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA EM LABORATÓRIO



FONTE: Adaptado de Yeih e Jiang (2005).

A RAE pode ser executada dispondo de uma malha de aço ou titânio ativado em contato com uma polpa de celulose embebida com solução de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ou carbonato de potássio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). O conjunto é mantido em contato com a superfície da estrutura do concreto a ser tratado (BERTOLINI; CARSANA; REDAELLI, 2008), conforme FIGURA 4. É realizada a conexão entre o polo positivo da fonte de energia e a malha, e entre o polo negativo e as armaduras da estrutura, como é possível observar na FIGURA 5. Esse conjunto é um sistema anódico temporário, onde a malha de titânio torna-se o ânodo, as armaduras tornam-se o cátodo e a solução alcalina age como o eletrólito.

De acordo com Yeih e Jiang (2005), nesse processo ocorre absorção capilar, difusão, eletro-osmose, eletromigração e eletrólise (FIGURA 5). Na eletromigração, os cátodos ( $\text{OH}^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ ) movem-se para a região do ânodo, enquanto os ânodos ( $\text{Na}^+$ ) migram para a região do cátodo. Pela eletrólise, os cátions  $\text{H}^+$  presentes na  $\text{H}_2\text{O}$  são reduzidos a  $\text{H}_2$ , formando  $\text{OH}^-$  na região catódica. Além disso, forma-se  $\text{O}_2$  pela redução dos íons  $\text{O}^{2-}$  presentes no  $\text{OH}^-$  no ânodo. A eletrólise ocorre gerando hidróxido na região catódica (Equações (2.8) e (2.9)) e oxidação na região anódica (Equação (2.10)).

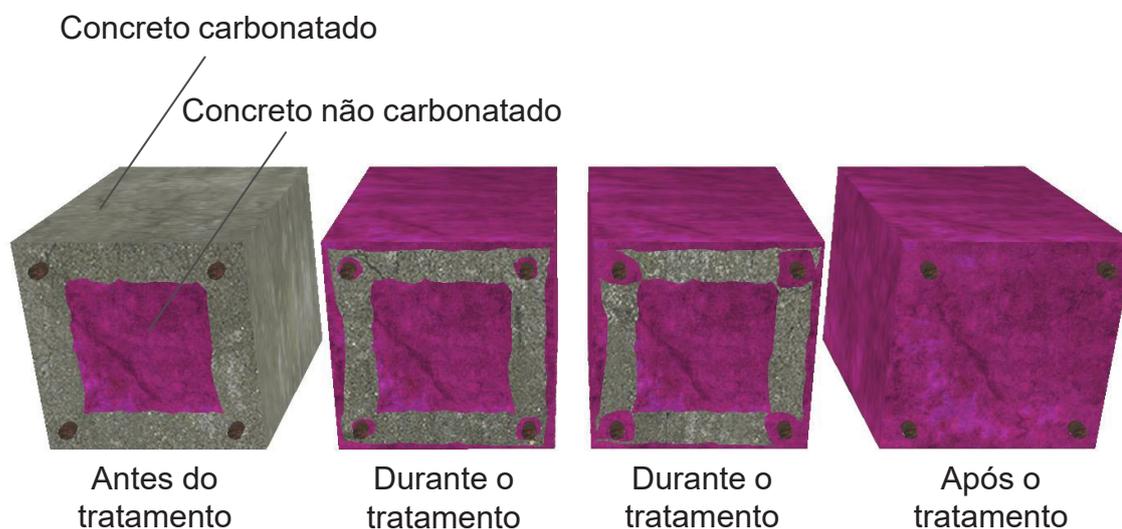


A RAE ocorre tanto da parte externa para a parte interna da peça, quanto ao redor das armaduras. A realcalinização de fora para dentro ocorre em função da penetração dos hidróxidos. Já a realcalinização ao redor das armaduras ocorre em função dos hidróxidos gerados pela eletrólise. Sendo que a realcalinização ao redor das armaduras ocorre de forma mais rápida que de fora para dentro (FIGURA 6).

A RAQ consiste em manter o concreto em contato com soluções alcalinas para que, por meio da absorção e da difusão, a solução penetre no concreto (FIGURA 7). As soluções alcalinas utilizadas e que apresentaram bons resultados para Réus e Medeiros (2020) são KOH (150 g/l), NaOH (150 g/l) ou uma solução combinada, contendo KOH, NaOH e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (50 g/l, 15 g/l e 30 g/l, respectivamente). A concentração das soluções alcalinas de KOH, NaOH e combinada (contendo KOH, NaOH e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) foi testada por Araujo (2004). A autora verificou que para essas concentração não havia acúmulo de cristais na superfície do concreto. A forma com que ocorre a RAQ é diferente da RAE. Como não há ligação das barras de aço em uma fonte de energia, não

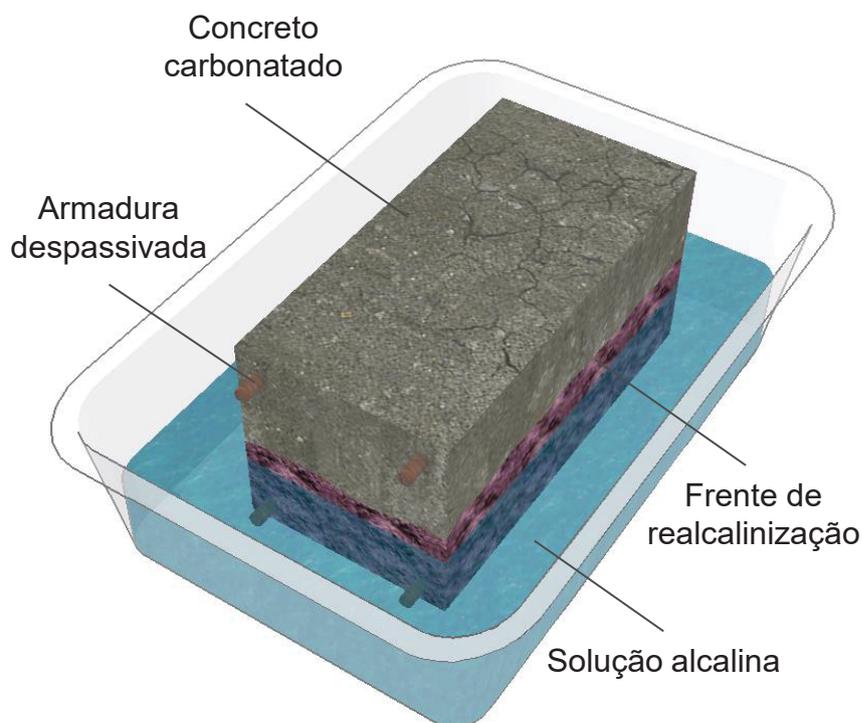
há a realcalinização ao redor das armaduras. Portanto na RAQ, ocorre apenas a realcalinização da parte externa para a parte interna, como pode ser observado na FIGURA 8.

FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA AO LONGO DO TEMPO



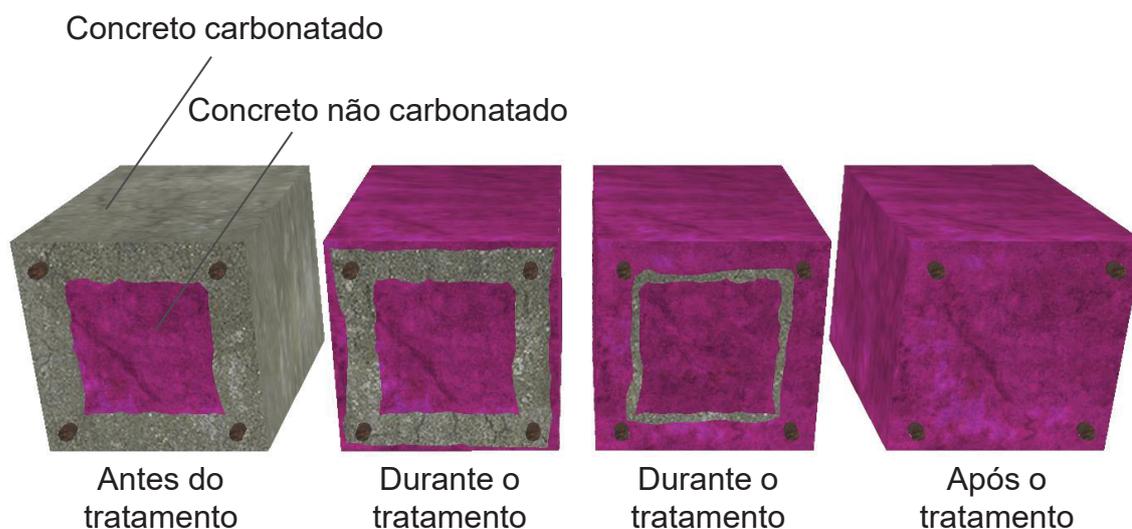
FONTE: Adaptado de Bertolini, Carsana e Redaelli (2008).

FIGURA 7 – ESQUEMA DA APLICAÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA EM LABORATÓRIO



FONTE: Adaptado de (RÉUS; MEDEIROS, 2020).

FIGURA 8 – EVOLUÇÃO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA AO LONGO DO TEMPO



FONTE: adaptado de Réus e Medeiros (2020).

A RAQ é descrita como um processo em que há absorção e difusão de soluções alcalinas no interior do concreto. No entanto não há a verificação de possíveis reações químicas, mecanismos ou compostos formados, sendo essa a sugestão de trabalhos futuros de Araújo (2009) e Réus (2017).

Os processos envolvidos no ingresso de líquidos para o interior do concreto são denominados mecanismos de transporte de massa em meios porosos. Há uma variedade de efeitos físicos e químicos que podem determinar o transporte de íons em solução aquosa (KROPP; HILSDORF, 1995). Assim como relatado por Medeiros e Helene (2009), alguns mecanismos relacionados a esse transporte são difusão, permeabilidade, absorção e sucção capilar, entre outros. Segundo Kropp e Hilsdorf (1995) e Medeiros *et al.* (2013) para concreto em serviço, uma ação combinada de dois ou mais meios de transporte pode prevalecer.

A absorção de água relaciona-se com o volume total de poros interconectados, mas apenas esse parâmetro não é representativo da permeabilidade do concreto (SCHUTTER; AUDENAERT, 2004). Tanto a difusão quanto a absorção e a permeabilidade são função do tempo que o líquido fica em contato com o concreto. Há outros fatores que podem influenciar esses mecanismos, como a viscosidade do líquido, no caso da sucção capilar e permeabilidade (MEDEIROS; HELENE, 2008). A absorção é influenciada pelas forças de sucção capilar entre o líquido e o concreto e a difusão é influenciada pela concentração diferencial de compostos químicos em solução (CASTRO; BENTZ; WEISS, 2011).

No que se refere ao ingresso das soluções alcalinas, a forma de aplicação da RAQ pode influenciar quais mecanismos hidráulicos prevalecem. Caso a aplicação seja

feita por imersão total das amostras de concreto na solução alcalina, os mecanismos predominantes tendem a ser absorção por imersão e difusão. Araújo (2009) menciona que os íons da solução alcalina reagem com os íons dissolvidos na solução dos poros formando novos produtos, elevando o pH do concreto. Contudo, não há estudos que descrevam quais reações ocorrem nesse processo.

### 2.3 AVANÇO NAS PESQUISAS SOBRE A REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA

Quando um método de tratamento de estruturas é estudado, há uma série de questionamentos a serem respondidos:

- Quais são os materiais e métodos de aplicação utilizados?
- Quanto tempo leva até o fim do tratamento?
- Quais fatores podem influenciar o tratamento?
- Quais são os efeitos colaterais?
- Quais as vantagens e desvantagens dessa técnica em relação a outras já utilizadas atualmente?

Para responder a esses questionamentos verificou-se estudos publicados sobre o tema. Assim sendo, realizou-se a busca em uma base de dados que dispõe de periódicos relevantes para a área de materiais de construção: *Science Direct*. As opções de busca selecionadas foram: *Review articles* e *Research articles*. Para a combinação de palavras-chave *realkalisation AND concrete*, foram obtidos 41 resultados e para a combinação de palavras *realkalization AND concrete* foram obtidos 46 resultados. Ao analisar sistematicamente todos os artigos, foram encontrados apenas 1 artigo sobre realcalinização química e 10 artigos sobre realcalinização eletroquímica. Os demais artigos abordavam outros temas e apenas citavam a realcalinização na parte teórica do artigo.

A fim de contemplar teses, dissertações e artigos de congresso, realizou-se então uma busca com as mesmas palavras-chave no *google* acadêmico, com os termos em inglês e em português. Após a leitura dos títulos e/ou resumos dos trabalhos encontrados, verificaram-se apenas 18 trabalhos científicos sobre a RAQ (TABELA 4), o que comprova a carência de estudos sobre o tema. É importante destacar que só foram encontrados trabalhos sobre a RAQ desenvolvidos no Brasil, sendo o primeiro trabalho publicado em revista internacional representado por Réus e Medeiros (2020).

TABELA 4 – CLASSIFICAÇÃO DOS ESTUDOS PUBLICADOS SOBRE REALCALINI-  
ZAÇÃO QUÍMICA DO CONCRETO

Fonte	Instituição	Tipo de publicação
Réus e Medeiros (2020)	UFPR	Periódico
Araújo, Melo Neto e Helene (2017)	UFRPE/UFPE	Periódico
Ferreira <i>et al.</i> (2017b)	UFPB / IFPB	Congresso
Ferreira <i>et al.</i> (2017a)	IFPB	Periódico
Perin e Mantovani (2017)	UTFPR	TCC
Réus (2017)	UFPR	Dissertação
Réus, Jesus e Medeiros (2017a)	UFPR	Simpósio
Réus, Jesus e Medeiros (2017b)	UFPR	Periódico
Réus <i>et al.</i> (2015a)	UFPR	Congresso
Réus <i>et al.</i> (2015b)	UFPR	Encontro nacional
Araujo e Helene (2011)	USP	Congresso
Araújo (2009)	USP	Tese
Araújo, Figueiredo e Helene (2007)	USP / UFG	Congresso
Araújo <i>et al.</i> (2007)	USP / UFG	Congresso
Moreira (2006)	UFG	Dissertação
Sá (2006)	UFG	Dissertação
Araújo <i>et al.</i> (2005)	UFG	Congresso
Araujo (2004)	UFG	Dissertação

### 2.3.1 Métodos de aplicação

Os métodos de aplicação utilizados em laboratório são geralmente imersão parcial ou total das amostras em solução alcalina. E alguns autores como Araújo (2009), Araújo, Figueiredo e Helene (2007), Araújo *et al.* (2007), Sá (2006) e Araujo (2004) utilizaram ciclos de umedecimento e secagem a fim de acelerar a absorção das soluções alcalinas.

Outros métodos foram testados a fim de encontrar uma aplicação simples para ser utilizada em estruturas reais. Moreira (2006) testou a aplicação da RAQ por meio de um gel de vermiculita embebido em solução alcalina, aplicado na superfície do concreto. O autor obteve resultados satisfatórios tanto para corpos de prova testados em laboratório quanto para o teste em uma estrutura de tamanho real. Araújo (2009) envolveu um pilar com plástico contendo solução alcalina em seu interior. Este experimento resultou em regiões realcalinizadas, porém houve regiões em que o contato com a solução alcalina não foi efetivo, não realcalinizando o concreto de forma homogênea.

Réus e Medeiros (2020), Réus (2017), Réus, Jesus e Medeiros (2017a) e Réus, Jesus e Medeiros (2017b) testaram os métodos de aspersão e trincha, com aplicação da solução alcalina diretamente na superfície do concreto por 5 vezes em um intervalo de 30 minutos. Ambos os métodos de aplicação são indicados pelo fabricante de uma solução alcalina comercializada no Brasil. Esses métodos não apresentaram resultados satisfatórios. Os mesmos autores também testaram o método da manta, que

consiste em envolver o concreto com manta de polietileno tereftalato (PET) embebida em solução alcalina, e posteriormente em plástico filme para evitar a evaporação das soluções. Os autores relataram resultados estatisticamente semelhantes para o método da manta e o método de total imersão das amostras, quando testados em laboratório. Entretanto, quando aplicado em uma estrutura real, o método da manta apresentou pequenas espessuras de realcalinização, da ordem de 2 mm. De acordo com os resultados observados na literatura, conclui-se que ainda há necessidade de viabilizar a aplicação da RAQ em estruturas reais.

### 2.3.2 Soluções alcalinas

As soluções aquosas comumente utilizadas para a RAQ no concreto armado são: KOH, NaOH,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , cal, solução comercial (comercializada no Brasil e sem composição especificada pelo fabricante) e solução tripla contendo KOH, NaOH e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , como apresentado na TABELA 5. Todas as soluções alcalinas utilizadas foram capazes de restaurar o elevado pH do concreto carbonatado, exceto as soluções saturadas de  $\text{Ca(OH)}_2$  e de cal, conforme descrito por Réus e Medeiros (2020) e Réus (2017). Esse resultado contrapõe o encontrado por Araújo (2009), que observou a realcalinização com solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  ao redor das armaduras. Evidencia-se a existência de poucas publicações envolvendo a RAQ com solução de  $\text{Ca(OH)}_2$ , em que se verificam resultados divergentes.

No que se refere aos possíveis elementos para a produção das soluções alcalinas, percebe-se que é possível utilizar soluções básicas para realcalinização, visto que as bases se dissociam em água, liberando hidróxido e assim elevam o pH do concreto. Elementos da família 1A (alcalinos) produzem bases solúveis em água, elementos da família 2A (alcalinos terrosos) produzem bases pouco solúveis e elementos de outras famílias produzem bases com solubilidade muito baixas. Soluções produzidas com bases de metais da família 2A, como o  $\text{Ca(OH)}_2$ , tendem a não realcalinizar o concreto em função da baixa concentração das soluções saturadas, como concluído por Réus e Medeiros (2020) e por Réus (2017). Dentre os elementos da família 1A, há materiais radioativos e materiais que geram reações muito exotérmicas, sendo perigosas ao manuseio. Dessa forma, por exclusão, as possíveis bases a serem utilizadas são LiOH, NaOH e KOH.

TABELA 5 – RESUMO DAS SOLUÇÕES ALCALINAS UTILIZADAS POR DIVERSOS AUTORES PARA A RAQ

Autor	Solução alcalina
Réus e Medeiros (2020)	KOH NaOH Ca(OH) <sub>2</sub> Tripla (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaOH+KOH) CaI CH III Comercial
Réus (2017)	KOH NaOH Ca(OH) <sub>2</sub> Tripla (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaOH+KOH) CaI CH III Comercial
Ferreira <i>et al.</i> (2017b)	Ca(OH) <sub>2</sub>
Ferreira <i>et al.</i> (2017a)	Ca(OH) <sub>2</sub>
Araújo, Melo Neto e Helene (2017)	KOH
Réus, Jesus e Medeiros (2017a)	Comercial
Réus, Jesus e Medeiros (2017b)	Comercial
Réus <i>et al.</i> (2015a)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KOH NaOH Tripla (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaOH+KOH)
Réus <i>et al.</i> (2015b)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KOH NaOH
Araujo e Helene (2011)	Ca(OH) <sub>2</sub>
Araújo (2009)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KOH Ca(OH) <sub>2</sub>
Araújo, Figueiredo e Helene (2007)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KOH Tripla (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaOH+KOH)
Araújo <i>et al.</i> (2007)	Tripla (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaOH+KOH)
Sá (2006)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KOH Tripla (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaOH+KOH)
Moreira (2006)	Tripla (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaOH+KOH)
Araujo (2004)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KOH Tripla (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +NaOH+KOH)

O LiOH não foi testado por nenhum dos autores mencionados no TABELA 5 e possui um custo 58 vezes maior que o NaOH e o KOH (custos obtidos por meio de cotação na região de Curitiba-PR no ano de 2022). Em função do alto custo do LiOH e

da boa eficácia de outras bases, esse material pode ser considerado economicamente inviável para a RAQ. A solução de NaOH mostrou-se eficiente para Réus *et al.* (2015a), Réus *et al.* (2015b) e Réus (2017). Enquanto a solução de KOH mostrou-se eficaz para Réus (2017), Réus *et al.* (2015a), Réus *et al.* (2015b), Araújo (2009), Sá (2006) e Araujo (2004). Ambas as soluções podem ser utilizada com eficácia para a RAQ, porém deve-se observar que a solução de KOH apresentou maior velocidade de realcalinização do que a solução de NaOH conforme relatado por Réus e Medeiros (2020), Réus (2017) e Réus *et al.* (2015b).

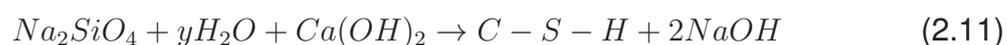
Além das bases, os sais alcalinos são opções viáveis a serem utilizadas. Entretanto, o único sal testado em pesquisas científicas publicadas foi o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Essa solução alcalina é muito utilizada em estudos sobre a RAE, por isso foi também utilizada para RAQ, em alguns trabalhos citados na TABELA 5. Segundo Réus *et al.* (2015a), Réus *et al.* (2015b) e Araujo (2004), a solução de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  apresentou resultados pouco eficazes em relação a outras soluções testadas nesses estudos. Segundo Sá (2006) e Araújo (2009), essa mesma solução apresentou resultados satisfatórios, o que demonstra não haver consenso acerca da eficácia desse material. Destaca-se que a forma de elevar o pH do concreto por meio da RAQ e da RAE são diferentes. Na RAQ ocorre absorção e difusão, enquanto na RAE ocorre também a eletro-osmose, eletromigração e eletrólise. Por isso, uma solução alcalina eficiente para a RAE não será necessariamente eficiente para a RAQ.

Dentre os sais para serem utilizados como solução para a realcalinização, há os cloretos, sulfatos, fluoretos, fosfato, brometos, iodetos, carbonatos, nitratos e silicatos. Alguns desses sais podem estar associados a manifestações patológicas no concreto como cloretos e sulfatos. Outros não devem ser utilizados por serem pouco solúveis como os fosfatos. Já os brometos de sódio ou potássio possuem pH próximo ao neutro quando completamente dissociados em solução aquosa e por isso não tendem a elevar o pH do concreto por meio da realcalinização. O iodeto de sódio e potássio possuem custo elevado (cerca de 25x o preço do silicato de sódio alcalino).

Quanto aos carbonatos, o carbonato de sódio foi testado e não apresentou resultados satisfatórios para Réus e Medeiros (2020), Réus *et al.* (2015a), Réus *et al.* (2015b) e Araujo (2004) em relação a outras soluções alcalinas. Com isso restam apenas os nitratos e silicatos para serem aplicados para a realcalinização, sendo que ambos ainda não foram testados para a RAQ.

O silicato de sódio é um sal alcalino que já é utilizado na construção civil, sendo empregado como endurecedor de superfície. Os efeitos exatos que causam a melhoria do desempenho do concreto ainda não são completamente compreendidos (FRANZONI; PIGINO; PISTOLESI, 2013). Existe a teoria de que o silicato de sódio reage com a portlandita formando C-S-H (BALTAZAR *et al.*, 2014), conforme a reação

descrita por Thompson *et al.* (1997) apresentada na Equação (2.11). Isso faz com que os poros sejam bloqueados, além de aumentar a resistência superficial e diminuir a permeabilidade do concreto, conforme relatado por Kagi e Ren (1995), Thompson *et al.* (1997), Medeiros, Pereira e Helene (2012), Franzoni, Pigino e Pistolesi (2013) e Baltazar *et al.* (2014).



Outra hipótese é que haja a formação de SiO<sub>2</sub> precipitado (THOMPSON *et al.*, 1997), ou ainda que haja a formação de um gel expansivo semelhante ao gel de RAA, capaz de selar os poros do concreto (THOMPSON *et al.*, 1997).

Outro possível benefício do silicato de sódio alcalino em relação ao KOH e o NaOH é que essas bases são materiais muito solúveis. A princípio, a alta solubilidade beneficia o processo de RAQ por haver mais íons dissolvidos em solução, em contrapartida são materiais que podem ser lixiviados. A formação de C-S-H pelo silicato de sódio pode bloquear os poros, tornando o concreto realcalinizado com esse material menos lixiviável em relação a concretos realcalinizados com KOH ou NaOH.

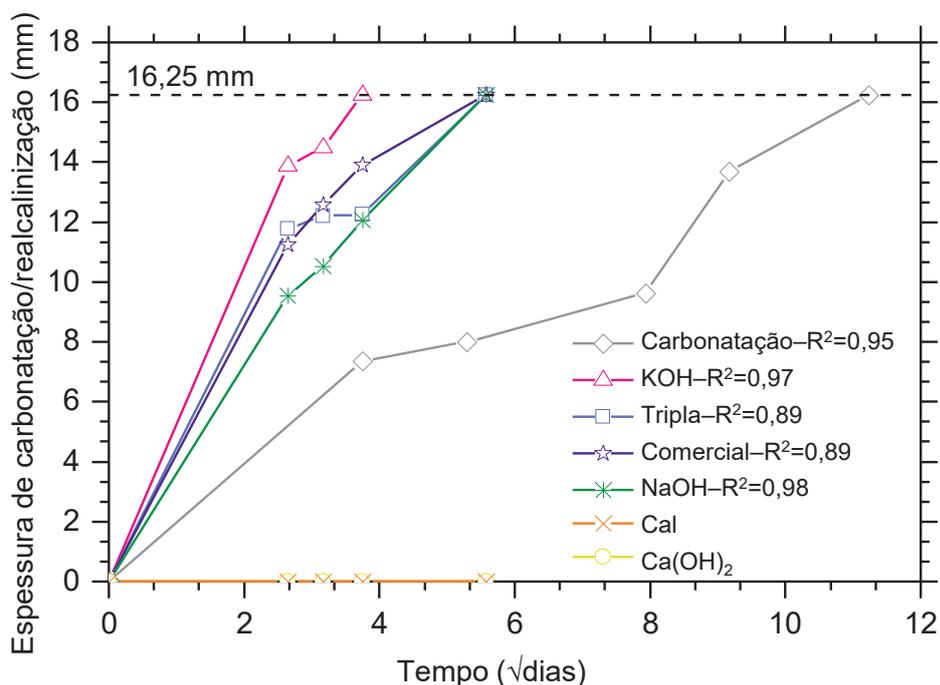
### 2.3.3 O efeito das adições pozolânicas na realcalinização química

É de largo conhecimento que a velocidade de carbonatação apresenta comportamento exponencial. A FIGURA 9 apresenta resultados obtidos no trabalho de Réus e Medeiros (2020), onde o tempo (em  $\sqrt{dias}$ ) é dado no eixo das abscissas e a profundidade de carbonatação e de realcalinização (em mm) é dada no eixo das ordenadas. O eixo das abscissas é dado em raiz quadrada de dias para poder linearizar o gráfico e obter o coeficiente angular da reta.

Com base nisso, Réus e Medeiros (2020) apresentam a Equação (2.12), onde  $e_r$  é a espessura realcalinizada (em mm),  $k_{realc}$  é o coeficiente de realcalinização (em  $mm/\sqrt{dias}$ ) e  $t$  é tempo (em dias). Essa equação é baseada no modelo clássico para carbonatação proposto por Tutti (1982) e com ela é possível obter o coeficiente de realcalinização ( $k_{realc}$ ), resultando em um valor numérico para avaliar o avanço da realcalinização ao longo do tempo. O  $k_{realc}$  é justamente o coeficiente angular da reta, no caso de gráficos com  $\sqrt{dias}$  no eixo das abscissas.

O tempo necessário para realcalinizar amostras de concreto é variável, podendo ser influenciado por fatores como o tipo de concreto tratado (relação água/cimento, tipo de cimento, índice de vazios, permeabilidade, absorção), tipo de soluções alcalinas utilizadas (materiais utilizados e concentração) e o método de aplicação. A influência dos tipos de cimento na RAQ ocorre em função do teor e do tipo de adições minerais. A quantidade desses materiais em cada tipo de cimento é dada na TABELA 6.

FIGURA 9 – CARBONATAÇÃO E REACALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS AO LONGO DO TEMPO



FONTE: Adaptado de Réus e Medeiros (2020).

$$e_r = k_{realc} \cdot \sqrt{t} \quad (2.12)$$

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014a), as adições pozolânicas reagem com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento formando compostos com propriedades ligantes. Como consequência das reações pozolânicas, os cimentos produzidos com diferentes quantidades da adição geram concretos com propriedades distintas, especialmente no que se refere à absorção de água e à reserva alcalina Medeiros *et al.* (2017a). A fase amorfa das pozolanas reage com a portlandita, ocasionando a formação de C-S-H secundário, preenchendo os vazios da pasta de cimento, aumentando a densidade da pasta pelo refinamento dos poros e diminuindo o ingresso de substâncias na matriz (HOPPE FILHO *et al.*, 2013). No trabalho de Medeiros *et al.* (2017a), a aplicação de metacaulim e sílica ativa como substituição parcial do cimento Portland, em teor de 10%, provocou aumento da velocidade de carbonatação do concreto em 32%. No mesmo estudo, observou-se uma pequena variação da absorção de água por sucção (redução de 10% na sorvidade) de amostras com substituição de sílica ativa e sem diferença significativa para amostras com metacaulim.

TABELA 6 – TIPOS DE CIMENTO

Designação normalizada	Sigla	Clínquer sulfato de cálcio	Escória de de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	95-100	0-5	0-5	0-5
	CP I-S	90-94	0	0	6-10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno	CP II-E	51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z	71-94	0	6-14	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F	75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de alto forno	CP III	25-65	35-75	0	0-10
Cimento Portland pozolânico	CP IV	45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V-ARI	90-100	0	0	0-10

FONTE: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018).

Outro efeito das adições pozolânicas é a diminuição da reserva alcalina do concreto (HOPPE FILHO *et al.*, 2013), (HOPPE FILHO *et al.*, 2017b). Isso ocorre porque há o consumo parcial ou total do hidróxido de cálcio e, portanto, há a diminuição da alcalinidade da solução dos poros do concreto (MEDEIROS *et al.*, 2017a), (MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017b), (HOPPE FILHO *et al.*, 2017a), (HOPPE FILHO *et al.*, 2017b), (ZHANG; SUN; YAN, 2003). Na carbonatação, as adições pozolânicas tem um efeito combinado. O refinamento dos poros faz com que o ingresso de CO<sub>2</sub> seja dificultado, e a diminuição da reserva alcalina faz com que o concreto tenha menor alcalinidade antes mesmo do início da carbonatação. Exatamente neste contexto, Shah e S. (2018) citam que a velocidade de carbonatação pode variar em função do tipo e quantidade de adição mineral utilizada. Como os diferentes cimentos possuem quantidades diferentes de adições, a composição do cimento desempenha um papel importante na carbonatação do concreto (KIRCHHEIM; RHEINHEIMER; DAL MOLIN, 2015), (MEDEIROS *et al.*, 2017a).

Neste contexto, é de se esperar que diferentes adições pozolânicas possam resultar em diferentes velocidades de realcalinização (RÉUS, 2017). Portanto, o tipo de cimento utilizado também deve ter influência na velocidade de realcalinização. Ademais,

deve-se levar em conta que a permeabilidade após a carbonatação é alterada, devido às mudanças de volume e densidade do compósito de cimento Portland (ZHANG; SHAO, 2016). Deste modo, amostras de concreto que apresentam elevada velocidade de carbonatação não necessariamente apresentam elevada velocidade de realcalinização.

#### 2.3.4 Possíveis efeitos colaterais

No que se refere às propriedades do concreto tratado pela RAQ, de maneira geral, verificou-se que o tratamento não prejudica a resistência à compressão do concreto, comparando amostras de referência (não carbonatadas) com amostras realcalinizadas conforme mencionado por Réus (2017), Réus, Jesus e Medeiros (2017a), Réus, Jesus e Medeiros (2017b), Sá (2006) e Araujo (2004).

A reação álcali-agregado e a perda da aderência entre a superfície realcalinizada e revestimentos podem ser efeitos colaterais da RAQ. Verificou-se nos trabalhos de Araújo *et al.* (2007) e Araujo (2004) que a aderência entre o concreto realcalinizado e argamassas industrializadas de revestimento não são prejudicadas. Em contrapartida, após a RAQ houve perda de aderência na aplicação de tintas e vernizes, como observado por Araújo *et al.* (2007) e Sá (2006). O possível surgimento da reação álcali agregado após a RAQ ainda não foi estudado, sendo sugerido como trabalho futuro por Réus (2017) e Araújo (2009).

#### 2.3.5 Quando utilizar a realcalinização química

Com base nas publicações listadas na TABELA 4, verificou-se ser consenso que a RAQ pode ser utilizada como um método preventivo à corrosão, sendo utilizada para realcalinizar a camada de cobrimento antes da profundidade de carbonatação atingir as armaduras. E a TABELA 7 e a TABELA 8 mostram a existência de trabalhos que se destinam a verificar se a RAQ pode repassivar as armaduras. Os primeiros trabalhos que analisaram a possível repassivação das armaduras não apresentaram resultados satisfatórios até 26, 595 e 563 dias após o final da RAQ ((ARAUJO, 2004), (SÁ, 2006) e (ARAÚJO; FIGUEIREDO; HELENE, 2007), respectivamente).

Já os trabalhos de Araújo (2009), Araujo e Helene (2011), Araújo, Melo Neto e Helene (2017) e Ferreira *et al.* (2017b), indicam que a repassivação da armadura após a carbonatação depende do tempo que a armadura esteve em contato com o ambiente carbonatado. Destaca-se que todos os trabalhos de Araújo (2009), Araujo e Helene (2011), Araújo, Melo Neto e Helene (2017) utilizaram como amostras compósitos de cimento Portland e iniciaram a RAQ logo após verificar a desp passivação das armaduras. Já Ferreira *et al.* (2017b) utilizou como amostra a armadura imersa em solução aquosa com cal, simulando os poros do concreto. O estudo de Ferreira *et al.* (2017b) foi o único que estudou efetivamente a influência do grau de corrosão das amostras antes de

iniciar a realcalinização. Com isso verifica-se que há carência de estudar a influência do grau de corrosão das amostras antes de iniciar a realcalinização em amostras de concreto.

Embora a repassivação das armaduras não tenha sido verificada nos estudos de Araujo (2004) e Sá (2006), de acordo com Araujo (2004) e Ferreira *et al.* (2017b) mesmo em casos em que não houve repassivação das armaduras, há uma tendência na melhoria dos resultados do potencial de corrosão e densidade de corrente, evidenciando a diminuição da cinética da corrosão (FERREIRA *et al.*, 2017b). Isso pode ocorrer, porque a reconstituição da camada de passivação é lenta (ARAÚJO, 2009), ou seja, é possível que a repassivação ocorra apenas após elevados períodos de tempo depois da RAQ. Desse modo, conclui-se que a RAQ pode ser utilizada para prevenir a corrosão ou, em casos em que a corrosão já iniciou, pode ser utilizada para diminuir a cinética deste mecanismo de deterioração.

TABELA 7 – RESUMO DOS ESTUDOS SOBRE A CORROÇÃO DE ARMADURAS E A RAQ

Referências	Tipo de amostra	Tempo de monitoramento após a RAQ	Estado da amostra antes da RAQ	Técnica de monitoramento
Ferreira <i>et al.</i> (2017b)	Solução saturada de Ca(OH) <sub>2</sub>	19 dias	7, 28 e 90 dias em solução carbonatada	Resistência de polarização <sup>3</sup>
Araújo, Melo Neto e Helene (2017)	Concreto	180 dias	Após despassivação das armaduras (EIE <sup>1</sup> e E <sub>corr</sub> <sup>4</sup> )	E <sub>corr</sub> <sup>4</sup> e EIE <sup>1</sup>
Araujo e Helene (2011)	Concreto	180 dias	Após despassivação das armaduras (EIE <sup>1</sup> e E <sub>corr</sub> <sup>4</sup> )	E <sub>corr</sub> <sup>4</sup> e EIE <sup>1</sup>
Araújo (2009)	Concreto	180 dias	Após despassivação das armaduras (GECOR6 <sup>2</sup> )	$i_{corr}^4$ , E <sub>corr</sub> <sup>4</sup> , R <sub>ohm</sub> <sup>4</sup> e $\rho^4$
Araújo, Figueiredo e Helene (2007)	Concreto	563 dias	Após despassivação das armaduras (GECOR6 <sup>2</sup> )	$i_{corr}^4$ , E <sub>corr</sub> <sup>4</sup> , R <sub>ohm</sub> <sup>4</sup> e $\rho^4$
Sá (2006)	Concreto	595 dias	Após despassivação das armaduras (GECOR6 <sup>2</sup> )	$i_{corr}^4$ , E <sub>corr</sub> <sup>4</sup> , R <sub>ohm</sub> <sup>4</sup> e $\rho^4$
Araujo (2004)	Concreto	26 dias	Após despassivação das armaduras (GECOR6 <sup>2</sup> )	$i_{corr}^4$ , E <sub>corr</sub> <sup>4</sup> , R <sub>ohm</sub> <sup>4</sup> e $\rho^4$

<sup>1</sup> EIE: espectroscopia de impedância eletroquímica, que mede a impedância em  $\Omega$ ;

<sup>2</sup> GECOR6: equipamento que mede o potencial de corrosão em  $mV$  e a velocidade de corrosão em  $\mu A/cm^2$ ;

<sup>3</sup> Resistência de polarização: técnica que mede o potencial de corrosão a velocidade de corrosão;

<sup>4</sup>  $i_{corr}$ = velocidade de corrosão, E<sub>corr</sub>= potencial de corrosão, R<sub>ohm</sub>= resistência ohmica e  $\rho$ = resistividade elétrica.

TABELA 8 – RESUMO DOS ESTUDOS SOBRE A CORROSÃO DE ARMADURAS E A RAQ E SUAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA QUANTO A PASSIVAÇÃO

Referências	Variável de resposta para passivação	Principais conclusões
Ferreira <i>et al.</i> (2017b)	$i_{\text{corr}}^2$	A repassivação depende do tempo de contato entre a armadura e o ambiente carbonatado. Houve a diminuição da cinética do processo de corrosão.
Araújo, Melo Neto e Helene (2017)	$E_{\text{corr}}^2$ e $E E^1$	É possível que não haja repassivação em armaduras com estágio de propagação da corrosão.
Araujo e Helene (2011)	$E_{\text{corr}}^2$ e $E E^1$	Resultados satisfatórios de repassivação e resultados de impedância melhores do que antes da carbonatação.
Araújo (2009)	$R_{\text{ohm}}^2$	A repassivação das armaduras em estágios de propagação da corrosão pode ser comprometida.
Araújo, Figueiredo e Helene (2007)	$i_{\text{corr}}^2$	Não houve repassivação até o fim do trabalho.
Sá (2006)	$i_{\text{corr}}^2$	Não houve repassivação até o fim do trabalho.
Araujo (2004)	$i_{\text{corr}}^2$	Não houve repassivação até o fim do trabalho.

<sup>1</sup> E|E: espectroscopia de impedância eletroquímica, que mede a impedância em  $\Omega$ ;

<sup>2</sup>  $i_{\text{corr}}$ = velocidade de corrosão;  $E_{\text{corr}}$ = potencial de corrosão;  $R_{\text{ohm}}$ = resistência ohmica.

### 3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os capítulos 4, 5 e 6 possuem alguns procedimentos de ensaio e materiais semelhantes. Visando proporcionar uma leitura contínua e evitar que o texto se torne repetitivo, o presente capítulo destina-se à descrição desses procedimentos de ensaio e caracterização desses materiais. No caso de procedimentos de ensaio de materiais que não se repetem, estes são descritos dentro do programa experimental do próprio capítulo em que é utilizado.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados foram cimentos do tipo CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z e CP IV, agregados miúdo e graúdo e soluções alcalinas para a realcalinização química. A adição pozolânica utilizada nos cimentos CP II-Z e CP IV é cinza volante procedente da queima de carvão mineral nas caldeiras de usinas termoeletricas em Capivari de Baixo/SC. A caracterização química dos cimentos por meio do ensaio de FRX e a quantidade dessa pozolana e fíler calcário presente em cada um dos cimentos é apresentada na TABELA 9. Observa-se que os cimentos sem pozolana apresentam maior quantidade de CaO, enquanto os cimentos com pozolana apresentam maior quantidade de SiO<sub>2</sub>. A TABELA 10 mostra a caracterização física e mecânica dos quatro tipos de cimentos utilizados na pesquisa.

O agregado miúdo utilizado é uma areia natural com massa específica de 2,68 g/cm<sup>3</sup>. E o agregado graúdo é um gnaisse com diâmetro máximo característico igual a 12,50 mm, sendo considerado uma brita 0. Sua massa específica seca é de 2,57 g/cm<sup>3</sup>, módulo de finura de 6,0 (de acordo com a NBR 7211 ABNT (2009)), teor de finos passante na peneira 0,075 mm de 0,89 % e índice de forma de 2,57 (de acordo com a NBR 7809 ABNT (2019)). As curvas granulométricas dos agregados são apresentadas na FIGURA 10 e na FIGURA 11.

TABELA 9 – PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS CIMENTOS UTILIZADOS NOS CAPÍTULOS 4 E 5

Produto	CP V-ARI	CP II-F	CP II-Z	CP IV
CaO (%)	61,56	61,96	53,62	45,18
SiO <sub>2</sub> (%)	18,56	18,75	21,31	29,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,34	4,19	6,44	9,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,86	2,74	3,16	4,16
MgO (%)	3,67	3,94	3,12	2,67
SO <sub>3</sub> (%)	3,03	2,56	2,73	2,17
CaO livre (%)	1,40	0,90	0,76	0,87
Perda ao fogo (%)	3,65	5,86	7,91	4,03
Resíduo insolúvel (%)	0,77	1,04	11,13	24,52
Equivalente alcalino (%)	0,67	0,68	0,87	1,17
% de fíler calcário (%)	≈ 5	≈ 11	-	-
% de adição pozolânica (%)	-	-	≈ 11	≈ 24

FONTE: Itambé (2018).

TABELA 10 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CIMENTOS UTILIZADOS NOS CAPÍTULOS 4 E 5

Propriedade	CP V-ARI	CP II-F	CP II-Z	CP IV
Expansão quente (mm)	0,00	1,00	0,50	0,00
Início de pega (h)	3:10	3:50	4:20	4:30
Fim de pega (h)	4:00	4:30	5:15	5:15
Água para consistência normal (%)	29,2	26,4	27,4	29,8
Área específica blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4410	3170	3620	4190
% retida na peneira #200 (%)	0,10	1,70	2,60	0,40
% retida na peneira #350 (%)	0,50	9,70	10,40	2,60
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	25,2	17,1	13,6	13,6
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	41,6	30,1	26,5	24,9
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	47,1	36,9	31,4	31,6
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	-	43,2	-	46,0

FONTE: Itambé (2018).

FIGURA 10 – GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO UTILIZADO NOS CAPÍTULOS 4 E 5

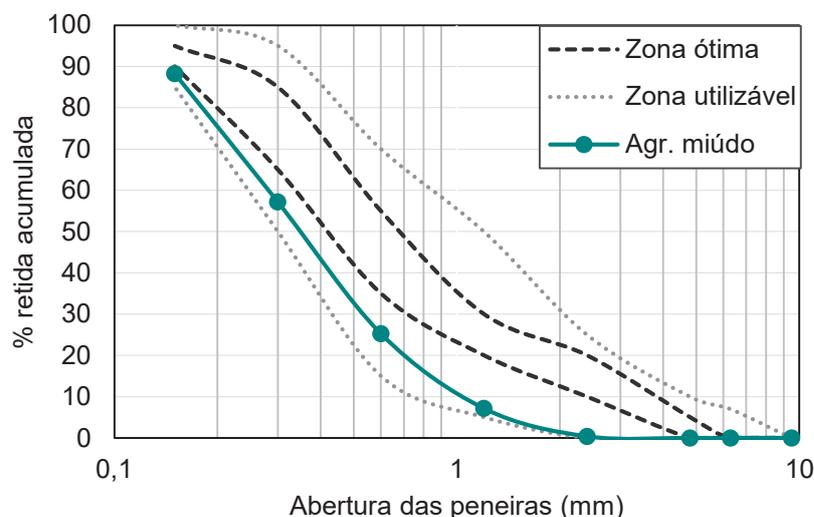
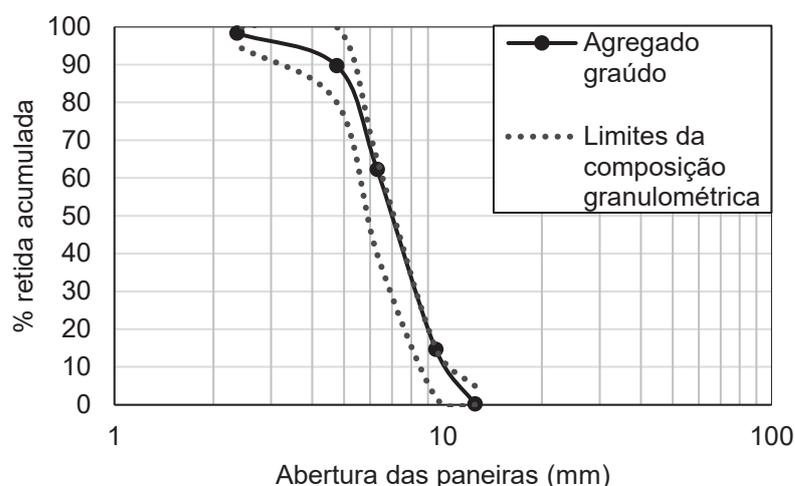


FIGURA 11 – GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO NOS CAPÍTULOS 4 E 5



Apenas no Capítulo 6 foram utilizados materiais diferentes para a fabricação do concreto. Isso ocorreu, pois essas amostras haviam sido previamente moldadas para o trabalho de Réus (2017) e excluídas do escopo do trabalho. Decidiu-se incluir essas amostras no presente trabalho, a fim de verificar o efeito da RAQ nessas amostras com idades avançadas e em estágio de corrosão. Quando iniciou-se o monitoramento, as amostras estavam com 1294 dias de idade e 1140 dias após o final da carbonatação. Neste caso, foi utilizado o cimento CP V-ARI com massa específica de  $3,09 \text{ g/cm}^3$  (NBR NM 23 (ABNT, 2001)) e caracterização química, física e mecânica conforme TABELA 11 e TABELA 12. As propriedades do agregado miúdo são apresentadas na TABELA 13 e a curva granulométrica do agregado é mostrada na FIGURA 12. O

agregado graúdo possui massa específica de 2,75 g/cm<sup>3</sup>, massa unitária de 1,63 g/cm<sup>3</sup>, diâmetro máximo de 25 mm e índice de forma de 2,56 (lamelar) e curva granulométrica conforme FIGURA 13.

TABELA 11 – PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CIMENTO CP V-ARI UTILIZADO NO CAPÍTULO 6

Produto	(%)
CaO	60,00
SiO <sub>2</sub>	18,38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,65
MgO	4,37
SO <sub>3</sub>	2,82
CaO livre	0,67
Perda ao fogo	2,97
Resíduo insolúvel	0,68
Equivalente alcalino	0,58

FONTE: Itambé (2014).

TABELA 12 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO CP V-ARI UTILIZADO NO CAPÍTULO 6

Propriedade	CP V-ARI
Expansão quente (mm)	0,50
Início de pega (h)	2:20
Fim de pega (h)	3:00
Água para consistência normal (%)	28
Área específica blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4130
% retida na peneira #200 (%)	0,40
% retida na peneira #350 (%)	3,60
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	22,5
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	34,8
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	42,0
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	48,8

FONTE: Itambé (2014).

TABELA 13 – PROPRIEDADES DO AGREGADO MIÚDO UTILIZADOS NO CAPÍTULO 6

Propriedade	Resultado
Módulo de finura	1,76
Diâmetro máximo do agregado	1,18 mm
Massa específica	3,44 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária	1,70 g/cm <sup>3</sup>

FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO UTILIZADO NO CAPÍTULO 6

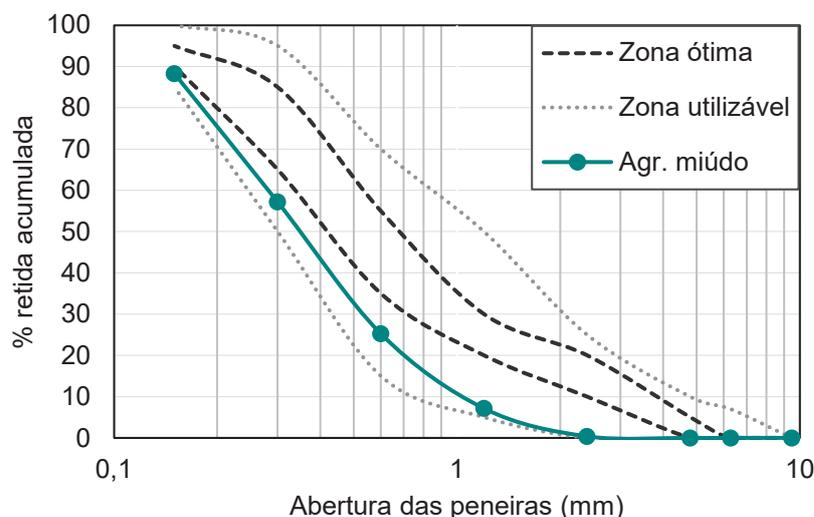
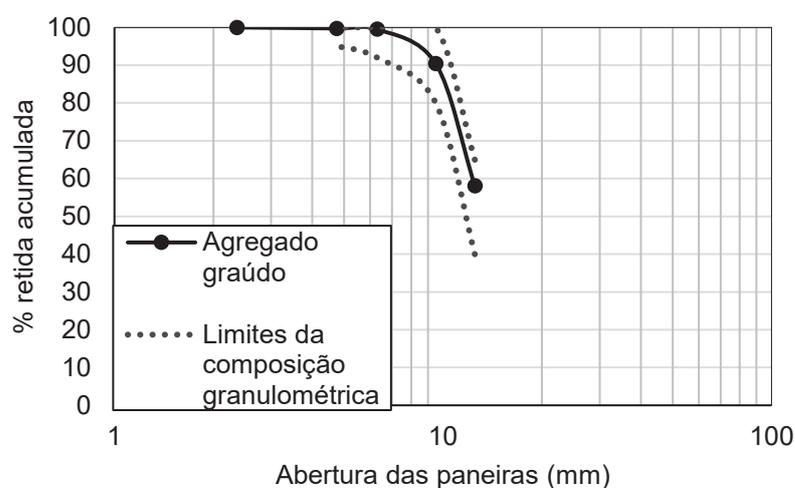


FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO NO CAPÍTULO 6



As soluções alcalinas utilizadas foram solução de KOH, silicato de sódio alcalino e de NaOH. Utilizou-se a solução de KOH na concentração de 2,67 mol/l (equivalente a 150 g/l) conforme utilizada por Réus e Medeiros (2020), Réus (2017), Araújo, Melo Neto e Helene (2017), Araújo, Figueiredo e Helene (2007), Araújo *et al.* (2007), Sá (2006) e Araujo (2004). A solução de silicato de sódio alcalino ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ainda não foi utilizada em outros estudos e suas características são descritas na TABELA 14. O silicato de sódio alcalino já é fornecido de forma líquida e foi aplicado sem nenhuma outra diluição. A solução de NaOH (utilizada no Capítulo 6) foi utilizada na concentração de 3,75 mol/l (equivalente a 150 g/l) conforme utilizado por Réus (2017).

TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS DO SILICATO DE SÓDIO ALCALINO

Determinação	Silicato de sódio alcalino
Densidade a 25 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1,560 - 1,585
Viscosidade (cP)	900 - 1400
Óxido de sódio (%)	14,5 - 15,5
Óxido de silício (%)	30,5 - 34,0
Sólidos totais (%)	46,0 - 48,5
Relação (SiO <sub>2</sub> )/(Na <sub>2</sub> O)	1,96 - 2,34
Água (%)	51,5 - 54,0

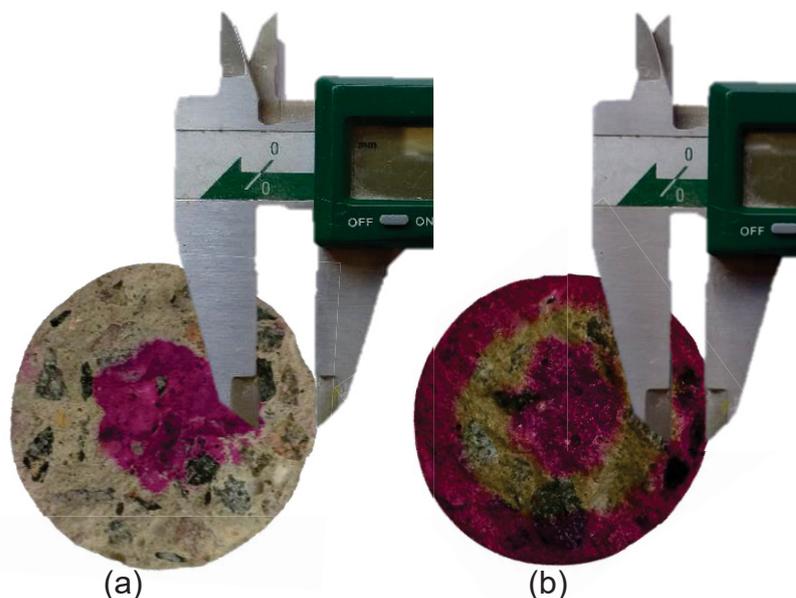
### 3.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIOS

As amostras passaram por processo de moldagem, cura, sazonalidade, carbonatação acelerada e realcalinização. O traço utilizado nas amostras de concreto de todo o trabalho foi 1,00 : 2,60 : 3,20 e relação água/cimento de 0,70 e consumo de cimento de 315 kg/m<sup>3</sup>. Definiu-se essa elevada relação água/cimento a fim de proporcionar maior porosidade e permeabilidade ao concreto e conseqüentemente um avanço rápido da carbonatação. O sazonalidade foi realizado em câmara seca (temperatura igual a (22±2) °C e umidade relativa correspondente a (50±10) %) por 28 dias. O sazonalidade é realizado para equilibrar a umidade no interior dos corpos de prova, a fim de obter um avanço homogêneo da frente de carbonatação (PAULETTI, 2009).

A carbonatação acelerada foi realizada por câmara de carbonatação com 5 % de CO<sub>2</sub>, (65±5) % de umidade relativa e (23±1) °C, pois, de acordo com Raisdorfer (2015), esses valores tendem a apresentar maiores velocidades de carbonatação e são os valores mais utilizados em pesquisas sobre o tema.

Para medir a profundidade de carbonatação, selecionaram-se 3 amostras de locais diferentes da câmara de carbonatação a fim de minimizar a possível influência da localização das amostras dentro da câmara. As amostras foram fraturadas transversalmente com marreta e talhadeira e a superfície foi limpa com um pincel. Aspergiu-se na superfície recém fraturada a solução de fenolftaleína, na proporção de 1 % de fenolftaleína para 70 % de álcool etílico e 29 % de água destilada conforme as recomendações da CPC-18 (RILEM, 1988). Essa solução possui ponto de viragem de incolor para rosa quanto o pH está entre 8 e 10 e de rosa para magenta quanto pH está acima de 10. Com isso, é possível medir a profundidade de carbonatação (FIGURA 14 (a)) ou realcalinização (FIGURA 14 (b)).

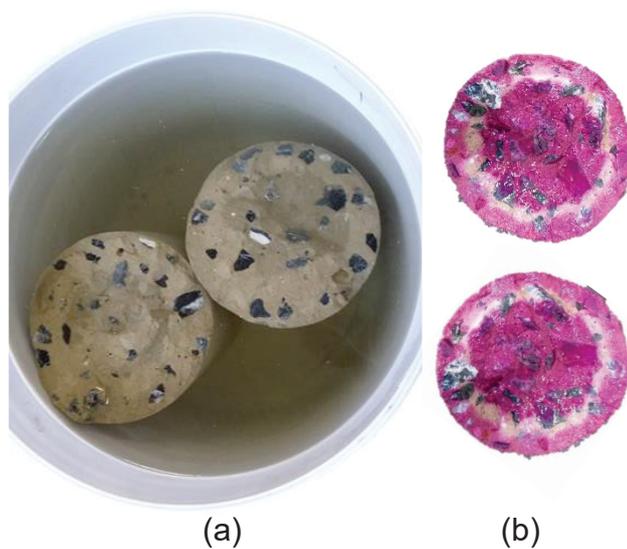
FIGURA 14 – MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE (A) CARBONATAÇÃO E (B) REALCALINIZAÇÃO



A realcalinização foi realizada com o método de total imersão das amostras em solução alcalina sem ciclos de umedecimento e secagem. Cada amostra testada foi fraturada e uma parte da amostra foi retirada da imersão para medição da profundidade de realcalinização (FIGURA 15(b)), enquanto a outra parte retornou para o tratamento (FIGURA 15(a)), para posteriormente ser fraturada e utilizada para próxima leitura. No caso de medição da realcalinização, a superfície foi seca por meio de um jato de ar quente por 5 minutos por meio de um aquecedor termoventilador elétrico de 1500 W de potência operando em nível médio de calor (50% da potência do equipamento). E posteriormente foi aspergida solução alcoólica de fenolftaleína.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em 3 amostras de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007) e utilizaram-se discos de neoprene para distribuição regular das cargas na base e topo dos corpos de prova. As amostras estavam saturadas e a velocidade de aplicação de carga na prensa foi 0,45 MPa/s.

FIGURA 15 – PARTE DAS AMOSTRAS (A) MANTIDAS EM REALCALINIZAÇÃO E (B) RETIRADAS DO TRATAMENTO PARA ANÁLISE DA REALCALINIZAÇÃO



## 4 ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ALCALINAS E PRÉ-TRATAMENTO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Conforme descrito no Capítulo 2, há diversas soluções alcalinas utilizadas para realcalinizar o concreto, sendo elas bases ou sais alcalinos. A solução de KOH apresentou maior velocidade de realcalinização que a solução de NaOH, conforme relatado por Réus *et al.* (2015b) e Réus (2017). Dentre os sais alcalinos, apenas o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  foi utilizado, sendo considerado satisfatório por Araújo (2009), porém não apresentando bons resultados para Réus *et al.* (2015a) e Réus *et al.* (2015b).

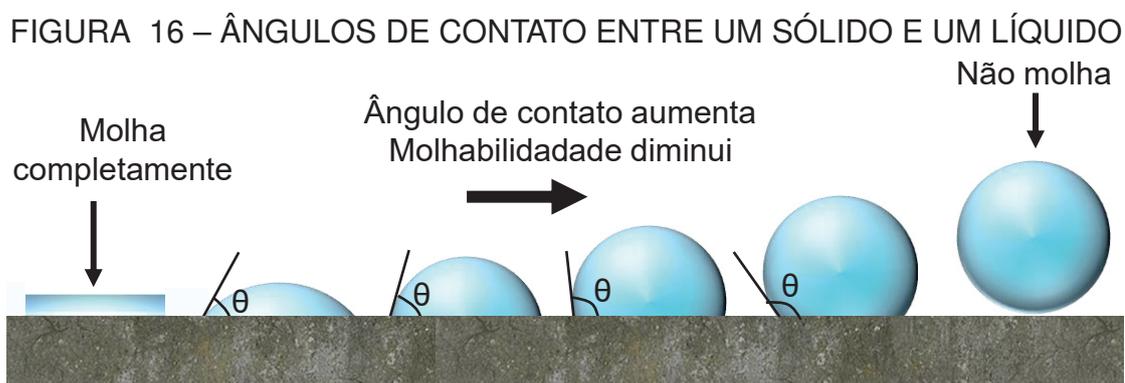
Há também sais alcalinos que ainda não foram utilizados para a RAQ, porém são utilizados para outros fins na construção civil, como o silicato de sódio alcalino, que é aplicado como endurecedor de superfície do concreto. Esse sal alcalino foi considerado, pois é possível que haja o tamponamento dos poros do concreto após a RAQ, evitando nova carbonatação e evitando a saída da solução alcalina utilizada para a RAQ.

Um dos intuitos de estudar diferentes soluções alcalinas é verificar qual solução proporciona maior velocidade de realcalinização. Outras possíveis maneiras de aumentar essa velocidade é realizando um pré-tratamento com ácido ou adicionando produto tensoativo na solução alcalina. O pré-tratamento pode ser uma limpeza superficial com ácido, visando dissolver o  $\text{CaCO}_3$  existente na superfície do concreto carbonatado e conseqüentemente aumentar a velocidade de realcalinização. Alguns ácidos como ácido fluorídrico, ácido bromídrico e ácido iodídrico são de difícil manipulação e altamente corrosivos, não sendo de fácil aplicação prática para a RAQ. O ácido nítrico possui compra controlada, portanto há maior dificuldade para sua aquisição em relação ao ácido clorídrico e ao ácido sulfúrico. Os ácidos sulfúrico e clorídrico possuem elevada solubilidade, evitando o tamponamento dos poros do concreto após o pré-tratamento, podendo ser uma opção viável para realizar uma limpeza superficial do concreto. Destaca-se que o pré-tratamento não foi anteriormente testado, sendo um dos materiais testados na presente pesquisa.

Ainda no intuito de aumentar a velocidade de realcalinização, outra possibilidade inexplorada é o uso de tensoativos em conjunto com as soluções alcalinas. Os tensoativos agem aumentando a molhabilidade de líquidos por diminuição da tensão superficial da solução. Os tensoativos são compostos por uma molécula que apresenta uma parte com característica apolar ligada a uma outra parte com característica polar (DALVIN, 2019). Os tensoativos podem ser divididos em iônicos, aniônicos ou não iônicos, onde os não iônicos são neutros e não têm nenhuma carga em sua extremi-

dade hidrofílica. Os tensoativos não iônicos apresentam baixa espuma (DALTIM, 2019), característica necessária, visto que a produção de espuma pode dificultar a aplicação da RAQ.

A molhabilidade é a habilidade de um líquido manter contato com uma superfície sólida, o que resulta em interações intermoleculares (LEVY, 1992). A molhabilidade pode ser determinada a partir do ângulo que o líquido forma na superfície de contato com o sólido, denominado ângulo de contato. Segundo Coutinho (2007), o ângulo de contato depende da relação entre as forças adesivas e forças coesivas do líquido e determina a qualidade do umedecimento de um sólido por um líquido. A FIGURA 16 apresenta diferentes ângulos de contato entre um sólido e um líquido. Observa-se que quanto maior o ângulo de contato, menor é a molhabilidade. Com isso, quando misturados às soluções alcalinas é possível que os tensoativos aumentem a absorção das soluções alcalinas no interior do concreto.



FONTE: Adaptado de Sampaio (2013).

Os objetivos desse capítulo são: 1) analisar a eficácia da RAQ com solução de silicato de sódio alcalino e solução de hidróxido de potássio; 2) analisar a eficácia do pré-tratamento com ácido sulfúrico; 3) investigar o uso de um tensoativo adicionado às soluções alcalinas para a RAQ.

## 4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foi utilizado cimento do tipo CP V-ARI, em função da baixa quantidade de adições minerais, minimizando a interferência desse material no estudo. As características químicas, mecânicas e físicas do cimento utilizado estão apresentadas no Capítulo 3.

Foram confeccionadas 120 amostras cilíndricas de concreto com 5 x 10 cm. Optou-se por amostras de pequena dimensão a fim de otimizar o espaço no interior da câmara de carbonatação. A proporção de mistura utilizada foi 1 : 2,60 : 3,20 e relação água/cimento de 0,70 e consumo de cimento de 315 kg/m<sup>3</sup>. Utilizou-se brita 0 como agregado graúdo, em função das dimensões da amostra.

Não foi utilizado nenhum tipo de aditivo na mistura e o adensamento foi realizado por meio de mesa vibratória. A consistência do concreto no estado fresco foi medida por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, resultando em 200 mm.

Após 24 horas de moldagem, as amostras foram submetidas à cura em câmara úmida durante 28 dias. Nessa idade, foram realizados ensaios a fim de caracterizar o concreto estudado, sendo eles resistência à compressão e absorção por imersão conforme NBR 5739 (ABNT, 2007) e NBR 9778 (ABNT, 2005), respectivamente. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada ensaio.

Após a cura, realizou-se a lavagem das amostras com detergente a fim de eliminar resíduos de desmoldante da superfície das amostras. Posteriormente efetuou-se sazonalamento por mais 28 dias e carbonatação acelerada em câmara de carbonatação até total carbonatação das amostras. Os procedimentos de sazonalamento e carbonatação acelerada estão descritos no Capítulo 3.

Em uma parte das amostras, a realcalinização foi realizada com pré-tratamento e em outra parte foi realizada sem pré-tratamento. O pré-tratamento consistiu em lavar superficialmente as amostras com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a 3 % em massa a fim de desobstruir os poros da superfície do concreto pela dissolução do carbonato de cálcio e conseqüentemente facilitar a absorção das soluções alcalinas. A lavagem foi realizada lançando o ácido na superfície do concreto. Após a lavagem com o ácido, as amostras permaneceram em água corrente com o propósito de eliminar algum resíduo do  $H_2SO_4$  utilizado no pré-tratamento. Posteriormente, parte das amostras foi realcalinizada com solução de KOH e parte com silicato de sódio alcalino ( $Na_2O.SiO_2$ ).

Prepararam-se 4 diferentes soluções: de KOH com tensoativo, de KOH sem tensoativo, de  $Na_2O.SiO_2$  com tensoativo e de  $Na_2O.SiO_2$  sem tensoativo. O material tensoativo utilizado foi o ácido sulfônico na proporção de 5 gotas para cada litro de solução alcalina. Isso resultou em 8 tipos de testes, conforme FIGURA 17. Foram utilizadas 3 amostras para cada tipo de teste. Realizou-se também a medida do ângulo de contato das soluções de silicato de sódio alcalino com e sem tensoativo em contato com a amostra de concreto do cimento CP V-ARI com auxílio de um microscópio óptico (FIGURA 18). As imagens foram obtidas por meio de uma câmera acoplada ao microscópio que funciona em conjunto com o programa S-eye. O tempo entre o gotejamento e a foto foi padronizado em 2 minutos. Não foi possível fazer esse ensaio para a solução de KOH, visto que a amostra de concreto absorve rapidamente a solução alcalina, não possibilitando realizar a medida do ângulo de contato.

FIGURA 17 – ESQUEMA DAS AMOSTRAS

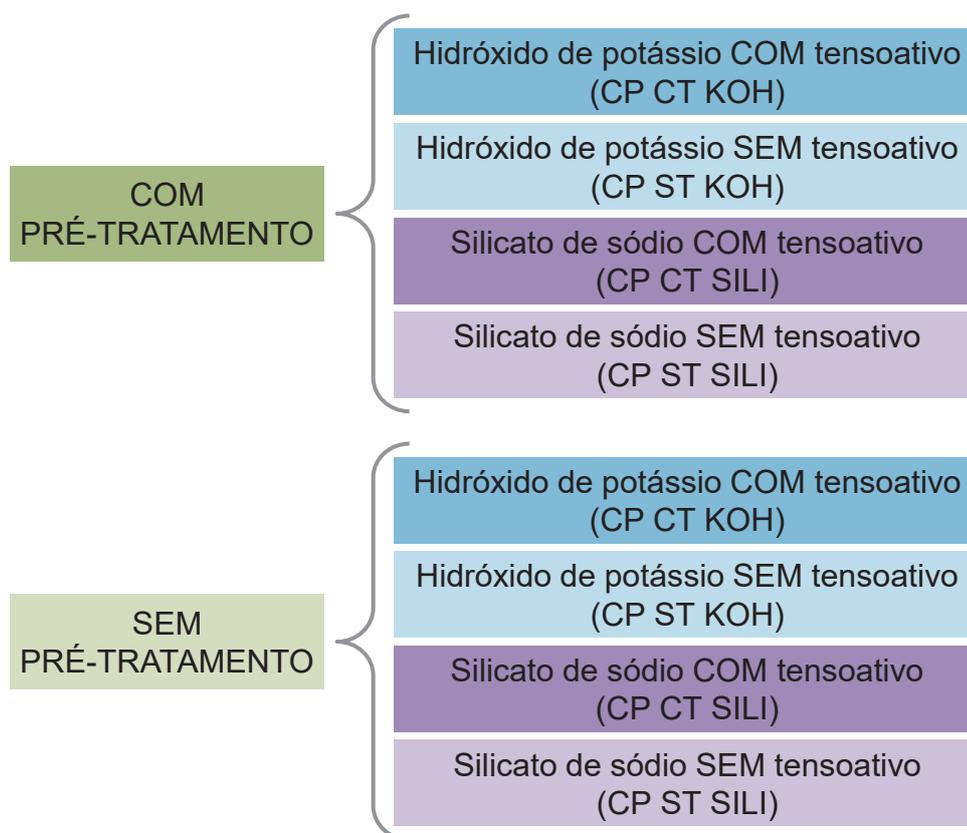


FIGURA 18 – MICROSCÓPIO ÓPTICO UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO DE UMA GOTA DE SOLUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO ALCALINO COM E SEM TENSOATIVO E AMOSTRA DE CONCRETO COM CP V-ARI



### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de caracterização do concreto (resistência à compressão, absorção por imersão, índice de vazios e massa específica seca) são apresentados na TABELA 15.

TABELA 15 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM CP V-ARI AOS 28 DIAS

Ensaio	Resultado	Desvio padrão
Resistência à compressão (MPa)	26,8	2,5
Absorção por imersão (%)	6,92	0,01
Índice de vazios (%)	17,64	0,07
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,17	0,01

Conforme relatado na subseção 2.3.3, verificou-se no trabalho de Réus e Medeiros (2020) que a velocidade de realcalinização apresentou comportamento exponencial. No presente estudo, a realcalinização apresentou o mesmo comportamento, como é possível observar na FIGURA 19. Quando utiliza-se  $\sqrt{dias}$  no eixo das abscissas, a curva exponencial é linearizada, como é possível observar na FIGURA 20. Verifica-se que, nesse caso, foram encontrados elevados valores de  $R^2$ , como é possível observar na FIGURA 20.

A FIGURA 21 apresenta o avanço da profundidade de realcalinização em relação à raiz quadrada do tempo, e a FIGURA 22 mostra os coeficientes de carbonatação ( $k_{CO_2}$ ) e os coeficientes de realcalinização ( $k_{realc}$ ). As amostras atingiram total carbonatação após 119 dias em câmara de carbonatação acelerada (FIGURA 21), apresentando um coeficiente de carbonatação ( $k_{CO_2}$ ) de 2,18 mm/ $\sqrt{dias}$ , conforme observado na FIGURA 22. A medição da profundidade de realcalinização com as amostras tratadas com KOH e com silicato de sódio alcalino foram realizadas em idades diferentes em função da diferente velocidade de avanço da RAQ.

FIGURA 19 – COMPORTAMENTO EXPONENCIAL AO LONGO DO TEMPO DAS AMOSTRAS DO CAPÍTULO 4

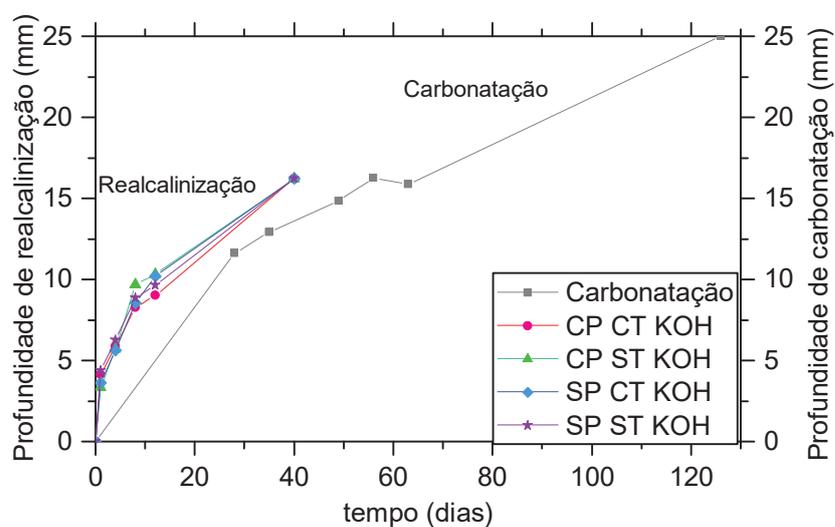


FIGURA 20 – VALORES DE  $R^2$  DAS VELOCIDADE DE REALCALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DO CAPÍTULO 4

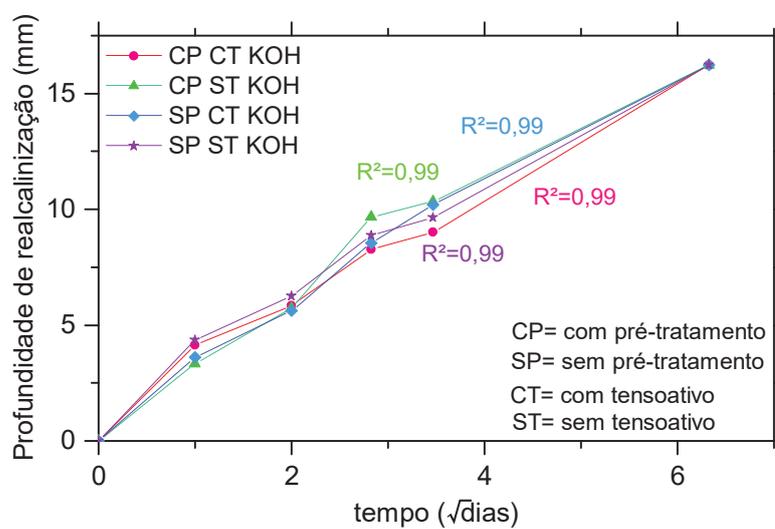


FIGURA 21 – PROFUNDIDADE DE REALCALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS TRATADAS COM DIFERENTES SOLUÇÕES ALCALINAS

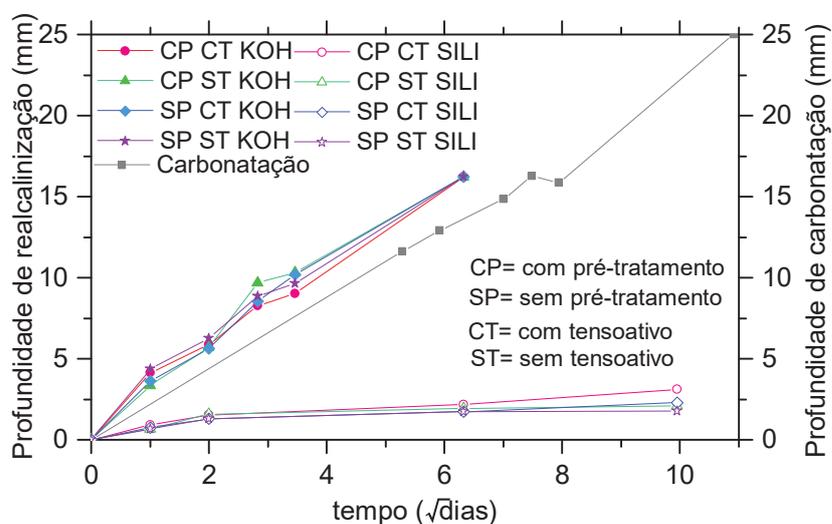
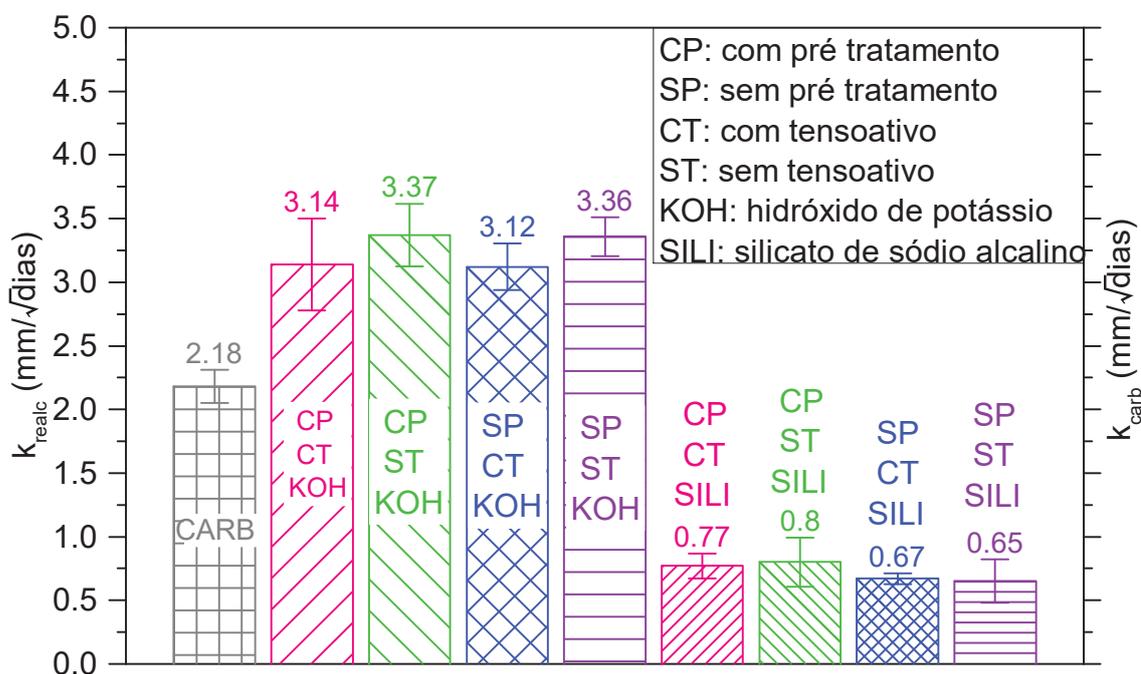


FIGURA 22 – COE REALCALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS TRATADAS COM DIFERENTES SOLUÇÕES ALCALINAS



O resultado do teste Tukey com 95 % de confiança dos coeficientes de realcalinização para amostras com hidróxido de potássio, com silicato de sódio alcalino e com ambos (hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino) são apresentados na Apêndice A, na Apêndice B e na Apêndice C, respectivamente. De acordo com o teste Tukey com 95 % de confiança, não houve diferenças significativas entre as amostras

com e sem pré-tratamento e entre as amostras com e sem tensoativo. Com isso exclui-se a utilização de pré-tratamento e de tensoativo, pois ambos encarecem o processo de realcalinização e não apresentaram melhoria nos resultados. O pré-tratamento pode não ter sido eficiente, pois pode ser que o ácido sulfúrico não tenha desobstruído os poros do concreto como esperado. Outra hipótese é que, como o ácido sulfúrico é fonte de sulfatos, pode ter sido formada gipsita tamponando os poros superficiais do concreto. O ácido sulfúrico na concentração de 3 % não foi eficiente para aumentar a velocidade de realcalinização. Apesar disso ainda é possível testar o ácido clorídrico, conforme discutido na introdução desse capítulo.

Verifica-se na FIGURA 23 e na FIGURA 24 que o uso do tensoativo diminuiu o ângulo de contato entre a solução de silicato de sódio alcalino e a amostra de concreto. Apesar disso, não houve melhoria significativa na velocidade de realcalinização das amostras no tempo de ensaio utilizado no presente estudo. Ao que se refere às soluções de KOH e silicato de sódio alcalino, houve diferenças significativas, sendo que o  $k_{realc}$  mostrou-se, em média 4,5 vezes maior com KOH em relação ao silicato de sódio alcalino. Verificou-se que a solução de silicato de sódio alcalino é capaz de elevar o pH do concreto (FIGURA 25). Entretanto, o avanço desse material no interior do concreto ocorre de forma lenta, impedindo sua aplicação para a realcalinização.

FIGURA 23 – ÂNGULO DE CONTATO ENTRE A SOLUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO ALCALINO SEM TENSOATIVO E A AMOSTRA DE CONCRETO CONTENDO CP V-ARI

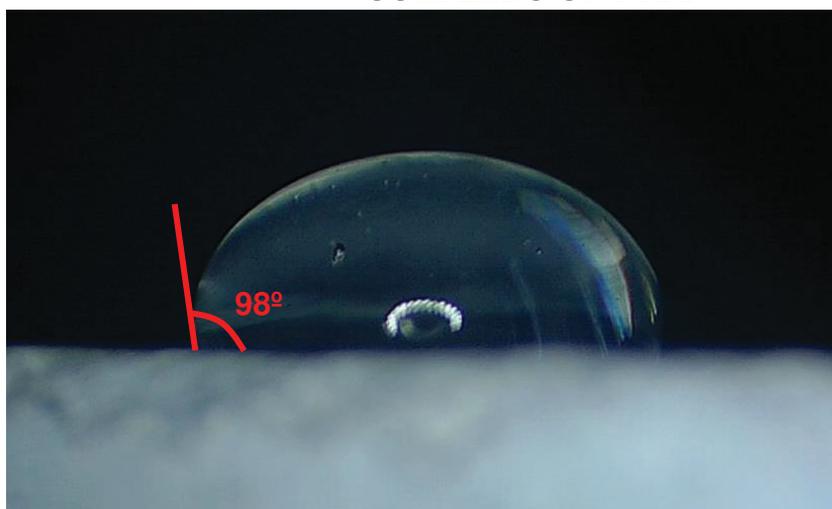


FIGURA 24 – ÂNGULO DE CONTATO ENTRE A SOLUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO ALCALINO COM TENSOATIVO E A AMOSTRA DE CONCRETO CONTENDO CP V-ARI

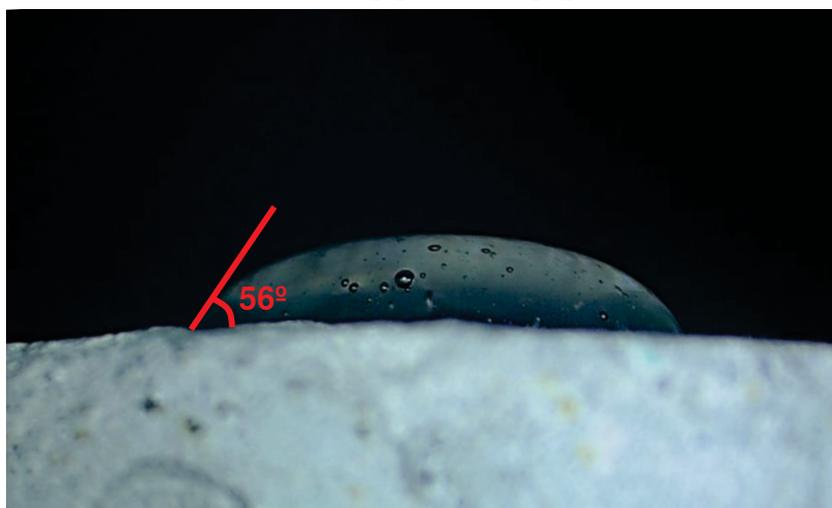
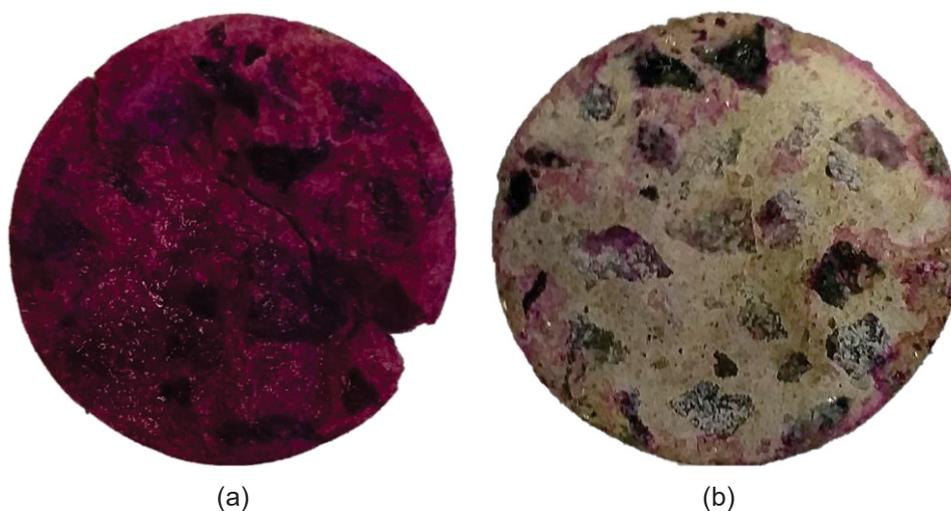


FIGURA 25 – AMOSTRAS SEM PRÉ TRATAMENTO E SEM TENSOATIVO APÓS (A) 40 DIAS DE RAQ COM KOH E (B) 99 DIAS DE RAQ COM SILICATO DE SÓDIO ALCALINO



A solução de silicato de sódio alcalino pode ter avançado de forma lenta tanto pela sua elevada viscosidade quanto pelo efeito de tamponamento dos poros do concreto. Apesar dos dados experimentais deste trabalho terem indicado não ser recomendável a aplicação do silicato de sódio alcalino puro para a realcalinização, esse material pode ser aplicado após a RAQ como uma barreira protetora a fim de tamponar os poros e evitar a nova carbonatação do concreto. Visto que a utilização de silicato de sódio no concreto diminui sua permeabilidade, conforme relatado por Kagi e Ren (1995), Thompson *et al.* (1997), Medeiros, Pereira e Helene (2012), Franzoni, Pigino e Pistolesi (2013) e Baltazar *et al.* (2014).

Outra possibilidade seria tentar diminuir a viscosidade da solução de silicato de sódio alcalino e verificar se com isso o coeficiente de realcalinização irá se elevar a níveis suficientes para que essa solução seja aplicada em campo. Uma maneira de tentar reduzir essa viscosidade é elaborando uma solução mista de silicato de sódio alcalino e hidróxido de sódio. Nesse caso, seria necessário testar diferentes proporções dessa mistura.

A solução de ácido sulfúrico 3 % não foi capaz de dissolver o carbonato de cálcio em quantidade suficiente para elevar a taxa de realcalinização. De acordo com a discussão apresentada na subseção 2.3.2, ainda é possível testar o pré-tratamento com soluções de ácido clorídrico. Destaca-se que esse tratamento deve ser usado com cautela, verificando se isso não ocasionaria o surgimento de outras manifestações patológicas no concreto.

A utilização do tensoativo (ácido sulfônico na proporção de 5 gotas por litro de solução alcalina) não foi capaz de elevar a taxa de realcalinização. O aumento da molhabilidade da solução alcalina não foi suficiente para aumentar a absorção das soluções alcalinas no interior do concreto, não aumentando a taxa de realcalinização.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Com os estudos realizados nesse capítulo, conclui-se que:

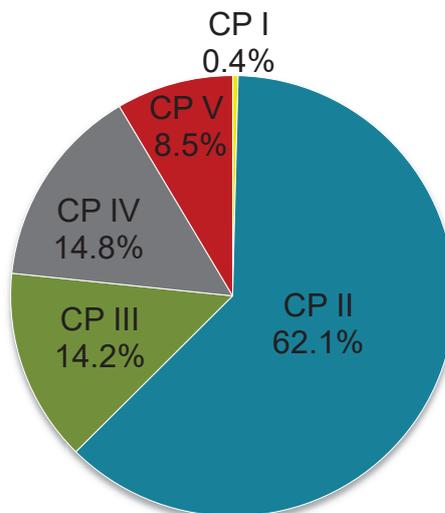
- A velocidade de realcalinização apresentou um comportamento exponencial;
- A solução de hidróxido de potássio apresentou maior velocidade de realcalinização do que a solução de silicato de sódio alcalino;
- A utilização de tensoativo não apresentou melhora significativa no avanço da velocidade de realcalinização;
- A utilização de pré-tratamento com ácido sulfúrico a 3 % não apresentou melhora significativa na penetração de solução para realcalinizar o concreto;
- Dentre as soluções estudadas, a solução de hidróxido de potássio sem tensoativo e sem pré-tratamento mostrou-se mais adequada para a RAQ, visto que o pré-tratamento e o tensoativo não elevaram de forma significativa o  $k_{\text{realc}}$ ;
- A solução concentrada de silicato de sódio não é viável para a RAQ.

## 5 O PROCESSO DA REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA EM AMOSTRAS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO PORTLAND

### 5.1 INTRODUÇÃO

A FIGURA 26 ilustra os dados de produção anual de cimento Portland, obtidos no relatório anual do Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC) DE 2013. Os cimentos mais produzidos no Brasil em 2013 foram CP II, CP III e CP IV (FIGURA 26). Esses cimentos possuem adições minerais em sua composição, as quais podem ser inertes e/ou cimentantes, conforme TABELA 6 apresentada no (Capítulo 2). Em 2020 foram produzidos 286 kg de cimento por habitante no Brasil (CIMENTO, 2020). O uso de materiais pozolânicos na composição do cimento visa diminuir a extração de matéria prima para a produção do cimento Portland e dar destino aos subprodutos que seriam tratados como rejeitos (ISAIA; GASTALDINI, 2004).

FIGURA 26 – DISTRIBUIÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE CIMENTO PRODUZIDOS NO BRASIL ANO DE 2013



FONTE: Adaptados do SNIC (2013).

Conforme discutido no Capítulo 2, as pozolanas presentes no cimento possuem um efeito combinado frente a carbonatação, tendem a diminuir a porosidade da matriz cimentícia e diminuir a reserva alcalina. Com isso, é de se esperar que diferentes adições pozolânicas possam resultar em diferentes velocidades de realcalinização (RÉUS, 2017). Com isso o emprego de diferentes tipos de cimentos pode influenciar o comportamento da realcalinização.

Objetiva-se nesse capítulo, analisar a influência de quatro tipos de cimento (CP V-ARI, CP II-F-32, CP II-Z-32 e CP IV-32) na velocidade de avanço da realcalinização.

Objetiva-se também verificar, por meio de difração de raios-X, análise de termogravimétrica e pH de pastas de cimento, se há produtos formados no interior do concreto após a RAQ, e quais são esses produtos.

## 5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental foi conduzido de modo a desenvolver experimentos em concreto e em pasta de cimento, de acordo com o tipo de amostra necessária para cada ensaio. Foram utilizadas amostras de concreto para os ensaios de resistência à compressão, medição da profundidade de carbonatação e medição da profundidade de realcalinização. As amostras em pasta foram utilizadas para os ensaios de DRX, análise termogravimétrica, porosidade aparente e medição de pH.

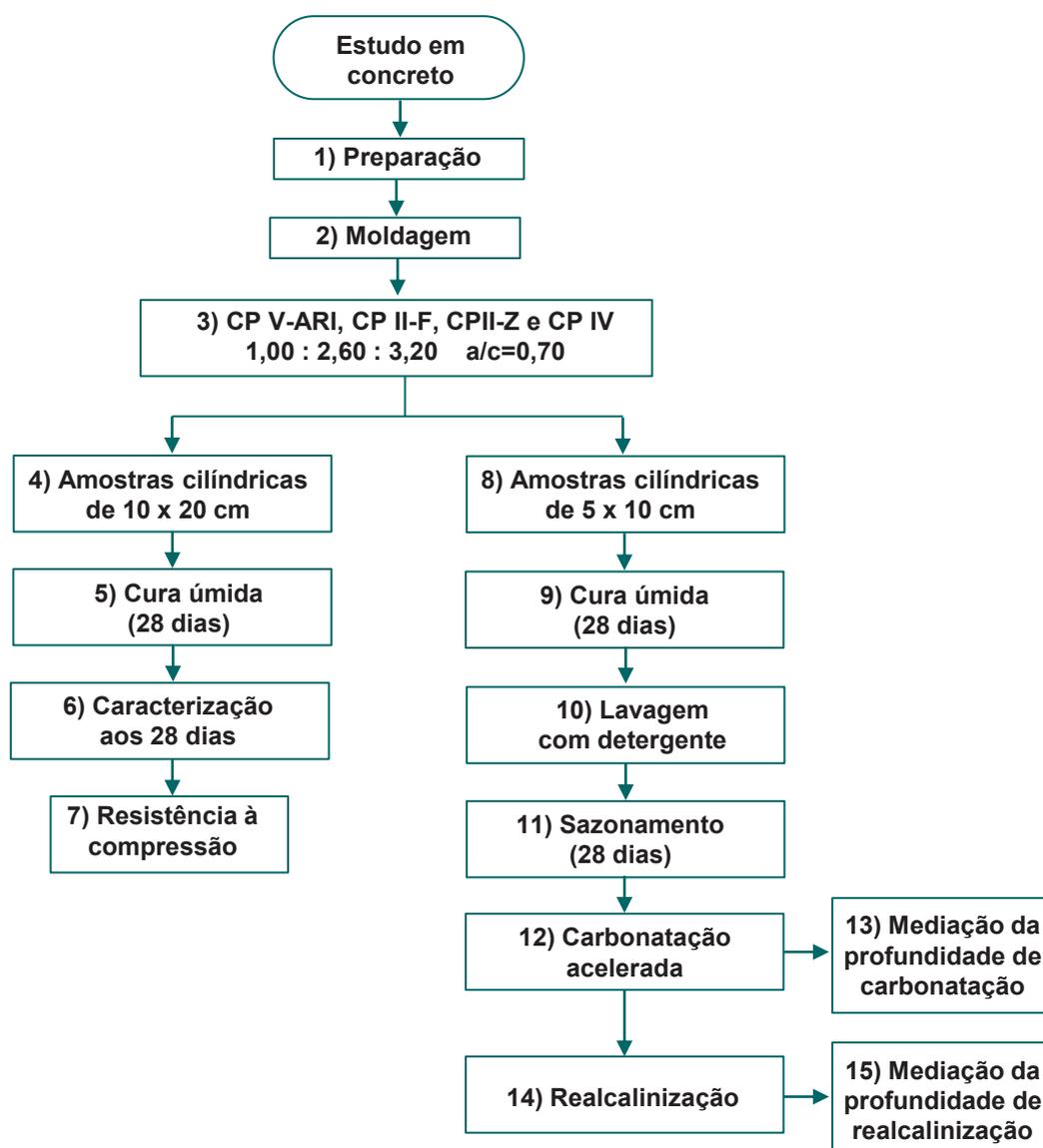
### 5.2.1 Estudo em amostras de concreto

A FIGURA 27 apresenta o fluxograma de preparo das amostras de concreto e realização dos ensaios, assim como apresentado textualmente a seguir:

1) Primeiramente, foi realizada a preparação dos concretos, seguido da 2) moldagem das amostras. 3) utilizaram-se os cimentos do tipo CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z e CP IV, com traço 1,00 : 2,60 : 3,20, relação água/cimento de 0,70 e consumo de cimento de 315 kg/m<sup>3</sup>. 4) Foram produzidos corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. A preparação foi realizada em betoneira com capacidade de 120 L e o adensamento foi realizado em mesa vibratória por 5 segundos. 5) Foi realizada cura úmida por 28 dias. 6) Aos 28 dias, realizou-se o ensaio de 7) resistência à compressão (conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007)). Para cada ensaio, foram utilizados 3 corpos de prova de cada tipo de concreto.

8) Foram produzidas amostras cilíndricas de 5 x 10 cm de concreto para verificar o avanço da frente de carbonatação e da frente de realcalinização. 9) As amostras permaneceram 28 dias em cura úmida e 10) posteriormente realizou-se a lavagem das amostras com detergente a fim de eliminar resíduos de desmoldante da superfície das amostras. 11) Em seguida, efetuou-se o sazonalamento em câmara seca (temperatura igual a 22±2 °C e umidade relativa correspondente a 50±10 %) por mais 28 dias. 12) A carbonatação acelerada foi realizada em câmara de carbonatação com 5 % de CO<sub>2</sub>, (65±5) % de umidade relativa e (23±1) °C. 13) Para medir a profundidade de carbonatação, selecionaram-se 3 amostras e aspergiu-se na superfície recém fraturada a solução de fenolftaleína. As amostras foram submetidas à realcalinização com a mesma idade.

FIGURA 27 – ESQUEMA DE PREPARO DE AMOSTRAS E ENSAIOS EM CONCRETO



14) Posteriormente, as amostras foram realcalinizadas com solução de KOH na concentração de 2,67 mol/L (149,80 g/l), conforme utilizado por Réus e Medeiros (2020), Réus (2017), Araújo, Melo Neto e Helene (2017), Araújo *et al.* (2007), Sá (2006) e Araujo (2004). O método de aplicação utilizado foi de total imersão das amostras. Cada amostra testada foi fraturada com marreta e talhadeira e uma parte da amostra foi retirada da imersão para medição da profundidade de carbonatação, enquanto a outra parte retornou para o tratamento, para posteriormente ser fraturada e utilizada na próxima leitura.

15) A medição da realcalinização foi feita de forma semelhante à medição da carbonatação, fraturando transversalmente as amostras e aspergindo-se solução de

fenolftaleína. Neste caso, após a fratura da amostra e antes da aspersão da solução de fenolftaleína, a superfície fraturada foi seca por meio de um jato de ar quente por 5 minutos.

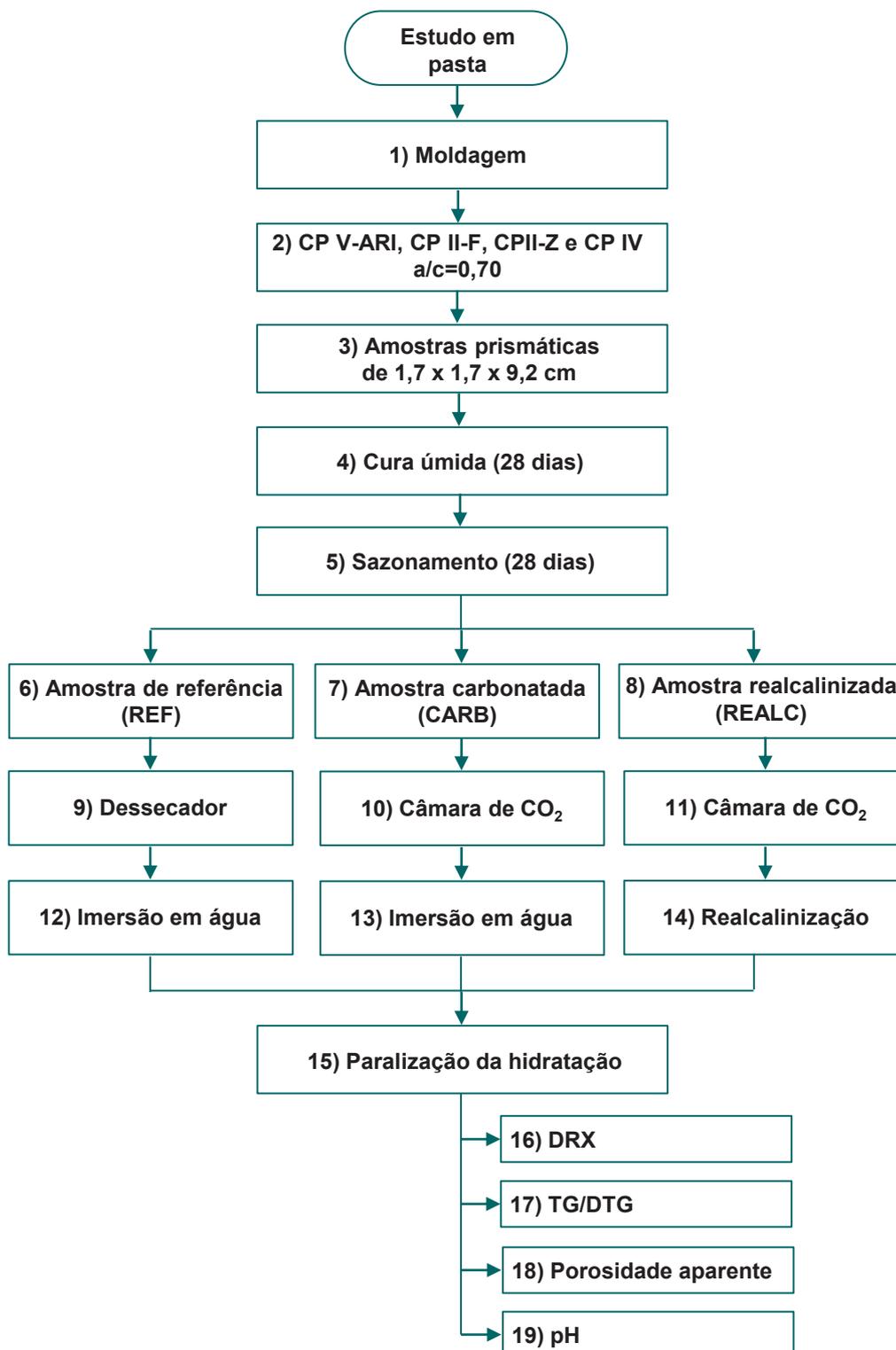
### 5.2.2 Estudo em amostras de pasta de cimento

Além das amostras de concreto, foram produzidas amostras de pasta de cimento. A FIGURA 28 apresenta o fluxograma de preparo das amostras de pasta de cimento e realização dos ensaios, seguindo a sequência a seguir:

1) Foram moldadas amostras de pasta de cimento. 2) Para tanto utilizaram-se os cimentos do tipo CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z e CP IV e relação água/cimento 0,70. 3) As amostras moldadas foram prismáticas de 1,7 x 1,7 x 9,2 cm. Optou-se por utilizar formas de silicone (comumente utilizadas para fazer gelo) de pequena seção e maior comprimento, para facilitar o processo de moldagem e moagem das amostras. As pastas de cimento foram misturadas por meio de uma argamassadeira de bancada. A mistura foi realizada adicionando-se 50 % do cimento com 80 % da água à argamassadeira de bancada e misturando os materiais em velocidade baixa por 3 minutos. Posteriormente, adicionaram-se 50 % do cimento e 20 % da água e misturaram-se os materiais por mais 2 minutos. 4) Após a moldagem, as amostras foram submetidas à cura úmida por 28 dias e 5) sazonalização em câmara seca (temperatura igual a  $(22\pm 2)$  °C e umidade relativa correspondente a  $(50\pm 10)$  % por mais 28 dias).

A fim de verificar se mudanças na pasta poderiam ter sido ocasionadas pela carbonatação ou realcalinização, as amostras foram divididas em três tipos: 6) referência (REF), 7) carbonatadas (CARB) e 8) realcalinizadas (REALC). 9) As amostras tipo REF foram mantidas em ambiente com  $(23\pm 1)$  °C e em dessecador com nitrato de sódio, a fim de controlar a umidade (em torno de 65%). Foi adicionado hidróxido de bário ao dessecador a fim de evitar a carbonatação das amostras de referência. 10) As amostras do tipo CARB foram submetidas à carbonatação acelerada em câmara com  $(23\pm 1)$  °C,  $(65\pm 5)$  % de umidade relativa e 5 % de CO<sub>2</sub> até a total carbonatação das amostras. 11) As amostras do tipo REALC também foram submetidas à carbonatação acelerada nas mesmas condições das amostras CARB. 12) Depois da carbonatação das amostras CARB e REALC, as amostras REF foram totalmente imersas em água, com o objetivo de manter as condições de umidade das amostras REALC. 13) As amostras CARB também permaneceram totalmente imersas em água e 14) as amostras REALC foram imersas em solução de KOH na concentração de 2,67 mol/L.

FIGURA 28 – ESQUEMA DE PREPARO DE AMOSTRAS E ENSAIOS EM PASTA DE CIMENTO



15) Subsequentemente, com o propósito de manter as condições no momento da realização dos ensaios, houve a paralisação da hidratação das pastas de cimento. A paralisação da hidratação foi realizada por meio da imersão das pastas de cimento

em álcool etílico por 24 horas e posterior secagem em estufa a 40 °C por mais 24 horas, conforme descrito por Hoppe Filho *et al.* (2021). As amostras foram mantidas em dessecador até a realização dos ensaios de difração de raios-X (DRX), análise termogravimétrica, porosidade aparente e ensaio de pH de solução contendo suspensão de pasta de cimento. Esses ensaios foram realizados a fim de identificar possíveis compostos no interior das pastas de cimento, e comparar os compostos presentes nas pastas de referência, carbonatadas e realcalinizadas, para tentar identificar os possíveis mecanismos e reações químicas que governam a RAQ.

16) Para realização dos ensaios de DRX, efetuou-se a moagem das amostras com auxílio de um almofariz e pistilo até o diâmetro máximo de 0,075 mm. A amostra moída foi prensada superiormente no porta amostra com 24 mm de diâmetro de 1 mm de profundidade. O ensaio foi realizado de 5° 2 $\theta$  até 75° 2 $\theta$  em varredura angular 2 $\theta$ , com passo de 0,02° 2 $\theta$  e tempo de passo igual a 1 s. O equipamento utilizado foi o SHIMADZU modelo XRD-7000 que operou a 40 kV e 20 mA. Esse equipamento possui tubo de cobre com comprimento de onda de 0,154 nm e detector cintilador. A amostra fica parada no centro do goniômetro e a fenda divergente é de 0,2 °.

17) Para o ensaio de análise termogravimétrica, as amostras também foram moídas com auxílio de um almofariz e pistilo até o diâmetro máximo de 0,075 mm. O ensaio de termogravimetria (TG/DTG) foi realizado em um analisador termogravimétrico Shimadzu DTG-60 na faixa de temperatura 30 °C e 1000 °C, taxa de aquecimento 10 °C/min, atmosfera de nitrogênio (50 mL/min), massa de amostra de 20 mg em um cadinho de platina sem tampa. Segundo Maciel *et al.* (2018), entre a temperatura ambiente e 380°C há a perda de massa relativa à decomposição dos compostos hidratados da pasta de cimento, C-S-H, fases AFt (etringita) e AFm (monossulfoaluminato). Entre 380 °C e 500 °C há a desidratação da portlandita e entre 500 °C e 800 °C há a descarbonatação do carbonato de cálcio.

18) A preparação das amostras de pasta para o ensaio de porosidade aparente consiste em fragmentar o material manualmente até se obter partículas iguais ou menores que 1 cm<sup>3</sup> de tamanho. A amostra a ser analisada consiste em um conjunto dessas partículas somando aproximadamente 3 g. São tomadas medidas de massa dessas amostras, no estado saturado com superfície seca, na condição seca em estufa a 105 °C e na condição submersa. A porosidade aparente é calculada pela Equação (5.1), onde  $PA$  é a porosidade aparente  $m_{SSS}$  é a massa da amostra na condição saturada com superfície seca,  $m_{seca}$  é a massa da amostra seca em estufa a 105 ± 5 °C por 24 horas e  $m_{sub}$  é a massa submersa da amostra. Para determinar  $m_{SSS}$ , as amostras foram mantidas imersas em água por 24 horas e tiveram sua superfície seca por um pano. Esse procedimento de ensaio, bem como a Equação (5.1), são descritos por (HOPPE FILHO *et al.*, 2021).

$$PA(\%) = (m_{sss} - m_{seca}) / (m_{sss} - m_{sub}) \times 100 \quad (5.1)$$

19) No que se refere à medição do pH do concreto, segundo Behnood, Tittelboom e Belie (2016) podem ser realizados diferentes ensaios, todavia não há padronização nem normalização. Dentre os métodos descritos, há o método de medição de pH de uma suspensão contendo água destilada e pó extraído do concreto. Esse método consiste em triturar as amostras de concreto, misturá-las com água destilada e medir o pH da suspensão obtida com auxílio de um pHmetro. Essa metodologia é baseada na medição do pH dos solos conforme astm d4972 (ASTM, 2013) e na medição de cloretos por meio de extração de pós do concreto (BEHNOOD; TITTELBOOM; BELIE, 2016).

Em relação à realização desse experimento, Rasanen e Penttala (2004) concluíram em seu estudo que: 1) a dimensão das partículas deve ser constante e o mais fina possível; 2) a quantidade de pó deve ser constante entre 40% e 60% do peso total da suspensão; 3) os métodos de extração das amostras de pó e de agitação da suspensão devem ser constantes e 4) a temperatura não deve variar mais de que 10 °C entre as medições. Rasanen e Penttala (2004) relatam também que os métodos de medição de pH da solução dos poros e de medição de pH da suspensão de pó apresentam pouca diferença nos resultados.

Pu *et al.* (2012) utilizaram a proporção água/sólidos de 100 g/1 g. Segundo os autores, essa elevada proporção deve-se à dificuldade em se obter pó do concreto para fazer a suspensão. Após a mistura manual, houve um tempo de 96 h de repouso, antes da medição do pH. Os autores concluíram que ao comparar os métodos de medição do pH da suspensão e o pH da solução de poros, houve uma boa correlação entre os resultados, portanto o pH da solução de poros pode ser inferido pelo pH da suspensão, que é mais conveniente em termos de execução. Como relatado, tanto o trabalho de Rasanen e Penttala (2004) quanto o trabalho de Pu *et al.* (2012) apresentaram resultados satisfatórios comparando a medição do pH da água dos poros com a suspensão de pó extraído do concreto.

Considerando que na pasta de cimento hidratada a portlandita corresponde entre 20% e 25% dos sólidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008), e a proporção de mistura indicada por Rasanen e Penttala (2004) é de 40% a 60% do peso da suspensão seja pó, conclui-se que para esta mistura, a concentração de portlandita varia entre 80 e 150 g/l. Já para Pu *et al.* (2012) a proporção de água/sólidos é de 100 g/1 g, portanto a concentração de portlandita varia entre 2 e 2,5 g/l. Tanto a proporção de mistura de Rasanen e Penttala (2004) quanto a proporção de mistura de Pu *et al.* (2012) produzem suspensões saturadas de hidróxido de cálcio, visto que o coeficiente de solubilidade da portlandita que é 1,85 g/l.

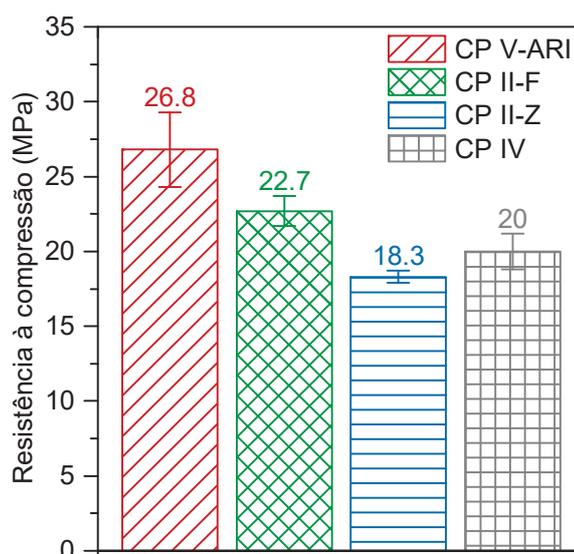
No presente trabalho, utilizaram-se 2 g de pó para 200 mL de água destilada, mantendo a proporção de água/sólidos de 10 g/L conforme proposto por Pu *et al.* (2012). Realizou-se a mistura manual dos materiais por 1 minuto e a leitura foi realizada após 96 h do fim da agitação (PU *et al.*, 2012). A preparação das amostras de pasta para esses experimentos foi realizada retirando lascas das amostras. As lascas foram retiradas de diferentes regiões das amostras para minimizar influência de fatores externos ao ensaio. Posteriormente, as lascas foram moídas com auxílio de pistilo e almofariz e peneiradas na peneira com malha de abertura de 0,075 mm, sendo o material passante nessa peneira utilizado para os ensaios.

### 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.3.1 Estudo em amostras de concreto

A FIGURA 29 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados aos 28 dias. Observa-se o maior valor de resistência à compressão para o cimento CP V-ARI. As amostras de CP II-F e CP IV mostraram-se estatisticamente semelhantes de acordo com o teste Tukey com 95% de confiança, bem como as amostras contendo CP IV e CP II-Z também apresentaram semelhança estatística (Apêndice D).

FIGURA 29 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO COM 28 DIAS DE CURA ÚMIDA E TRAÇO 1 : 2,60 : 3,20 E RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO DE 0,70



Conforme discutido na subseção 2.3.3, verificou-se que no trabalho de Réus e Medeiros (2020) e nos resultados do Capítulo 4 da presente tese que a RAQ apre-

sentou velocidade de realcalinização exponencial (FIGURA 9 e FIGURA 20, respectivamente). E por isso, os resultados foram apresentados com a profundidade de carbonatação/realcalinização no eixo das abscissas e a  $\sqrt{tempo}$  no eixo das abscissas. Com isso há a linearização do gráfico exponencial. Verifica-se esse mesmo comportamento para os resultados obtidos no presente capítulo.

A FIGURA 30 apresenta os resultados de profundidade de carbonatação e realcalinização ao longo do tempo. Em função desses resultados, extraíram-se os coeficientes de carbonatação ( $k_{CO_2}$ ) e de realcalinização ( $k_{realc}$ ), apresentados na FIGURA 31 e na FIGURA 32. De acordo com o teste Tukey com 95% de confiança, o coeficiente de carbonatação ( $k_{CO_2}$ ) da amostra de cimento CP V-ARI foi considerado diferente dos demais cimentos. Enquanto o  $k_{CO_2}$  das amostras com cimentos CP II-F, CP II-Z e CP IV foram consideradas estatisticamente semelhantes (Apêndice E).

FIGURA 30 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E PROFUNDIDADE DE REALCALINIZAÇÃO AO LONGO DA RAIZ QUADRADA DO TEMPO (EM AMOSTRAS DE CONCRETO APÓS 28 DIAS DE CURA ÚMIDA)

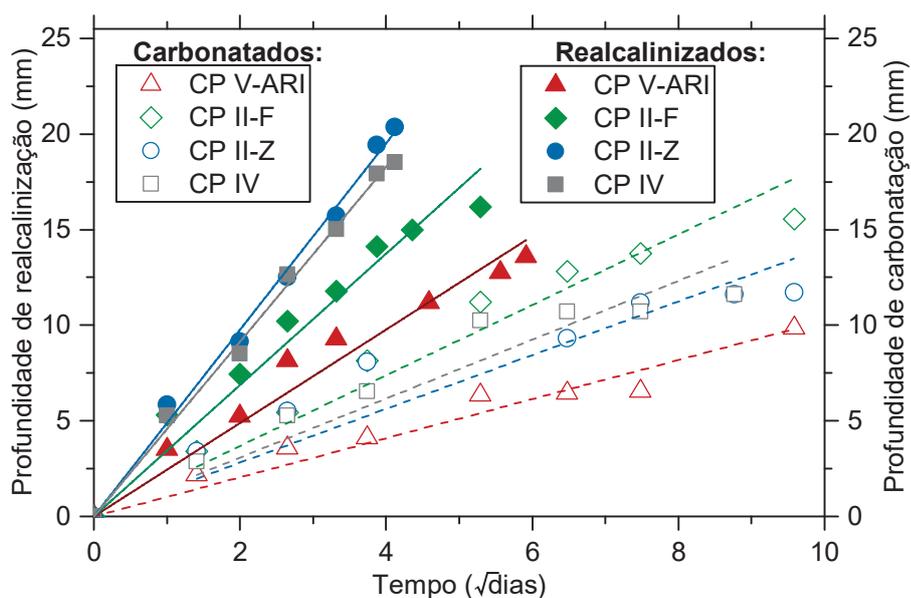


FIGURA 31 – COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO EM AMOSTRAS DE CONCRETO COM OS CIMENTOS CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z E CP IV

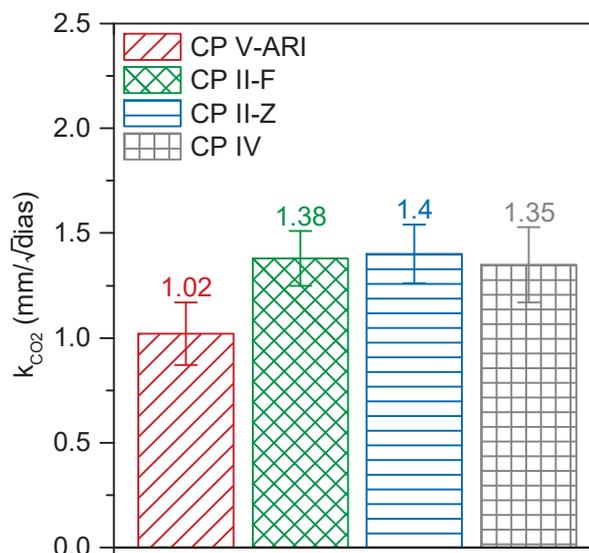
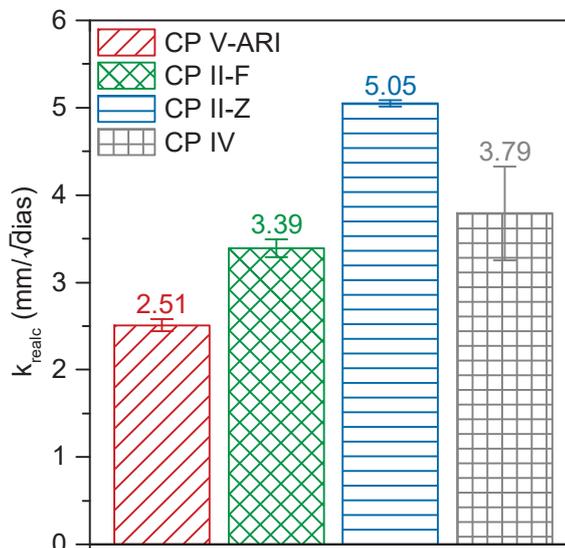


FIGURA 32 – COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO EM AMOSTRAS DE CONCRETO COM OS CIMENTOS CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z E CP IV

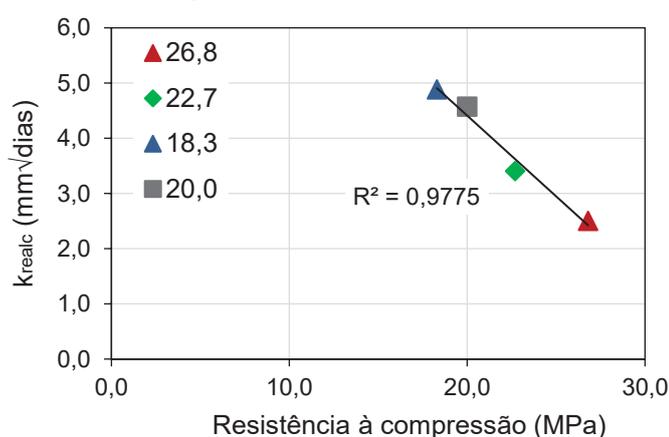


Observa-se na FIGURA 31, que o concreto moldado com o cimento CP V-ARI (sem pozolanas) apresentou menor  $k_{CO_2}$ . Em contrapartida, os concretos moldados com cimentos com pozolana (CP II-Z e CP IV) apresentaram maior  $k_{CO_2}$ . Esta mesma tendência de resultados foi encontrada nos trabalhos de Papadakis (2000), Medeiros *et al.* (2017a), Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho (2017b), Nisar e Bhat (2021). Isso se deve à quantidade de  $Ca(OH)_2$  presente no cimento hidratado e também ao consumo

de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que ocorre em função da atividade pozolânica. Com isso, os concretos com cimentos pozolânicos tendem a ter sua reserva alcalina diminuída em relação aos concretos com cimentos sem pozolana. Deve-se destacar o caso do concreto com o cimento CP II-F, que também apresentou o valor de  $k_{\text{CO}_2}$  acima do apresentado pelo cimento CP V-ARI. Neste caso, a substituição parcial do clínquer pelo fíler calcário também causa a redução da reserva alcalina do concreto, acelerando o processo de carbonatação.

Analisando a FIGURA 32, verifica-se que o tipo de cimento também influenciou a velocidade de realcalinização química do concreto, de modo que os concretos com os cimentos com adições minerais em substituição parcial do clínquer realcalinizaram com maior velocidade do que o cimento CP V-ARI. O Apêndice F apresenta o teste Tukey com 95% de confiança dos coeficientes de realcalinização. O tipo de cimento costuma ter uma ação combinada no avanço da carbonatação, pois isso interfere tanto na resistência à compressão quanto na reserva alcalina do concreto, sendo que há uma ação combinada desses dois fatores influenciando o avanço da carbonatação no concreto. Para a realcalinização pode-se verificar que o tipo de cimento também teve influência em relação a resistência à compressão, visto que há uma correlação direta entre a resistência à compressão das amostras de concreto e o  $k_{\text{realc}}$  (FIGURA 33). Isso pode ter ocorrido em função da elevada relação a/c, que tende a gerar mais poros interconectados (em relação a concreto com menor a/c). É possível que os poros não tenham sido totalmente preenchidos pelos produtos da reação pozolânica, e isso pode ter aumentado a absorção da solução nos concretos com pozolana.

FIGURA 33 – CORRELAÇÕES ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E O  $K_{\text{REALC}}$  PARA AS AMOSTRAS DE CONCRETO

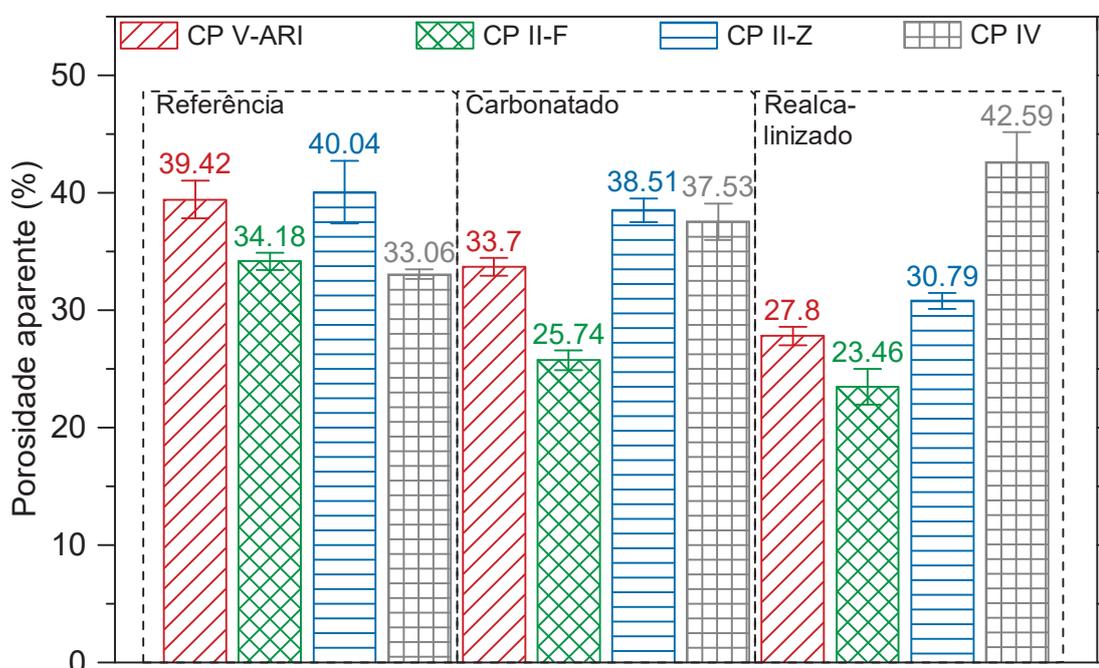


### 5.3.2 Estudo em amostras de pasta de cimento

Os resultados do ensaio de porosidade aparente para as amostras de pasta de cimento são apresentados na FIGURA 34. Observa-se que as amostras com os

cimentos CP V-ARI, CP II-F e CP II-Z apresentaram uma diminuição da porosidade da amostra carbonatada em comparação com a amostra de referência (não carbonatada). E também uma diminuição de porosidade da amostra realcalinizada em relação a amostra carbonatada. Já a amostra contendo CP IV apresentou o comportamento oposto. O comportamento da amostra contendo CP IV pode ocorrer em função da grande quantidade de pozolana desse cimento ( $\approx 24\%$ ). A porosidade aparente foi considerada estatisticamente semelhante de acordo com o teste Tukey com 95% de confiança para as amostras de referência com cimentos CP V-ARI e CP II-Z e para as amostras de referência com cimentos CP II-F e CP IV. As amostras carbonatadas com cimento CP II-Z e CP IV apresentaram semelhança estatística, bem como as amostras realcalinizadas com cimentos CP V-ARI e CP II-Z (Apêndice G).

FIGURA 34 – POROSIDADE APARENTE DAS AMOSTRAS DE PASTA DE CIMENTO

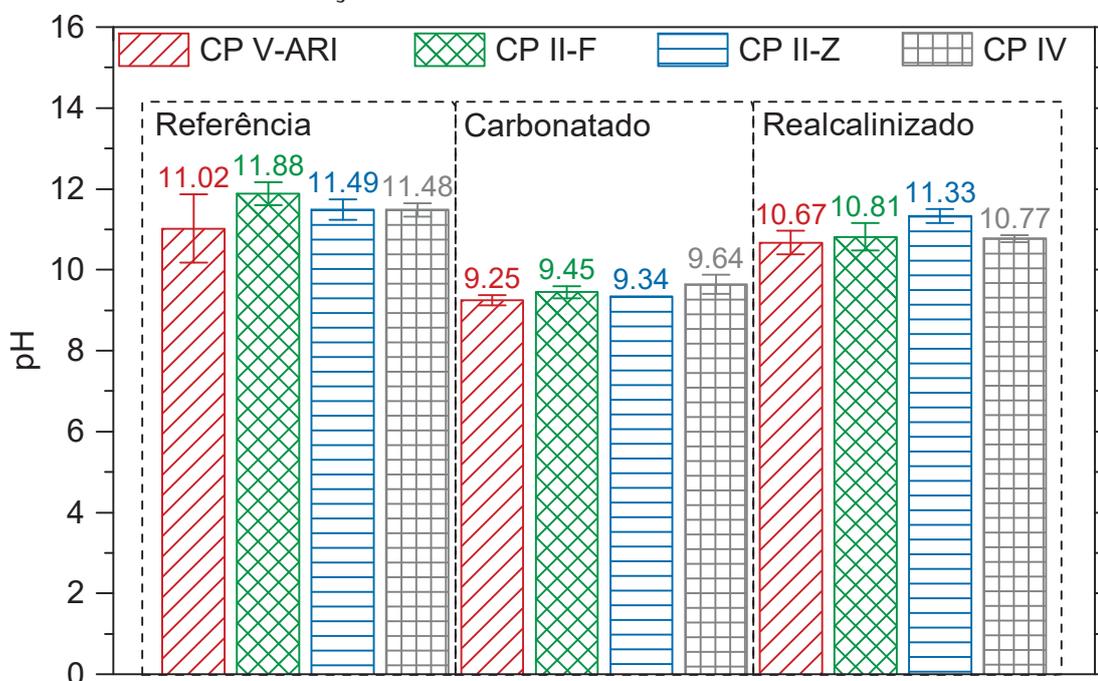


Como detalhado no programa experimental, foi realizada a medição de pH das amostras de referência, carbonatadas e realcalinizadas. Estes dados estão apresentados na FIGURA 35. E os teste Tukey com 95 % de confiança são apresentados no Apêndice H, no Apêndice I, no Apêndice J e no Apêndice K. Observa-se na FIGURA 35 que independentemente do tipo de cimento utilizado nas amostras houve uma redução de pH das amostras carbonatadas em relação as amostras de referência. E houve um aumento no pH das amostras realcalinizadas em relação as amostras carbonatadas. Destaca-se que o pH das amostras realcalinizadas mostrou-se próximo as amostras de referência (não carbonatadas). Dentre os 3 grupos apresentados na FIGURA 35 (referência, carbonatado e realcalinizado) não houve diferença estatística entre os tipos de cimento, segundo teste Tukey com 95 % de confiança. Com isso a média dos

valores de pH para as amostras de referência, carbonatadas e realcalinizadas é de 11,5, 9,4 e 10,9, respectivamente. Conforme o teste Tukey com 95 % de confiança o pH das amostras de referência apresentam diferenças estatísticas em relação as amostras carbonatadas e em relação as amostras realcalinizadas. Além disso, o pH das amostras carbonatadas é menor estatisticamente do que das amostras de referência e realcalinizadas.

Destaca-se que as amostras com cimentos pozolânicos apresentam maior  $k_{CO_2}$  do que as amostras com cimento CP V-ARI (FIGURA 29), ou seja, a carbonatação avança de forma mais rápida nessas amostras. Apesar disso, o pH da região carbonatada é semelhante para amostras com cimentos pozolânicos e cimentos sem pozolana.

FIGURA 35 – MEDIÇÃO INDIRETA DO PH DAS PASTAS DE CIMENTO



A FIGURA 36 apresenta os difratogramas obtidos com pastas de cimento. Observa-se que as amostras de referência possuem um grande pico de portlandita, as amostras carbonatadas não possuem pico de portlandita e as amostras realcalinizadas possuem um pequeno pico de portlandita na posição  $18^\circ 2\theta$ . Os resultados termogravimétricos encontrados na FIGURA 37 e na FIGURA 38 também apresentaram a formação de portlandita nas amostras REALC, corroborando com o resultado do ensaio de DRX. Os teores de portlandita para as amostras REALC (encontradas no ensaio de análise termogravimétrica) são 1,9 %, 1,2 %, 1,2 % e 1,3 % nas amostras realcalinizadas compostas por cimento CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente. O teor de portlandita foi obtido multiplicando a porcentagem de perda de massa (obtido

no ensaio de termogravimetria), multiplicado pela massa molar da portlandita e dividido pela massa molar da água.

FIGURA 36 – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS DE PASTA DE CIMENTO

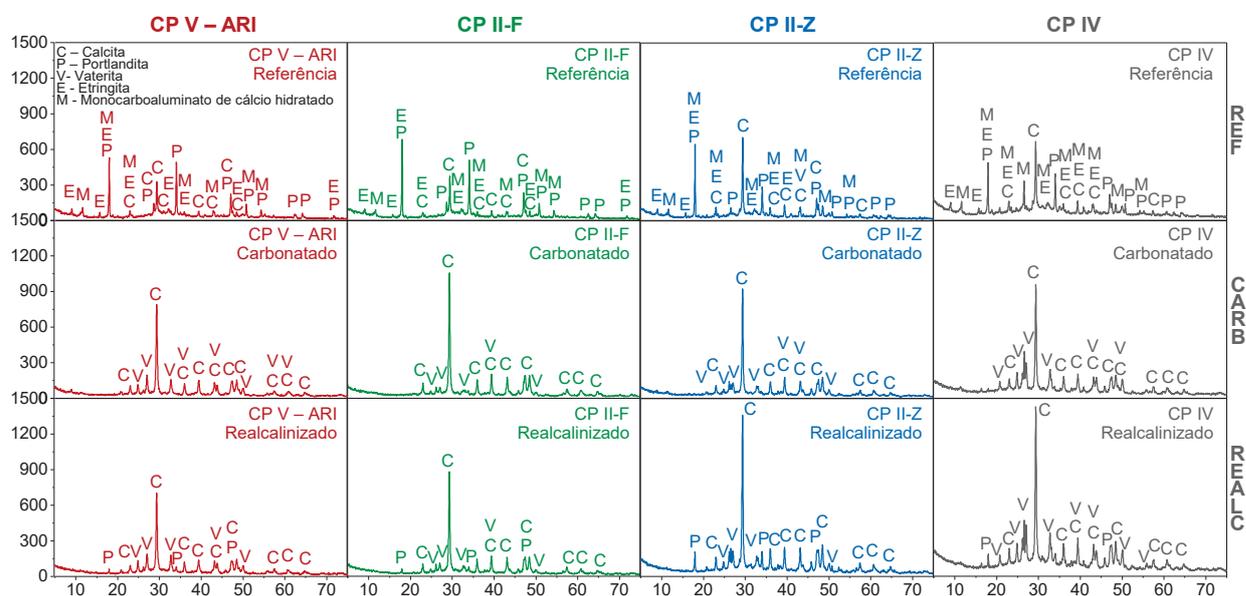


FIGURA 37 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS DE PASTA DE CIMENTO

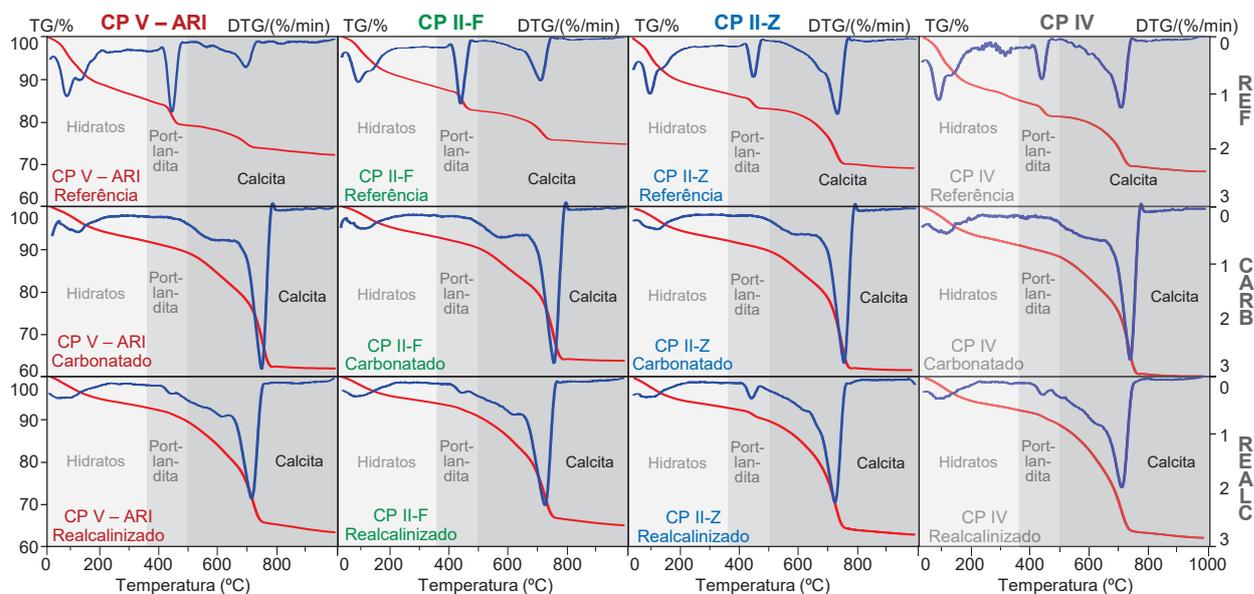
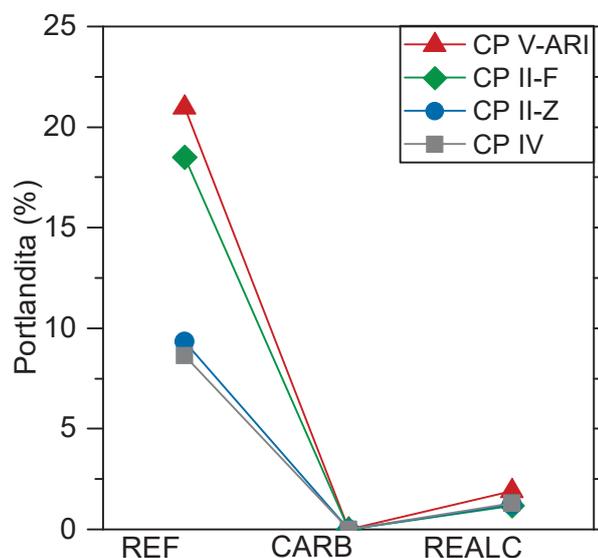


FIGURA 38 – TEOR DE PORTLANDITA NO ENSAIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA



Destaca-se que, tanto as amostras carbonatadas como realcalinizadas, passaram pelos processos de moldagem, cura, sazonalização e carbonatação acelerada. O que diferencia essas amostras é que enquanto as pastas carbonatadas estavam imersas em água, as pastas realcalinizadas estavam imersas em solução de KOH. Com isso, pode-se descartar a simples hidratação do cimento como fator de influência para a formação do pico de portlandita nas amostras REALC.

Observa-se na FIGURA 36 e na FIGURA 39 que há carbonatação dos hidratos (etringita e monocarboaluminato de cálcio hidratado). Com isso, parte do cálcio que constitui a calcita provém da carbonatação destes hidratados. Observa-se na FIGURA 37 e na FIGURA 40 que o teor de carbonatos aumentou das amostras de referência para as amostras carbonatadas. E houve uma pequena diminuição no teor de carbonatos das amostras carbonatadas para as amostras realcalinizadas, sendo que essa diminuição foi de 0,7 %, 0,6 %, 2,9 % e 1,3 % para as amostras com cimento CP V-ARI, CP II-F, CP II-Z e CP IV, respectivamente. O teor de carbonatos foi obtido multiplicando a porcentagem de perda de massa (obtido no ensaio de termogravimetria), multiplicado pela massa molar da co calcita e dividido pela massa molar da do dióxido de carbono.

FIGURA 39 – TEOR DE ÁGUA QUIMICAMENTE COMBINADA COMO HIDRATOS NO ENSAIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

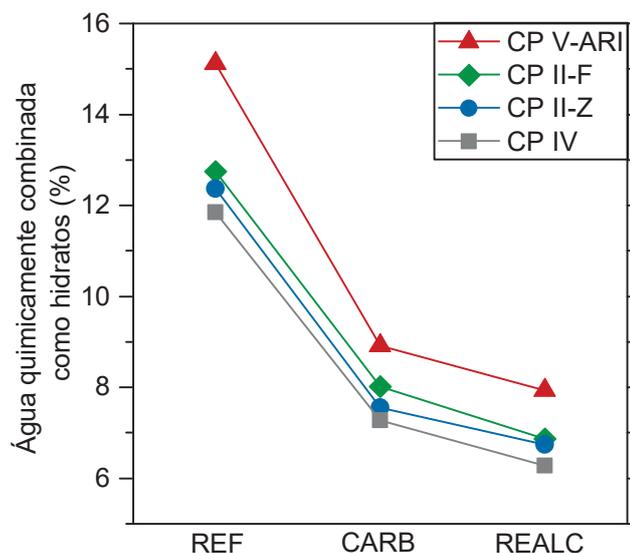
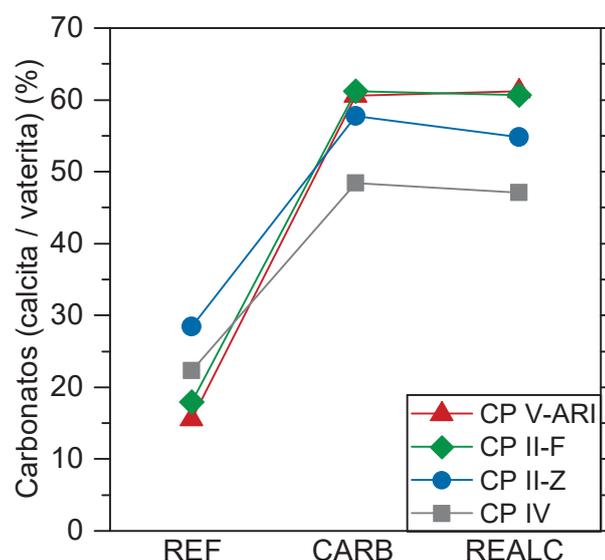
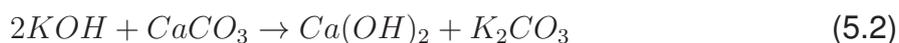


FIGURA 40 – TEOR DE CARBONATOS NO ENSAIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA



Observa-se na FIGURA 36 e na FIGURA 37 que não foi possível identificar nem KOH e nem o  $K_2CO_3$  nas amostras realcalinizadas. Isso pode ter ocorrido pois o  $K_2CO_3$  é muito solúvel em água e pode ter sido lixiviado para fora do concreto durante a própria realcalinização. E o KOH é muito solúvel em álcool, podendo ter sido carregado para fora das amostras durante a paralisação da hidratação das mesmas. Com base nesses resultados é possível que o hidróxido de potássio tenha reagido com o carbonato de cálcio formando portlandita, conforme descrito na Equação (5.2).



Segundo Atkins e Paula (2021), as reações químicas tendem a avançar para um estado de equilíbrio dinâmico. O sentido de uma transformação espontânea é aquele que conduz ao mínimo da energia livre de Gibbs (ATKINS; PAULA, 2021). Essa energia pode ser calculada utilizando a Equação (5.3), onde,  $\Delta G$  é a energia livre de Gibbs,  $\Delta H$  é a entalpia,  $T$  é a temperatura e  $\Delta S$  é a entropia.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (5.3)$$

A entalpia é uma grandeza que mede a energia de um sistema termodinâmico que pode ser removida na forma de calor (ATKINS; PAULA, 2021). A entropia é uma grandeza que mede o grau de liberdade molecular de um sistema e está relacionada a desordem da energia e da matéria (ATKINS; PAULA, 2021). A Segunda Lei da Termodinâmica estabelece que qualquer transformação espontânea em um sistema isolado é acompanhada de um aumento na entropia do sistema (ATKINS; PAULA, 2021).

Comparando-se duas substâncias, sendo uma mais solúvel e outra menos solúvel, a substância mais solúvel tem mais íons dissolvidos e, portanto maior entropia ( $\Delta S$ ). Observa-se na Equação (5.3) que, quando aumenta-se o  $\Delta S$ , diminui-se o  $\Delta G$ . Ou seja, quanto maior a solubilidade, maior a entropia ( $\Delta S$ ), e portanto menor a energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ). Com isso, tem-se que reagentes mais solúveis tendem a formar reações químicas com menor energia de Gibbs do que reagentes menos solúveis. Ou seja, reagentes com maior solubilidade tendem a formar reações espontâneas, enquanto reagentes com menor solubilidade tendem a formar reações não espontâneas.

Verificando-se a solubilidade dos reagentes e produtos da Equação (5.3), tem-se a solubilidade de 1120 g/l para o KOH, 0,014 g/l para o  $CaCO_3$ , 0,185 g/l para o  $Ca(OH)_2$  e 1120 g/l para o  $K_2CO_3$ . Com isso verifica-se que para a dada Equação, os produtos são mais solúveis do que os reagentes, com isso verifica-se que a reação química proposta na Equação (5.3) não é favorável.

Com isso tem-se que o KOH é responsável pela formação de portlandita, porém a reação química entre o KOH e  $CaCO_3$  (conforme Equação (5.2)) não ocorre de forma espontânea. Assim sendo, devem haver outros mecanismos responsáveis pela formação da portlandita, que não reações químicas.

Deve-se ressaltar que a portlandita é menos solúvel do que o KOH. Portanto, a portlandita tende a lixiviar com menor facilidade frente a ciclos de molhagem e secam e apresentar uma melhor durabilidade do tratamento do que o KOH para estruturas reais

em utilização. Ressalta-se que não é escopo do presente trabalho fazer um teste de lixiviação das amostras, sendo essas sugestões para trabalhos futuros.

Ocorre a formação de portlandita e carbonato de potássio, porém isso não pode ser considerada uma reação química, pois, segundo as leis da termodinâmica, essas reações não ocorrem e seu rendimento é baixo. O que ocorre nesse caso, é a perturbação do equilíbrio entre dissolução e precipitação das fases pouco solúveis, formando novas fase

#### 5.4 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nesse capítulo pode-se concluir que:

- A realcalinização química com solução de hidróxido de potássio gera portlandita, elevando a reserva alcalina da pasta de cimento;
- O pH das amostras realcalinizadas mostrou-se estatisticamente maior que o pH das amostras carbonatadas;
- A resistência à compressão possui relação inversa com o  $k_{realc}$  para os quatro tipos de cimentos utilizados;
- Amostras de concretos com cimentos pozolânicos (CP II-Z e CP IV) apresentaram maior  $k_{realc}$  do que as amostras de concreto com cimentos sem pozolana (CP V-ARI e CP II-F);
- Os cimentos CP II-F, CP II-Z e CP IV apresentam maior velocidade de carbonatação ( $k_{CO_2}$ ) quando comparados ao cimento CP V-ARI.

## 6 A REALCALINIZAÇÃO E A CORROSÃO DE ARMADURAS

### 6.1 INTRODUÇÃO

A RAQ pode ser utilizada como um método preventivo à corrosão, sendo utilizada para realcalinizar a camada de cobrimento antes da profundidade de carbonatação atingir as armaduras. Porém, é um fato que a grande maioria das edificações não é submetida a programas de manutenção preventiva no que se refere a corrosão de armaduras, assim como fica evidente nos exemplos de casos reais relatados por Medeiros, Pereira e Helene (2012), Medeiros *et al.* (2013), Medeiros Junior *et al.* (2015), Piatra (2017), Esteves, Medeiros-Junior e Medeiros (2018), Bayuaji *et al.* (2018), Balestra *et al.* (2019), Kmet *et al.* (2019), Possan. *et al.* (2020), Campione e Giambanco (2020), Campione e Cannella (2020), Medeiros e Helene (2021).

Neste contexto, é muito mais necessário uma técnica como a RAQ ser aplicada em obras em que a frente de carbonatação já chegou nas armaduras e provocou a iniciação da corrosão do aço carbono há alguns anos. Este fato coloca em evidência a necessidade de pesquisas focadas em produzir avanços na fronteira do conhecimento no que se refere a capacidade da RAQ repassivar as armaduras ou pelo menos desacelerar a cinética do processo de corrosão no concreto armado após o tratamento. Este é um tema controverso pois a repassivação das armaduras não foi verificada nos estudos de Araujo (2004), Sá (2006) e Araújo, Figueiredo e Helene (2007). Porém, Araujo (2004) e Ferreira *et al.* (2017a) reconhecem que mesmo sem haver repassivação das armaduras, existe uma tendência de melhoria dos resultados do potencial de corrosão e densidade de corrente, indicando uma redução na cinética da corrosão. No entanto, um ponto a se considerar é que o tempo após a conclusão do tratamento da RAQ para a obtenção da repassivação das armaduras pode ser maior do que o tempo de monitoramento que tem sido conduzido nos estudos citados.

Trabalhos de avaliação da passivação do aço no concreto armado tem registrado o tempo de formação da película passivadora de 3 a 4 meses usando cimento CP V ARI (GODINHO *et al.*, 2018) e 23 a 24 meses para aglomerante composto por (65% de cimento Portland + 35% de cinza volante) (CAPRARO; MACIOSKI; MEDERIOS, 2021). Além disso, os trabalhos citados adotam a prática de começar a RAQ logo após a despassivação das armaduras, o que não é uma condição próxima da realidade *in loco*. Desse modo, um estudo de repassivação por RAQ precisa simular estruturas em estado de corrosão mais avançado e com a aplicação de tempo de monitoramento da avaliação da repassivação das armaduras com prazos maiores. Este trabalho apresenta uma avaliação da repassivação causada por realcalinização química em que as

armaduras estiveram em condições de corrosão por carbonatação por mais de 4 anos e o monitoramento após a aplicação da RAQ foi de mais de 6 meses em concreto com o CP V ARI, que se mostrou um tempo suficiente para comprovar que a repassivação das armaduras de aço carbono ocorreu. Neste contexto, o presente trabalho experimental tem o foco de preencher a lacuna do conhecimento relacionada a capacidade do tratamento com a RAQ ser efetivo em termos de restabelecer a capacidade de proteção do aço do concreto armado que venha a ser tratado com esta técnica de recuperação.

Deve-se ressaltar que os modelos apresentados levam em conta apenas o tempo de propagação da corrosão, sem levar em conta o tempo de iniciação. Ou seja, desconsidera-se o tempo de carbonatação do concreto e despassivação das armaduras e leva-se em conta apenas o tempo que a corrosão já está ativa.

## 6.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 6.2.1 Procedimento geral

A FIGURA 41 apresenta o esquema das etapas de acondicionamento das amostras, bem como a idade das amostras em cada momento do acondicionamento. 1) Primeiramente realizou-se a limpeza das barras de aço conforme ASTM G1 (ASTM, 2017), pela imersão em solução aquosa de ácido clorídrico na proporção de 1:1 e 3,5 g/l de hexametilenotetramina por quinze minutos. Posteriormente, as barras foram lavadas em água corrente com escova de cerdas plásticas. Após a limpeza, as barras foram imersas em água com  $\text{Ca(OH)}_2$  para evitar nova corrosão das armaduras até o momento da moldagem.

2) Posteriormente moldaram-se 4 amostras de concreto de dimensões 25 x 25 x 7 cm com 3 barras de aço de 8 mm de diâmetro e 350 mm de comprimento e cobertura de 25 mm, conforme FIGURA 42. Para tanto, utilizou-se o cimento CP V-ARI, relação água/cimento de 0,70, traço de 1 : 2,60 : 3,20 e consumo de cimento de 315 kg/m<sup>3</sup>. 3) Após a moldagem, as amostras permaneceram 28 dias em cura úmida. 4) Posteriormente, as amostras passaram por sazonalização em câmara seca com temperatura igual a  $22 \pm 2$  °C e umidade relativa correspondente a  $50 \pm 10$  % por mais 28 dias. 5) Subsequentemente realizou-se a carbonatação acelerada em câmara de carbonatação com 5 % de  $\text{CO}_2$ ,  $(65 \pm 5)$  % de umidade relativa e  $(23 \pm 1)$  °C até total carbonatação das amostras, o que levou 98 dias. 6) Após a carbonatação acelerada, as amostras permaneceram acondicionadas em condições naturais de laboratório, sem controle de umidade,  $\text{CO}_2$  e temperatura por 1140 dias (38 meses). Esse acondicionamento ocorreu para que o processo de corrosão iniciasse e propagasse por um período elevado, para só então realizar a RAQ. Este detalhe diferencia o estado de corrosão das barras de aço carbono do presente trabalho em relação aos demais trabalhos citados na TABELA 7. Deve-se também ressaltar que esta condição de 38 meses em corrosão

(pouco mais de 3 anos), se aproxima de algumas condições reais de aplicação da RAQ, em que a frente de carbonatação atinge as armaduras e só um tempo depois efetiva-se o tratamento com a corrosão em estado mais avançado.

FIGURA 41 – ESQUEMA DAS ETAPAS DE ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS

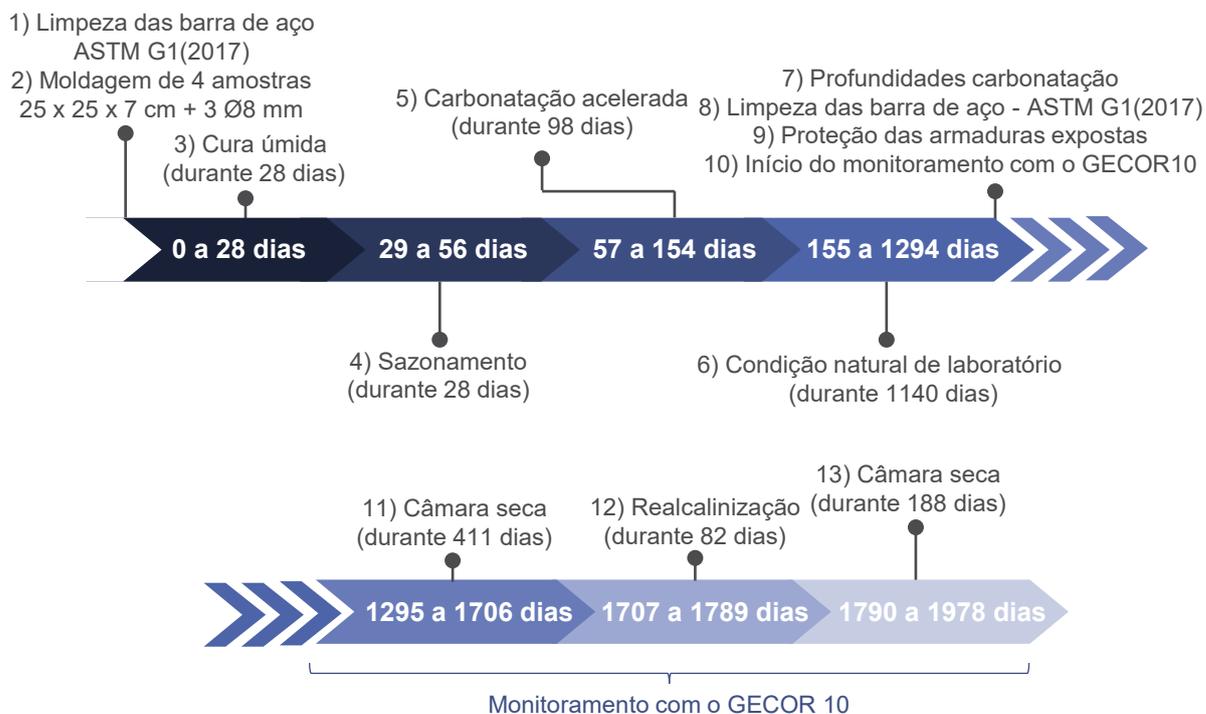
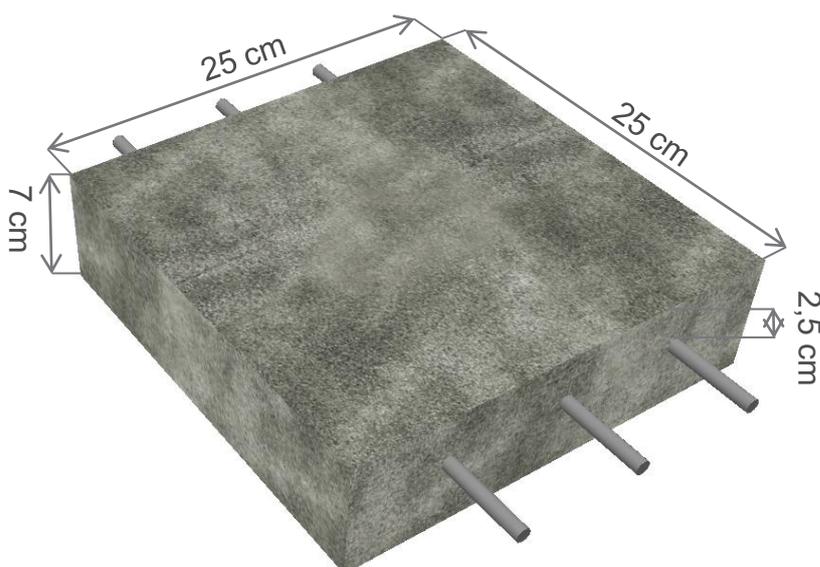


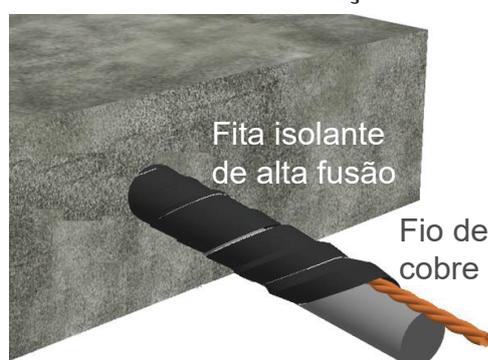
FIGURA 42 – ESQUEMA DAS AMOSTRAS DE 25 X 25 X 7 CM



7) Na idade de 1295 dias verificou-se que as amostras estavam totalmente carbonatadas. A verificação da carbonatação foi realizada por meio da aspersão de

solução de fenolftaleína. 8) Posteriormente, foi realizada a limpeza da parte exposta das barras de aço, conforme ASTM G1 (ASTM, 2017). Houve a imersão da parte exposta das armaduras em solução aquosa de ácido clorídrico na proporção de 1:1 e 3,5 g/l de hexametilenotetramina por quinze minutos. Em seguida, as barras foram lavadas em água corrente com escova de cerdas plásticas. 9) Como passo seguinte, posicionou-se um fio de cobre na superfície de um dos lados da armadura exposta, para estabelecer um contato entre ela e o equipamento de medição das grandezas eletroquímicas. As partes da armadura externas ao concreto foram completamente protegidas com fita isolante de alta fusão, similar ao esquema representado na FIGURA 43.

FIGURA 43 – ESQUEMA DE PROTEÇÃO DAS ARMADURAS



10) Nesse momento iniciou-se o monitoramento da corrosão de armaduras e verificou-se que já havia processo de corrosão nas armaduras. Esse processo foi verificado pela corrente de corrosão obtida com o equipamento GECOR 10, que usa a técnica de resistência de polarização linear. 11) A partir do dia 1295 as amostras permaneceram em câmara seca com temperatura igual a  $22 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $50 \pm 10$  % a fim de equilibrar a umidade no interior da amostra. As amostras foram retiradas da câmara seca apenas para as leituras de corrosão. Nesses momentos os corpos de prova foram imersos em água por 24h antes de cada leitura, a fim permitir a passagem de corrente elétrica no interior do concreto. No momento da leitura, colocou-se uma esponja embebida com água entre a amostra de concreto e o sensor do equipamento. Os resultados apresentados pelo GECOR 10 e utilizado no presente estudo são, corrente de corrosão e potencial de corrosão. O resultado para cada um dos 4 corpos de prova é representado pela média aritmética das 3 barras de aço. E o resultado final é a média aritmética dos 4 corpos de prova de concreto empregados.

12) Após a verificação de grau de corrosão moderado pela corrente de corrosão, decidiu-se iniciar a realcalinização das amostras. A RAQ foi realizada por meio de total imersão das amostras em solução de NaOH na concentração de 3,75 mol/l, conforme utilizado por Réus (2017). Foi necessário utilizar uma solução alcalina diferente da

solução utilizada nos capítulos anteriores, pois, no decorrer da pesquisa, a compra do KOH tornou-se mais restrita, enquanto a compra do NaOH foi facilitada. A dificuldade da compra do material poderia acarretar em atrasos significativo ao prazo final da pesquisa. Além disso, Réus e Medeiros (2020) apresenta bons resultado para a RAQ com solução alcalina de NaOH.

13) Após a realcalinização as amostras retornaram para câmara seca (temperatura igual a  $22\pm 2$  °C e umidade relativa de  $50\pm 10$  %) a fim de equilibrar a umidade no interior da amostra e com isso não obter variações nos resultados dos ensaios em função da umidade das amostras.

### 6.2.2 Técnica de monitoramento da corrosão e critérios de avaliação

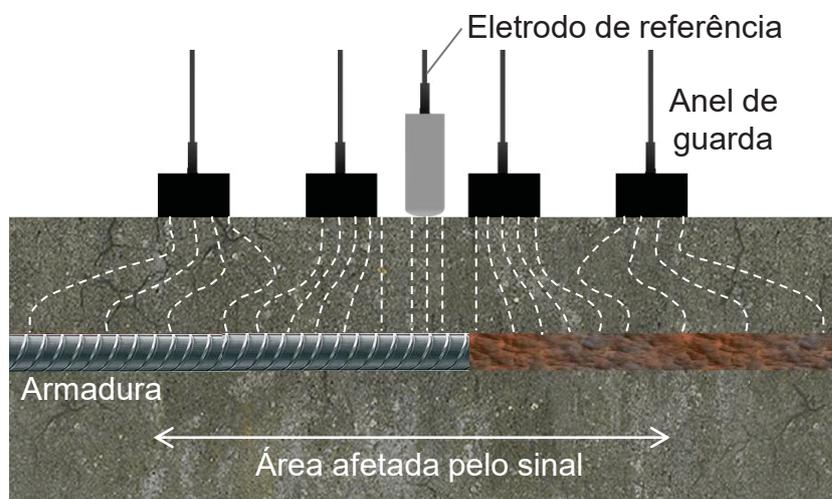
Para o monitoramento da corrosão de armaduras foi utilizada a medição do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e da corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ). O  $E_{corr}$  foi medido usando a técnica de potencial de circuito aberto usando o eletrodo de cobre/sulfato de cobre como eletrodo de referência. Por outro lado,  $i_{corr}$  foi medido usando a técnica de resistência à polarização em conjunto com a técnica de confinamento modulado. Essas técnicas induzem um pulso galvanostático na armadura a ser monitorada em termos de desenvolvimento de corrosão.

A resistência de polarização baseia-se na aplicação de um pequeno pulso elétrico no metal controlado por um eletrodo de referência. A técnica de confinamento modulado é realizada por meio da aplicação de um pulso galvanostático, com duração de 30 a 100 segundos, a partir do contador central. Em seguida, outra contracorrente é aplicada do anel externo, e essa corrente externa é modulada por meio dos dois eletrodos de referência chamados para equilibrar as correntes internas e externas (ANDRADE, 2005). Como aparelho de execução das medidas de  $E_{corr}$  e de  $i_{corr}$ , foi empregado o GECOR 10 (FIGURA 44 (a)) com o sensor indicado na FIGURA 44 (b) e na FIGURA 44 (c), mostrando os anéis de guarda cuja função é delimitar a área onde a corrente elétrica irá circular (FIGURA 45).

FIGURA 44 – (A) EQUIPAMENTO GECOR 10 UTILIZADO PARA MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELETROQUÍMICOS, (B) CONEXÃO ENTRE O EQUIPAMENTO E O SENSOR E (C) SENSOR DO EQUIPAMENTO GECOR 10



FIGURA 45 – TÉCNICA DE CONFINAMENTO MODULADO UTILIZADA INTERNAMENTE NO EQUIPAMENTO GECOR 10



FONTE: Adaptado de Andrade (2005).

Na corrente de corrosão, a intensidade de corrente gerada pela corrosão da armadura é inversamente proporcional a resistência à polarização, como pode ser observado na Equação (6.1) (ANDRADE; ALONSO, 2004). Onde:  $B$  é uma constante em função das características do sistema metal/meio e varia entre 12 e 52 mV (ANDRADE, 2005),  $R_p$  é a resistência à polarização (em  $k\Omega$ ) e  $S$  é a área da amostra (em  $cm^2$ ). Sendo que o equipamento utiliza o valor de 26 mV para a constante  $B$  e apresenta diretamente o valor de corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ) como resposta das leituras.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p \cdot S} \quad (6.1)$$

Para avaliar a corrente de corrosão, Alonso *et al.* (1996) apresentaram faixas de valores, conforme a TABELA 16. Além dessa faixa de valores apresentada, Goñi e Andrade (1990) consideram valores entre  $0,1 \mu A/cm^2$  a  $0,2 \mu A/cm^2$  como uma zona de incerteza. Neste mesmo caminho, González *et al.* (1996) consideram apenas valores maiores que  $0,2 \mu A/cm^2$  como risco para durabilidade do concreto armado. Andrade e Alonso (2004) afirmam que valores entre  $0,1 \mu A/cm^2$  a  $0,2 \mu A/cm^2$  devem ser considerados como uma transição entre o estado ativo e passivo de corrosão. Outros autores, como Poursaeed e Hansson (2007) e Ortolan, Mancio e Tutikian (2016) também consideram essa região como estado passivo de corrosão. Isto posto, considerou-se para o presente trabalho como desprezível, valores abaixo de  $0,2 \mu A/cm^2$ , e utilizou-se como referência os valores da TABELA 17.

TABELA 16 – RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE CORROSÃO E O GRAU DE CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO

$i_{corr} (\mu A/cm^2)$	Grau de corrosão
$\leq 0,1$	Desprezível
0,1 - 0,5	Baixo
0,5 - 1,0	Moderado
$> 1$	Alto

Fonte: Alonso *et al.* (1996).

TABELA 17 – RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE DE CORROSÃO E O GRAU DE CORROSÃO DE ARMADURAS NO CONCRETO UTILIZADOS NO PRESENTE TRABALHO

$i_{corr} (\mu A/cm^2)$	Grau de corrosão
$\leq 0,2$	Desprezível
0,2 - 0,5	Baixo
0,5 - 1,0	Moderado
$> 1$	Alto

Fonte: Adaptado de Alonso *et al.* (1996).

O potencial de corrosão consiste em medir a diferença de potencial elétrico entre o aço da peça de concreto armado em análise e um eletrodo de referência, capaz de manter seu potencial elétrico estável (ROMANO; BRITO; RODRIGUES, 2013). Ao conectar-se o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho (barra de aço do concreto) surge um fluxo de elétrons, da armadura em direção ao eletrodo de referência, mais nobre e com potencial mais positivo, passando pelo voltímetro de alta impedância e indicando a intensidade da diferença de potencial do eletrodo entre as semipilhas (eletrodo de referência e eletrodo de trabalho) (MEDEIROS; BALBINOT; HELENE, 2010); (MEDEIROS *et al.*, 2017a). Para o fechamento do circuito é necessário que haja uma interface condutiva entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho. Isso é feito usando uma esponja saturada colocada no contato elétrico entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto (MEDEIROS; KNUUTILA; HELENE, 2013).

A TABELA 18 mostra uma avaliação da probabilidade de corrosão das armaduras com base nos resultados de potencial de corrosão do aço. Segundo a ASTM C876 (2015), os critérios da TABELA 18 normalmente não devem ser utilizados para avaliar o aço em concretos onde a carbonatação atingiu o nível do cobrimento, a menos que a experiência ou o exame destrutivo de algumas áreas, ou ambos, sugiram sua aplicabilidade. Não há uma tabela semelhante para ser utilizada para aços em concretos onde a carbonatação atingiu o nível do cobrimento. Isto posto, os valores da TABELA 18 serão utilizados apenas como valores de referência e não como valores fixos para verificar a probabilidade de corrosão, bem como critério empregado por Ribeiro *et al.* (2013).

TABELA 18 – PROBABILIDADE DE CORROSÃO PELO POTENCIAL DE CORROSÃO COM ELETRODO DE CU/SO<sub>4</sub>CU

$E_{corr}$ (mV, Cu/ SO <sub>4</sub> Cu)	Probabilidade de corrosão
Inferior a -350 mV	Superior a 90%
De -200 a -350 mV	Incerta
Superior a -200 mV	Inferior a 10%

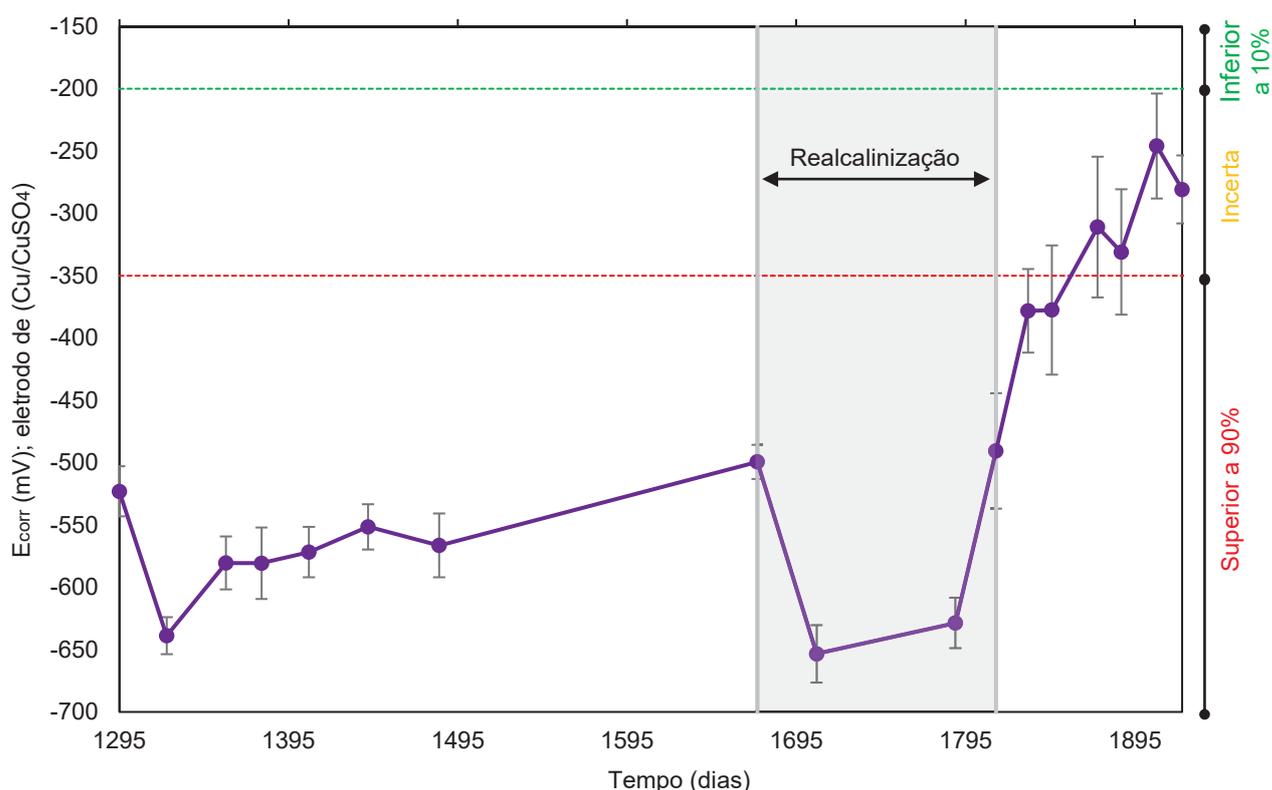
FONTE: ASTM C876 (ASTM, 2015).

### 6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

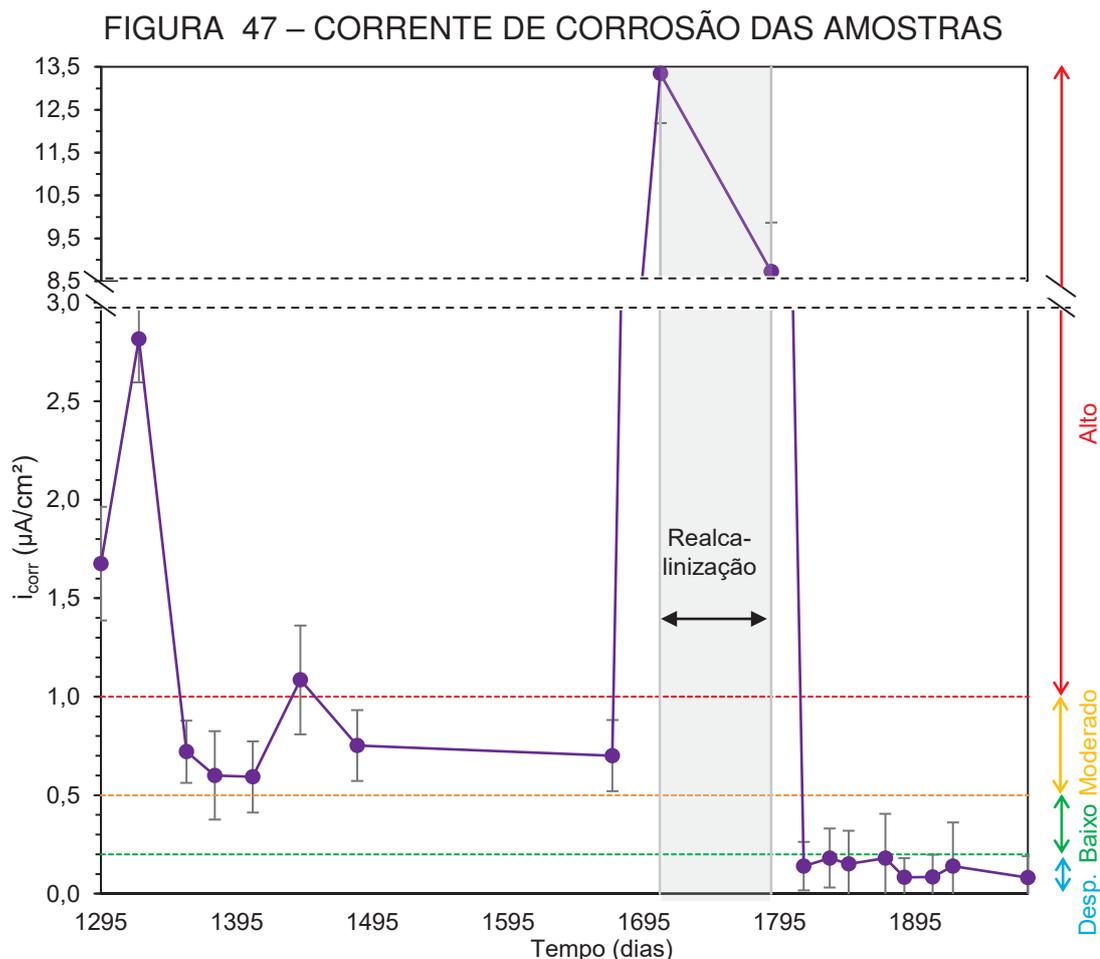
A FIGURA 46 apresenta os resultados de potencial de corrosão e a FIGURA 47 apresenta os resultados de corrente de corrosão dos corpos de prova de concreto armado ao longo do período de monitoramento. Em ambas as figuras se observa que as 2 primeiras leituras apresentaram variações e posteriormente, os valores se mantiveram constantes até o momento da realcalinização. Isso ocorreu porque até os 1294 dias as amostras estavam sob condições naturais de laboratório sem controle de temperatura e umidade. A umidade relativa média do ar de Curitiba (cidade onde os ensaios foram realizados) é de 81%, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia. Após os 1295 dias,

as amostras foram acondicionadas em câmara seca com controle de temperatura e umidade (com  $22 \pm 2$  °C temperatura e  $50 \pm 10$  % umidade relativa). O acondicionamento em sala com ambiente controlado ocasionou a obtenção de resultados mais estáveis a partir da terceira leitura de corrente de corrosão. Além disso, os valores de corrente de corrosão podem ter diminuído da terceira leitura em diante, pois a câmara seca possui menor umidade do que o acondicionamento em ambiente natural de laboratório.

FIGURA 46 – POTENCIAL DE CORROSÃO DAS AMOSTRAS



Após a carbonatação acelerada as amostras apresentaram total carbonatação. Depois do acondicionamento em condições naturais de laboratório e antes da realcalinização, as amostras apresentaram resultados de potencial de corrosão na região de probabilidade de corrosão superior a 90 %. Durante a realcalinização, os resultados mantiveram-se na mesma região e apresentaram valores ainda mais negativos. Após a realcalinização, os valores de potencial de corrosão aumentaram gradativamente, migrando para a região de corrosão incerta e encaminhando-se para a região de probabilidade de corrosão inferior a 10 %. Destaca-se que o potencial de corrosão representa apenas resultados qualitativos enquanto a corrente de corrosão é um ensaio que apresenta resultados quantitativos e representativos da cinética do processo de corrosão. Além disso, os valores de -200 mV e -350 mV são usados, nesse trabalho apenas como valores orientativos da probabilidade de corrosão.



Verifica-se na FIGURA 47 que após a estabilização dos resultados (terceira leitura em diante) observou-se que as amostras apresentavam grau moderado de corrosão ( $i_{corr} = 0,5 - 1,0 \mu A/cm^2$ ). Em seguida, foi realizado o procedimento de realcalinização química com a total imersão das amostras em solução de NaOH na concentração de 3,75 mol/l. Os resultados de  $i_{corr}$  obtidos durante a realcalinização foram de  $13,3 \mu A/cm^2$  e  $9,7 \mu A/cm^2$ , sendo um indicativo de uma atividade eletroquímica típica de formação da película passivadora provocada pela nova elevação do pH para valores acima de 12. O importante é que, imediatamente após o período de realcalinização, os valores de corrente de corrosão migraram para a zona de grau desprezível a baixo de corrosão ( $< 0,2 \mu A/cm^2$ ), indicando passivação do aço de reforço. Monitorou-se as amostras após 189 do final da RAQ e observou-se que elas permaneceram na zona de corrosão desprezível até o final deste monitoramento, assim como indicado na FIGURA 47.

Esses resultados foram diferentes dos resultados observados na literatura (TABELA 8). Este fato indica que o tema da passivação das armaduras após a RAQ precisa ser estudado com mais profundidade e sob uma maior amplitude de condições, variando por exemplo o tipo de cimento Portland, o nível de corrosão no momento da

aplicação do tratamento, as condições de umidade após o tratamento, entre outras.

Para verificar se a camada de repassivação se formou após a RAQ, é recomendado observar os resultados de potencial de corrosão (FIGURA 46) e de corrente de corrosão (FIGURA 47) em conjunto. Capraro, Macioski e Mederios (2021), Nahali, Dhouibi e Idrissi (2014), Garcés *et al.* (2007) e Iroh e Su (2000) consideraram a estabilização do potencial de corrosão como indicativo da formação da camada de repassivação do aço. Sun *et al.* (2017) consideraram que a camada de passivação havia sido formada quando o potencial de corrosão migrou de valores próximos a -240 mV para valores próximos a -180 mV e mantiveram-se constantes, para o eletrodo de referência de calomelano saturado. Williamson e Isgor (2016) consideraram que a camada de passivação havia sido formada quando os valores de potencial de corrosão mudaram de valores entre -425 mV a -450 mV para -175 mV a -225 mV, para o eletrodo de referência de calomelano saturado semelhante aos parâmetros utilizados por Ghods *et al.* (2010) e Ghods *et al.* (2009).

Ribeiro *et al.* (2013) verificaram a repassivação das armaduras após a realcalinização eletroquímica. Os valores de potencial de corrosão diminuíram para -250 mV após 1 mês de tratamento e -200 mV após 2 meses de tratamento para eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>. Os autores consideraram que a camada de passivação estava formada após apresentar resultados de -200 mV.

Nahali, Dhouibi e Idrissi (2014) consideraram valores de  $i_{\text{corr}}$  entre  $7 \mu \text{ A/cm}^2$  e  $46 \mu \text{ A/cm}^2$  como indicativo de que a camada de repassivação estava sendo formada. Os mesmos autores consideraram elevação dos valores de potencial de corrosão como outro indicativo da formação da camada de repassivação. Dong, Shi e Guo (2011) consideraram que o decaimento repentino dos valores de  $i_{\text{corr}}$  representam a repassivação do aço. Martinez *et al.* (2015) consideram o aço repassivado quando os valores de potencial de corrosão estavam se elevando e o  $i_{\text{corr}}$  estava constantemente abaixo de  $0,2 \mu \text{ A/cm}^2$ .

Isto posto, os valores elevados de  $i_{\text{corr}}$  ( $13,3 \mu \text{ A/cm}^2$  e  $9,7 \mu \text{ A/cm}^2$ ) durante a realcalinização indicam que a camada de repassivação estava sendo formada nesse período (FIGURA 47). E os valores constantes na região de grau de corrosão desprezível ( $< 0,2 \mu \text{ A/cm}^2$ ) após a realcalinização indicam que a camada foi formada. Os valores de potencial de corrosão (FIGURA 46) aumentando após a realcalinização corroboram com a formação da camada de repassivação.

É importante destacar que para que se façam as leituras de  $i_{\text{corr}}$  e  $E_{\text{corr}}$  é necessário que as amostras tenham umidade em seu interior para que haja o fechamento do circuito elétrico. Portanto, conforme descrito no programa experimental, as amostras foram imersas em água por 24h antes das leituras. No dia 1992 realizou-se um teste com aspersão de fenolftaleína para verificar se essa imersão em água havia ou não

carreado o NaOH para fora do concreto, voltando a desproteger as armaduras. É possível observar na FIGURA 48 que o interior do concreto ainda continuava alcalino. Contudo, é provável que a molhagem das amostras antes das leituras de  $i_{\text{corr}}$  e  $E_{\text{corr}}$  tenha carreado o NaOH para fora do concreto na camada mais externa. Com isso observou-se uma espessura pouco alcalina de 0,93 cm em média. Como o cobrimento das armaduras eram de 2,5 cm, as barras de aço carbono continuavam protegidas.

Com isso, observou-se que a realcalinização química foi capaz de repassivar as armaduras logo após o fim do tratamento e manter-se eficiente após 189 dias do término da realcalinização. Além disso, os resultados mostram que as armaduras continuaram passivas quando os corpos de prova permaneciam com o concreto ao redor das armaduras alcalinos e com a parte externa com a alcalinidade diminuída.

FIGURA 48 – ASPERSÃO DE FENOLFTALEÍNA NA AMOSTRA NO DIA 924, APÓS O PROCESSO DE REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA E ALGUMAS MEDIDAS DE  $E_{\text{CORR}}$  E  $I_{\text{CORR}}$  COM A IMERSÃO POR 24H EM ÁGUA



#### 6.4 DISCUSSÃO USANDO MODELOS DE VIDA ÚTIL

Com o passar do tempo em condições de operação, a corrosão de armaduras leva a perda de seção do aço e a fissuração do concreto. Dependendo do grau de perda de seção e de fissuração é necessário realizar intervenções na estrutura, como o reforço das armaduras. Neste contexto, os resultados apresentados neste trabalho indicaram que a realcalinização química reduz a velocidade de corrosão, o que posterga a necessidade de realizar reforços estruturais.

Há alguns modelos matemáticos usados para calcular a perda de seção estimada das armaduras com base na corrente de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) das mesmas. É possível citar alguns modelos matemáticos simples, como Andrade, Alonso e Molina (1993), Andrade (1996) e Stewart e Rosowsky (1998) *apud* Felix (2018) e até modelos mais

complexos como Kuntal *et al.* (2021), Lun *et al.* (2021) e Sola *et al.* (2019). Os modelos matemáticos mais simples possuem a vantagem de necessitarem de poucos dados de entrada para a efetivação das projeções da deterioração ao longo do tempo. Sendo assim, são modelos que podem ser aplicados com facilidade em casos reais de reparos estruturais. Por outro lado, os modelos mais complexos tendem a apresentar resultados mais precisos, porém tem a dificuldade de requererem vários dados de entrada, que nem sempre estão disponíveis para uma aplicação prática.

Para o presente estudo, foram utilizados dois modelos diferentes de previsão de perda de seção das armaduras e um modelo de abertura de fissuras no concreto. Para efeitos de nomenclatura, o primeiro modelo é chamado de Andrade (1993) e se refere ao modelo apresentado no trabalho de Andrade, Alonso e Molina (1993) e também no trabalho de Andrade (1996). O segundo modelo de perda de seção utilizado foi denominado Stewart (1998) e é apresentado no trabalho de Stewart e Rosowsky (1998) citado por Felix (2018). Para tanto, comparou-se a previsão de perda de seção utilizando o grau de corrosão antes e depois da realcalinização com os dois modelos citados. Já para a abertura de fissuras foi utilizado o modelo descrito no Eurocode 2 (EUROPEAN PRESTANDARD, 1992). Com isso, foi possível quantificar a contribuição da realcalinização química para a diminuição da taxa de perda de seção das armaduras e de abertura de fissuras no concreto, sendo um indicativo do benefício que a RAQ pode proporcionar em uma estrutura de concreto armado.

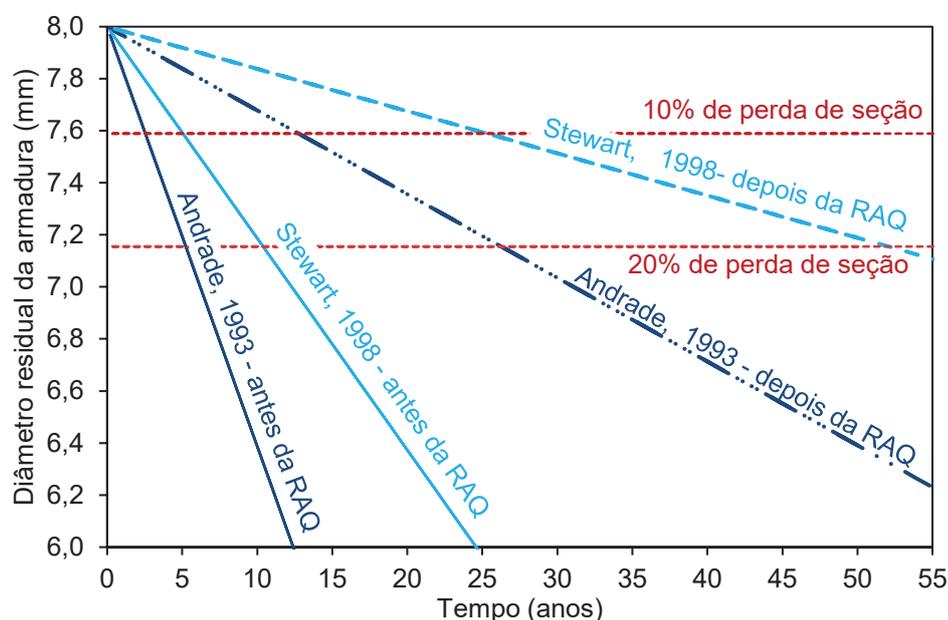
O modelo de Andrade, Alonso e Molina (1993) é apresentado na Equação (6.2), onde  $\phi_t$  é o diâmetro residual da armadura (em mm),  $\phi_i$  é o diâmetro inicial da armadura (em mm),  $i_{corr}$  é a corrente de corrosão (em  $\mu A/cm^2$ ) e  $t$  é o tempo (em anos). A Equação (6.3) apresenta o modelo proposto por Stewart e Rosowsky (1998), conforme citado por Felix (2018) onde  $d(t_p)$  é o diâmetro integro do aço (em mm),  $d_0$  é o diâmetro inicial da barra (em mm),  $\eta$  é a taxa de corrosão da armadura (em  $\mu A/cm^2$ ) e  $t_p$  é o tempo de propagação da corrosão (em anos).

$$\phi_t = \phi_i - 0,023 \cdot i_{corr} \cdot t \quad (6.2)$$

$$d(t_p) = d_0 - 0,0116 \cdot \eta \cdot t_p \quad (6.3)$$

Verifica-se que os modelos de Andrade, Alonso e Molina (1993) (Equação (6.2)) e de Stewart e Rosowsky (1998) (Equação (6.3)) utilizam as mesmas incógnitas apenas com diferentes representações, sendo que a diferença real entre os modelos é a constante matemática. Andrade, Alonso e Molina (1993) utilizam a constante de -0,023 enquanto Stewart e Rosowsky (1998) utilizam a constante de -0,0116.

FIGURA 49 – PERDA DE SEÇÃO DA ARMADURA AO LONGO DO TEMPO COM BASE NA TAXA DE CORROSÃO ANTES E DEPOIS DA REALCALINIZAÇÃO



Utilizou-se os valores de  $i_{corr}$  antes da realcalinização de  $0,701 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  e após a realcalinização de  $0,140 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Com base nisso, a FIGURA 49 apresenta a evolução da perda de seção das armaduras ao longo do tempo utilizando os modelos de Andrade, Alonso e Molina (1993) e Stewart e Rosowsky (1998).

Para o modelo de Andrade (1993) verifica-se que antes da RAQ levaria 2,5 anos para a perda de 10% de seção da armadura, enquanto após a RAQ levaria 12,8 anos. O aumento no tempo após a RAQ foi de 5 vezes. Já para 20% de perda de seção da armadura, considerando o mesmo modelo, levaria 5,2 anos antes da RAQ e 26,2 anos após a RAQ. Isso representa um aumento de tempo de 5 vezes. Para o modelo de Stewart e Rosowsky (1998) verifica-se que antes da RAQ levaria 5,0 anos para a perda de 10% de seção da armadura, enquanto após a RAQ levaria 25,3 anos. O aumento no tempo após a RAQ foi de 5 vezes. Já para 20% de perda de seção da armadura, levaria 10,4 anos antes da RAQ e 52,0 anos após a RAQ. Isso representa um aumento de tempo de 5 vezes. Com isso, fica clara a contribuição da RAQ para a diminuição da taxa com que há a perda de seção das armaduras em corrosão.

Para verificação da previsão de abertura de fissuras no concreto antes e depois da RAQ, utilizou-se o modelo citado no Eurocode 2 (EUROPEAN PRESTANDARD, 1992). A Equação (6.4) mostra o modelo referido, onde,  $w$  é a abertura de fissuras do concreto (em mm),  $\beta$  é o coeficiente que depende da posição da barra (10 para superior e 12,5 para inferior),  $P_x$  é a penetração do ataque (em mm) e  $P_{X0}$  é a penetração do ataque para iniciação da fissura (em mm).

$$w = 0,05 + \beta[P_x - P_{x0}][w \leq 1,0mm] \quad (6.4)$$

Para o cálculo de  $P_x$  utilizou-se a Equação (6.5) dada por CONTECVET IN30902I (2001), onde  $\phi_0$  é o diâmetro original da barra (em mm) e  $\phi_t$  é o diâmetro da barra no tempo  $t$  (em mm). Substituindo-se  $\phi_t$  da Equação (6.2) na Equação (6.5) e considerando-se  $\phi_0 = \phi_i$ , obtém-se o valor de  $P_x$  calculado com base no modelo de Andrade (1993). E substituindo-se  $d_{tp}$  da Equação (6.3) por  $\phi_t$  na Equação (6.5) e considerando-se  $\phi_0 = d_0$ , obtém-se o valor de  $P_x$  calculado com base no modelo de Stewart (1998).

$$P_x = (\phi_0 - \phi_t)/2 \quad (6.5)$$

Para o cálculo de  $P_{x0}$  utiliza-se a Equação (6.6) dada por Uomoto e Misra, 1987, citado CONTECVET IN30902I (2001), onde  $c$  é o cobrimento da barra de aço (em mm),  $\phi_i$  é o diâmetro da barra de aço (em mm), e  $f_{c,sp}$  é a resistência a tração do concreto (em MPa).

$$P_{x0} = (83,8 + 7,4.c/\phi_i - 22,6.f_{c,sp}).10^{-3}[P_{x0} \geq 0] \quad (6.6)$$

Para o cálculo da resistência do concreto à tração indireta ( $f_{ct,sp}$ ) utiliza-se as Equações (6.7) e (6.8) conforme NBR 6118 (ABNT, 2014b), onde  $f_{ct,m}$  é a resistência média a tração do concreto,  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto e  $f_{ct}$  é a resistência do concreto à tração direta. Considera-se  $f_{ct,m} = f_{ct}$  e substitui-se  $f_{ct,m}$  na Equação (6.7) por  $0,9.f_{ct,sp}$ . Com isso obtém-se a Equação (6.9).

$$f_{ct,m} = 0,3.f_{ck}^{2/3} \quad (6.7)$$

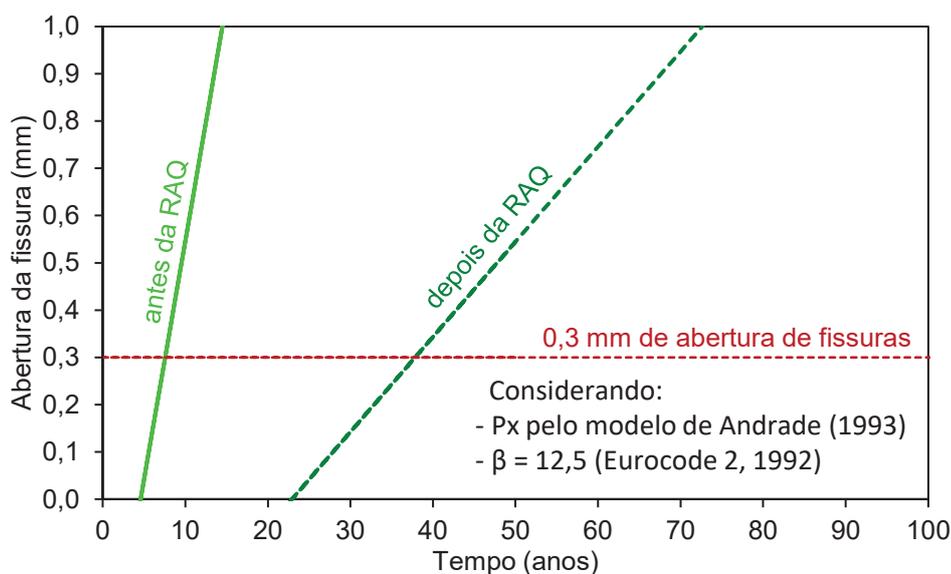
$$f_{ct} = 0,9.f_{ct,sp} \quad (6.8)$$

$$f_{ct,sp} = 0,333.f_{ck}^{2/3} \quad (6.9)$$

Isto posto, calculou-se a previsão de abertura de fissuras no concreto antes e depois da RAQ a partir das equações (6.4), (6.5), (6.6) e (6.9). Considerou-se dados das amostras utilizadas no presente capítulo, ou seja,  $\beta = 12,5$  (considerando armadura inferior),  $c = 25$  mm,  $\phi_i = 8$  mm e  $f_{ck} = 26$  MPa. Com isso obteve-se a FIGURA 50 e a FIGURA 51 que apresentam a evolução da abertura de fissuras do concreto antes e depois da RAQ, utilizando  $P_X$  pelo modelo de Andrade (1993) e  $P_X$  pelo modelo de Stewart (1998), respectivamente.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014b) o limite máximo de abertura de fissuras para o concreto armado em uma classe de agressividade II (ambiente urbano) é de 0,3 mm, semelhante ao estabelecido pelo Eurocode 2. A FIGURA 52 apresenta o tempo despendido para iniciar a abertura de fissuras e para abrir uma fissura de 0,3 mm, antes e depois da realcalinização, para os modelos de Andrade, Alonso e Molina (1993) e Stewart e Rosowsky (1998). Observa-se que o tempo para iniciar a abertura de fissura, de acordo com o modelo de Andrade, Alonso e Molina (1993) é de 5 anos antes da RAQ e de 24 anos após a RAQ. Houve um aumento no tempo para a iniciação de fissuras de 4,8 vezes após a RAQ. Já para o modelo de Stewart e Rosowsky (1998), levaria 10 anos para iniciar a abertura de fissuras antes da RAQ, e 46 anos para iniciar a abertura de fissuras após a RAQ, isso representa um acréscimo de tempo de 4,6 vezes. Em relação ao tempo despendido para abrir uma fissura de 0,3 mm, de acordo com o modelo de Andrade, Alonso e Molina (1993) levaria 8 anos antes da RAQ e 38 anos após a RAQ, representando um aumento 4,75 vezes no tempo. Para o modelo de Stewart e Rosowsky (1998) levaria 15 anos para a abertura de uma fissura de 0,3 mm antes da RAQ e 76 anos após a RAQ, sendo um aumento no tempo em 5,1 vezes. Desse modo, fica clara a influência positiva da realcalinização na taxa de fissuração do concreto.

FIGURA 50 – ABERTURA DE FISSURAS NO CONCRETO AO LONGO DO TEMPO ANTES E DEPOIS DA REALCALINIZAÇÃO CONSIDERANDO  $P_x$  PELO MODELO DE ANDRADE, ALONSO E MOLINA (1993) E  $\beta = 12,5$  (EUROCODE 2, 1992)



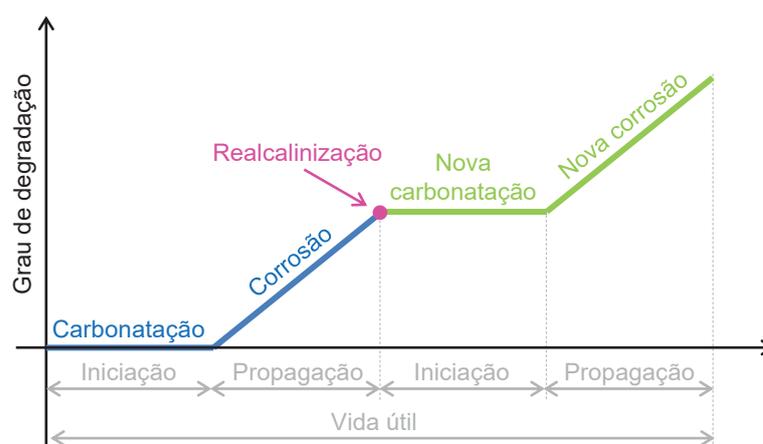


A FIGURA 53 apresenta um esquema do modelo de vida útil de uma estrutura de concreto armado realcalinizada. Primeiramente ocorre a carbonatação do concreto. Após a carbonatação atingir e ultrapassar o cobrimento de concreto, há a despassivação das armaduras e início do processo de corrosão. Nesse momento há o aumento do grau de degradação da estrutura. Quando há a realcalinização, as armaduras voltam a ficar passivas. Isso mantém o grau de corrosão constante. Posteriormente pode ocorrer uma nova carbonatação do concreto e então nova despassivação e corrosão das armaduras, elevando novamente o grau de degradação da estrutura.

Para calcular como a realcalinização interfere no processo de degradação de uma estrutura de concreto seria necessário utilizar modelos de previsão que englobem a nova carbonatação e a nova corrosão. Não há na literatura modelos que compreendam essas etapas. Além disso não há dados disponíveis sobre uma velocidade de nova carbonatação e de uma nova corrente de corrosão. Portanto não é possível fazer a previsão de vida útil após a carbonatação como é apresentada na FIGURA 53.

No presente estudo os modelos utilizados consideram o estado ativo de corrosão. Nesse caso o período de nova carbonatação é desconsiderado. Ademais, não se sabe se a nova carbonatação e a nova corrosão são mais lentas ou mais rápidas que a carbonatação e a corrosão que ocorrem inicialmente. Desse modo, supõe-se que a RAQ poderia aumentar ainda mais a vida útil das estruturas, em relação ao acréscimo previsto pelos modelos apresentados.

FIGURA 53 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO DE VIDA ÚTIL DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO RELACALINIZADA



## 6.5 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento desse capítulo conclui-se que:

- A realcalinização química com a total imersão das amostras em solução de NaOH foi capaz de elevar os valores de  $E_{corr}$  ao ponto de que a probabilidade de corrosão de 90% passou para a região de incerteza de acordo com a ASTM C 876. Além disso, os dados apresentam uma clara tendência de o  $E_{corr}$  passar para a probabilidade de corrosão inferior a 10%;
- A realcalinização química com a total imersão das amostras em solução de NaOH foi capaz de reduzir os valores de corrente de corrosão. Esta diminuição conduziu as amostras do grau moderado de corrosão para o grau desprezível de corrosão, indicando a passivação do aço no concreto armado tratado com a RAQ;
- As armaduras se mantiveram com um grau desprezível de corrosão após 189 dias do término da realcalinização;
- A camada de repassivação das armaduras foi restaurada logo após o término da aplicação da realcalinização química;
- Com base em modelos de previsão de perda de seção da armadura, verificou-se que a RAQ foi capaz de prolongar o tempo para redução de 20% de seção das armaduras em 5 vezes;
- Verificou-se que a RAQ aumentou em mais de 5 vezes o tempo para que o processo de corrosão de armaduras origine uma fissura com abertura de 0,3 mm (limite de fissuração estabelecido pela NBR 6118).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 CONCLUSÕES GERAIS

Com os resultados obtidos na presente tese tem-se como principais conclusões:

- A realcalinização química com hidróxido de potássio forma portlandita;
- A formação de portlandita na realcalinização química com solução alcalina de KOH eleva o pH das amostras de forma significativa em relação as amostras carbonatadas;
- A realcalinização química com NaOH reduz a cinética de corrosão logo após sua aplicação;
- A realcalinização química com NaOH foi capaz de restaurar a camada de passivação das armaduras e levá-las a um grau desprezível a baixo de corrosão indicando que a realcalinização pode ser utilizada para tratar estruturas de concreto armado com corrosão já em andamento.

### 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar a quantidade de portlandita formada em relação ao tempo de tratamento da RAQ;
- Testar a lixiviação acelerada das amostras realcalinizadas, para comparar com a situação de molhagem e secagem (com chuva);
- Estudar a velocidade de recarbonatação do concreto após ser realcalinizado.
- Testar a utilização do silicato de sódio alcalino misturados com NaOH em diferentes proporções e verificar a viscosidade da mistura e a lixiviação da mistura após a aplicação;
- Continuar a verificar se a RAQ protege as armaduras da corrosão após sua aplicação;
- Analisar a influência do grau de corrosão das amostras de concreto armado antes de iniciar a realcalinização;
- Analisar a influência do grau de corrosão de armaduras na cinética de corrosão após a realcalinização química em amostras de concreto contendo barra de aço;

- Aprimorar ou desenvolver um método de aplicação para a realcalinização química em estruturas reais;
- Desenvolver uma análise financeira da aplicação da realcalinização química em estrutura real, comparativamente com a aplicação de outros métodos de tratamento para estruturas de concreto armado carbonatadas;
- Desenvolver um coeficiente de realcalinização para concretos com diferentes relações água/cimento, tipos de cimento e tipos de adições minerais e pozolânicas. E assim propor coeficientes para prever o tempo de realcalinização para as amostras estudadas;
- Verificar a possível potencialização da reação álcali-agregado em concretos realcalinizados.

### 7.3 ATUAÇÃO NA ELABORAÇÃO DE ARTIGOS

Durante o tempo de desenvolvimento do presente estudo foram publicados alguns trabalhos acadêmicos. Sendo que alguns deles foram relativos a realcalinização química (subseção 7.3.1) e outros trabalhos foram desenvolvidos dentro do Grupo de Pesquisa Patologia e Reabilitação das Construções em conjunto com outros membros do grupo (subseção 7.3.2).

#### 7.3.1 Artigos relacionados a realcalinização química

RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Chemical realkalization for carbonated concrete treatment: Alkaline solutions and application methods. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020.

RÉUS, G. C.; JESUS, A. R. ; MEDEIROS, M. H. F. Aplicação de solução comercial alcalina para realcalinização química de concretos carbonatados. **Revista técnica científica do CREA-PR**, v. 1, p. 1-13, 2017.

RÉUS, G. C.; JESUS, A. R.; MEDEIROS, M. H. F. Aplicação de solução comercial alcalina para realcalinização química de concretos carbonatados. **2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, 2017, Curitiba. v. 1. p. 117-128.

#### 7.3.2 Outros artigos

PONTES, C. V.; RÉUS, G. C.; CALVO, A.; MEDEIROS, M. H. F. Procedimento para detectar a penetração de cloretos com nitrato de prata em concreto carbonatado. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 76 - 88, 2021.

PONTES, C. V.; RÉUS, G. C.; ARAÚJO, E. C.; MEDEIROS, M. H. F. Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: How to prevent false positives. **Journal of Building Engineering**. 2021.

ROCHA, T. M. S.; MENDES, S. E. S.; RÉUS, G. C.; COELHO JUNIOR, G.; PARCHEN, C. F. A.; MIRANDA, L. F. R. Aditivos químicos em compósitos de gesso-madeira pré-tratados ou não com suspensão de hidróxido de cálcio. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 8, p. 8, 2020.

CAPRARO, A. P. B.; PAULA, P. A. A.; SAILVA, R. F.; RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Estudo da previsão da vida útil de uma estrutura em concreto armado: iniciação da corrosão por carbonatação. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 6, n. 2, p. 53-68, dez. 2019. ISSN 2358-6508.

CAMPOS, H. F. ; ROCHA, T. M. S. ; RÉUS, G. C.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, p. 210-232, 2019.

GODINHO, J. P.; OLIVEIRA, R. L. N.; CAPRARO, A. P. B.; RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Influência das condições de limpeza de barras de aço carbono do concreto armado nas leituras eletroquímicas de densidade de corrente de corrosão e potencial de corrosão. **3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado**, 2018, São Carlos.

GODINHO, J. P.; OLIVEIRA, R. L. N.; CAPRARO, A. P. B.; RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Influência da idade de cura do concreto e das dimensões dos corpos de prova na velocidade de pulso ultrassônico, resistividade elétrica e resistência à compressão axial. **Revista técnico científica do CREA-PR**, v.1, 2018. ISSN 2358-5420.

ESTEVES, I. C. A.; HINO-JÚNIOR, J. R.; RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Influência do consumo de cimento na dosagem do concreto sobre a formação da película passivadora do aço. **Revista técnico científica do CREA-PR**, 2018, Curitiba, 2018. v. 1. ISSN 2358-5420.

MEDEIROS, M. H. F.; RÉUS, G. C.; PONTES, C. V. Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica. **Revista técnico científica do CREA-PR**, 2018, Curitiba, 2018. v. 1. ISSN 2358-5420.

GODINHO, J. P.; OLIVEIRA, R. L. N.; CAPRARO, A. P. B.; RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Influência do formato dos corpos de prova e da idade de cura nas leituras de velocidade de ultrassom, resistividade elétrica e resistência à compressão axial. **3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, 2018, Curitiba. v. 1.

p. 116-129.

ESTEVEES, I. C. A.; HINO-JÚNIOR, J. R.; RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Influência do consumo de cimento na dosagem do concreto sobre a formação da película passivadora do aço. **3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, 2018, Curitiba, 2018. v. 1. p. 143-155.

MEDEIROS, M. H. F.; RÉUS, G. C.; PONTES, C. V. Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica. **3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, 2018, Curitiba, 2018. v. 1. p. 186-197.

DOS SANTOS, C. A.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; RÉUS, G. C. Effects of the addition of red ceramic, limestone filler and rice husk ash in alkali silica reaction. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 3, p. 1-11, 2018.

RÉUS, G. C.; DITZEL, L. F. S.; MEDEIROS, M. H. F. Efeito do metacaulim na carbonatação natural: avaliação com modelos de previsão de vida útil. **Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas**, 2017, Recife. Anais da Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas, 2017. v. 1. p. 1-13.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE-GUERRERO, A. M.; GUTIÉRREZ, R. M. Efficiency of electrochemical realkalisation treatment on reinforced blended concrete using ftir and tga. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 518–528, 2018. Citado na página 17.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; ARGIZ, C.; MALRIC, B. Na<sub>2</sub>PO<sub>3</sub>F as inhibitor of corroding reinforcement in carbonated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 3, p. 405–415, 1996. ISSN 00088846. Citado na página 82.

ANDRADE, C. Calibration by gravimetric losses of electrochemical corrosion rate measurement using modulated confinement of the current. **Materials and Structures**, n. 283, p. 833–841, 2005. ISSN 1359-5997. Citado 3 vezes nas páginas 80, 81 e 82.

ANDRADE, C.; ALONSO, C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. **Materials and Structures**, v. 37, n. 9, p. 623–643, 2004. ISSN 1359-5997. Citado na página 82.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; MOLINA, F. J. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part i-experimental test. **Materials and Structures**, v. 26, p. 453–464, 1993. Citado 6 vezes nas páginas 10, 87, 88, 89, 91 e 92.

ANDRADE, J. **Estudo das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado no Estado de Pernambuco**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 88.

ARAÚJO, F.; FIGUEIREDO, E.; JR., H. A.; CARVALHO, M. Realcalinização do concreto carbonatado através da penetração de solução alcalina. **VIII Congresso Latinoamericano de Patologia de la Construcción – X Congresso de Control de Calidad en la Construcción – CONPAT**, 2005. Citado na página 29.

ARAÚJO, F.; MELO NETO, A.; HELENE, P. Estudo da repassivação das armaduras em concretos carbonatados através da realcalinização química com solução de hidróxido de potássio. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 3, p. 110–118, 2017. Citado 7 vezes nas páginas 29, 31, 36, 38, 39, 44 e 60.

ARAUJO, F. W. C. **Contribuição à viabilização da técnica de realcalinização do concreto carbonatado através da absorção/difusão de soluções alcalinas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2004. Citado 11 vezes nas páginas 25, 29, 31, 32, 36, 37, 38, 39, 44, 60 e 76.

ARAÚJO, F. W. C. **Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química**. Tese (doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado 11 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30, 31, 32, 36, 37, 38, 39 e 48.

ARAÚJO, F. W. C.; FIGUEIREDO, E.; HELENE, P. Contribuição para a viabilização da técnica de realcalinização do concreto carbonatado: repassivação da armadura? **Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2007**, p. 1–15, 2007. Citado 7 vezes nas páginas 29, 31, 36, 38, 39, 44 e 76.

ARAÚJO, F. W. C.; FIGUEIREDO, E.; SÁ, R. R.; HELENE, P. Efeitos da aderência de argamassas industrializadas, tintas e vernizes em substratos realcalinizados. **Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional**, p. 1–15, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 29, 31, 36, 44 e 60.

ARAÚJO, F. W. C.; HELENE, P. Estudo da repassivação das armaduras em concretos carbonatados através da realcalinização química com solução saturada de hidróxido de cálcio. **Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2011**, v. 1, p. 1–15, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 29, 31, 36, 38 e 39.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - determinação da massa. Rio de Janeiro, 2001. Citado na página 42.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. Citado na página 50.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico. 2007. Citado 3 vezes nas páginas 46, 50 e 59.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - especificação. 2009. Citado na página 40.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: NBR 12653: Materiais pozolânicos - requisitos. Rio de Janeiro, 2014a. Citado na página 34.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro, 2014b. Citado 2 vezes nas páginas 90 e 91.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: NBR 16697: Cimento portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018. Citado na página 35.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. Citado na página 40.

ASTM. **ASTM D4972 - Standard test method for ph of soils**. 2013. Citado na página 64.

ASTM. **ASTM C876 - Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. 2015. Citado na página 83.

ASTM. **ASTM G1 - Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens**. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 79.

ATKINS, P.; PAULA, J. **Físico-Química - Vol. 1**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. Citado na página 74.

BALESTRA, C. E. T.; REICHERT, T. A.; PANSERA, W. A.; SAVARIS, G. Chloride profile modeling contemplating the convection zone based on concrete structures present for more than 40 years in different marine aggressive zones. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 345–358, 2019. Citado na página 76.

BALTAZAR, L.; SANTANA, J.; LOPES, B.; CORREIA, J. R. R. M. P. Surface skin protection of concrete with silicate-based impregnations: Influence of the substrate roughness and moisture. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 191–200, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 56.

BAYUAJI, R.; DARMAWAN, M. S.; HUSIN, N. A.; ANUGRAHA, R. B.; BUDIPRIYANTO, A.; STEWART, M. G. Corrosion damage assessment of a reinforced concrete canal structure of power plant after 20 years of exposure in a marine environment: A case study. **Engineering Failure Analysis**, v. 84, p. 287–299, 2018. Citado na página 76.

BEHNOOD, A.; TITTELBOOM, K. V.; BELIE, N. D. Methods for measuring ph in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 176–188, 2016. Citado na página 64.

BERTOLINI, L.; CARSANA, M.; REDAELLI, E. Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation. **Journal of Cultural Heritage**, v. 9, p. 376–388, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 17, 23, 24, 25 e 26.

CAMPIONE, G.; CANNELLA, F. Risk of failure in existing rc balcony and strength verification under degradation phenomena. **Engineering Failure Analysis**, v. 109, 2020. Citado na página 76.

CAMPIONE, G.; GIAMBANCO, G. Influence of design mistakes and material degradation on the collapse of a long-span rc roof in south italy. **Engineering Failure Analysis**, v. 111, 2020. Citado na página 76.

CAPRARO, A. P. B.; MACIOSKI, G.; MEDERIOS, M. H. F. Effect of aggregate contamination with pyrite on reinforcement corrosion in concrete. **Engineering Failure Analysis**, v. 120, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 76 e 86.

CASTRO, J.; BENTZ, D.; WEISS, J. Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 805–813, 2011. Citado na página 27.

CIMENTO, S. N. D. I. D. Relatório anual do sindicato nacional da industria do cimento. 2020. Citado na página 58.

CONTECVET IN30902I. **A validated user's manual for assessing the residual life of concrete structures**. DG Enterprise, 2001. Citado na página 90.

COUTINHO, M. P. **Influência da morfologia da superfície na molhabilidade do titânio comercialmente puro**. Dissertação (mestrado) — Instituto Militar de Engenharia, 2007. Citado na página 49.

DALTIN, D. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.

DONG, Z. H.; SHI, W.; GUO, X. P. Initiation and repassivation of pitting corrosion of carbon steel in carbonated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 53, p. 1322–1330, 2011. Citado na página 86.

ESTEVEES, I. C.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MEDEIROS, M. H. F. Ndt for bridges durability assessment on urban-industrial environment in brazil. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 1, 2018. Citado na página 76.

EUROPEAN PRESTANDARD. **NBR 12653**: Eurocode 2: Design of Concrete Structure. Brussels, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 89.

FELIX, E. F. **Modelagem da Deformação do Concreto Armado Devido à Formação dos Produtos de Corrosão**. Dissertação (mestrado) — Universidade de São Paulo, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 18, 87 e 88.

FERREIRA, P. R. R.; MEDEIROS, A. F. D.; ARAÚJO, C. C.; GUEDES, L. C. E.; CÂNDIDO, T. G.; MEIRA, G. R. Realcalinização para tratamento de estruturas de concreto armado carbonatadas aplicado em corpos de prova que simulam o concreto. **Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2017**, v. 1, p. 1–18, 2017b. Citado 6 vezes nas páginas 29, 31, 36, 37, 38 e 39.

FERREIRA, P. R. R.; MEIRA, G. R.; BARBOSA, D. C.; CARVALHO, M.; ANDRADE, J. Influência do grau de corrosão das armaduras na eficiência do método de realcalinização para tratamento de estruturas de concreto. **HOLOS**, v. 7, p. 69–80, 2017a. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 76.

FRANZONI, E.; PIGINO, B.; PISTOLESI, C. Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments. **Cement and Concrete Composites**, v. 44, p. 69–76, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 56.

GARCÉS, P.; ANDIÓN, L. G.; VARGA, I.; CATALÁ, G.; ZORNOZA, E. Corrosion of steel reinforcement in structural concrete with carbon material addition. **Corrosion Science**, v. 49, p. 2557–2566, 2007. Citado na página 86.

GHODS, P.; ISGOR, O. B.; MCRAE, G.; MILLER, T. The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier Ltd, v. 31, n. 1, p. 2–11, 2009. ISSN 09589465. Citado na página 86.

GHODS, P.; ISGOR, O. B.; MCRAE, G.; GU, G. P. Electrochemical investigation of chloride-induced depassivation of black steel rebar under simulated service conditions. **Corrosion Science**, v. 52, p. 1649–1659, 2010. Citado na página 86.

GODINHO, J. P.; OLIVEIRA, R. L. N.; CAPRARO, A. P. B.; RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Influência das condições de limpeza de barras de aço carbono do concreto armado nas leituras eletroquímicas de densidade de corrente de corrosão e potencial de corrosão. **3o Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado**, 2018. Citado na página 76.

GOÑI, S.; ANDRADE, C. Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. c, p. 525–539, 1990. Citado na página 82.

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**, v. 6, p. 6332–6349, 2011. Citado na página 17.

GONZÁLEZ, J.; FELIU, S.; RODRIGUEZ, P.; RAMIREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete Part I: when, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures / Matériaux et Constructions**, v. 29, n. 1, p. 40–46, 1996. Citado na página 82.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: Isaia, G. C., Ed. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2017. Citado na página 16.

HELENE, P. R. L. **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1ª. ed. São Paulo: Multipla, 2003. 718 p. Citado na página 16.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 247 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado na página 23.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (parte i): índice de atividade pozolânica (iap) com cal, difração de raios-x (drx), termogravimetria (tg/dtg) e chapelle modificado. **Matéria**, v. 22, p. 1–18, 2017a. Citado na página 35.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; TANAKA, R. S.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (parte ii): índice de atividade pozolânica com cimento portland (iap), difração de raios-x (drx) e termogravimetria (tg/dtg). **Matéria**, v. 22, p. 1–19, 2017b. Citado na página 35.

HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ISAIA, G. C. Highvolume fly ash concrete with and without hydrated lime: Chloride diffusion coefficient from accelerated test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, p. 411–418, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

HOPPE FILHO, J.; RODRIGUES, C. S.; RIBEIRO, L. S. O. P.; MEDEIROS, M. H. F. Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of portland cement pastes. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, 2021. Citado na página 63.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil. **Relatório de Pesquisa**. Brasília, 2012. Citado na página 16.

IROH, J.; SU, W. Corrosion performance of polypyrrole coating applied to low carbon steel by an electrochemical process. **Electrochimica Acta**, v. 46, p. 15–24, 2000. Citado na página 86.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, v. 4, p. 19–30, 2004. Citado na página 58.

KAGI, D. A.; REN, K. B. Surface skin protection of concrete with silicate-based impregnations: Influence of the substrate roughness and moisture. **Building and Environment**, v. 35, p. 237–243, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 56.

KIRCHHEIM, A. P.; RHEINHEIMER, V.; DAL MOLIN, D. C. Comparative study of white and ordinary concretes with respect of carbonation and water absorption. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 84, p. 320–330, 2015. ISSN 09500618. Citado na página 35.

KMET, S.; TOMKO, M.; SOLTYS, R.; ROVNAK, M.; DEMJAN, I. Complex failure analysis of a cable-roofed stadium structure based on diagnostics and tests. **Engineering failure analysis**, v. 103, p. 443–461, 2019. Citado na página 76.

KROPP, J.; HILSDORF, H. K. Report 12: Performance criteria for concrete durability. **RILEM**, 1995. Citado na página 27.

KUNTAL, V. S.; JIRADILOK, P.; BOLANDER, J. E.; NAGAI, K. Estimating corrosion levels along confined steel bars in concrete using surface crack measurements and mesoscale simulations guided by model predictive control. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, 2021. Citado na página 88.

LEVY, E. **Diccionario de Física**. 1. ed. Madrid: AKAL, 1992. Citado na página 49.

LUN, P. Y.; LU, Z. H.; ZHANG, X.; ZHANG, Q. G.; ZHAO, R. Experimental study and suggested mathematical model for chloride-induced reinforcement corrosion rate. **Structures**, v. 34, p. 2014–2029, 2021. Citado na página 88.

MACIEL, M. H.; SOARES, G. S.; ROMANO, R. C. O.; CINCOTTO, M. A. Monitoring of portland cement chemical reaction and quantification of the hydrated products by xrd and tg in function of the stoppage hydration technique. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, p. 1–16, 2018. Citado na página 63.

MARTINEZ, I.; ROZAS, F.; RAMOS-CILLAN, S.; GONZÁLEZ, M.; CASTELLOTE, M. Chloride electroremediation in reinforced structures: preliminary electrochemical tests to detect the steel repassivation during the treatment. **Electrochimica Acta**, v. 181, p. 288–300, 2015. Citado na página 86.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; YAZIGI, R.; MEDEIROS, M. H. F. Carbonation depth in 57 years old concrete structures. **Steel and Composite Structures**, v. 19, p. 953–966, 2015. Citado na página 76.

MEDEIROS, M. H. F.; BALBINOT, G.; HELENE, P. R. L. Inspeção em prédios no rio de janeiro: corrosão em pilares. **Concreto e Construção**, v. 57, p. 58–66, 2010. Citado na página 83.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; RÉUS, G. C.; HELENE, P. Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 452–457, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 76.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Inspection and rehabilitation of the marquee of the ibirapuera park in brazil. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, p. 6–21, 2021. Citado na página 76.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. **Materials and Structures**, v. 41, p. 59–71, 2008. Citado na página 27.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. L. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. **Construction Building Materials**, v. 23, p. 1476–1484, 2009. Citado na página 27.

MEDEIROS, M. H. F.; KNUUTILA, M.; HELENE, P. Inspection of buildings in rio de janeiro-brazil: Proving the greater tendency of corrosion at the base of reinforced concrete columns using potential corrosion technique. **American Journal of Engineering Research (AJER)**, v. 2, p. 102–112, 2013. Citado na página 83.

MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P. Tratamento de superfície com silicato de sódio para concreto: penetração de cloretos e absorção de água. **Revista Alconpat**, v. 2, p. 149–161, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 33, 56 e 76.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído (Online)**, v. 17, p. 125–139, 2017b. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 67.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Partial replacement and addition of fly ash in portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 2, p. 1–9, 2017a. Citado 4 vezes nas páginas 34, 35, 67 e 83.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 669 p. ISBN 978-85-98576-12-1. Citado na página 64.

MILLER, S. A.; A., H.; MONTEIRO, P. J. M. Readily implementable techniques can cut annual co2 emissions from the production of concrete by over 20%. **Enviroental Research**, v. 11, 2016. Citado na página 16.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. **Nature Sustainability**, v. 1, 2018. Citado na página 16.

MILLER, S. A.; MOORE, F. C. Climate and health damages from global concrete production. **Nature Climate Change**, v. 10, 2020. Citado na página 16.

MONTEIRO, N. B. R.; MOITA NETO, J. M.; SILVA, E. A. Environmental assessment in concrete industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, 2021. Citado na página 16.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v. 16, 2017. Citado na página 16.

MOREIRA, C. **Realcalinização de estruturas de concreto carbonatado com utilização de gel saturado de solução alcalina**. 122 p. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 31.

NAHALI, H.; DHOUIBI; IDRISSE, H. L. Effect of phosphate based inhibitor on the threshold chloride to initiate steel corrosion in saturated hydroxide solution. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 87–94, 2014. Citado na página 86.

- NISAR, N.; BHAT, J. A. Effect of rice husk ash on the carbonation depth of concrete under different curing ages and humidity levels. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, 2021. Citado na página 67.
- ORTOLAN, V. K.; MANCIO, M.; TUTIKIAN, B. F. Evaluation of the influence of the ph of concrete pore solution on the corrosion resistance of steel reinforcement. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, p. 1–10, 2016. Citado na página 82.
- PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 291–299, 2000. Citado na página 67.
- PAULETTI, C. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição. 2009. Citado na página 45.
- PERIN, P.; MANTOVANI, R. **Contribuição ao estudo da realcalinização química em concreto convencional**. 2017. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Citado na página 29.
- PIATRA, W. Analysis of carbonate and sulphate attack on concrete structures. **Engineering Failure Analysis**, v. 79, p. 606–614, 2017. Citado na página 76.
- POSSAN., E.; RIGO, E.; FELIX, E. F.; BERWANGER, C.; BRANT, C. A. Protection of interrupted concrete structure to prevent degradation: a case study. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 5, 2020. Citado na página 76.
- POURSAEE, A.; HANSSON, C. M. Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 250, n. August 2006, p. 1127–1133, 2007. Citado na página 82.
- PU, Q.; JIANG, L.; XU, J.; CHU, H.; XU, Y.; ZHANG, Y. Evolution of ph and chemical composition of pore solution in carbonated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 519–524, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 65.
- RADONJANIN, V.; MALESEV, M.; MARINKOVIC, S.; MALT, A. E. S. A. Green recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1503–1511, 2013. Citado na página 16.
- RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2015. Citado na página 45.
- RASANEN, V.; PENTTALA, V. The ph measurement of concrete and smoothing mortar using a concrete powder suspension. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 813–820, 2004. Citado na página 64.
- REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Electrochemical repair techniques in carbonated concrete. part i: Electrochemical realkalisation. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 41, p. 817–827, 2011. Citado na página 17.

RÉUS, G. C. **Realcalinização química como meio de recuperação de estruturas de concreto armado carbonatadas**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2017. Citado 13 vezes nas páginas 18, 27, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 42, 44, 48, 58 e 60.

RÉUS, G. C.; BECKER, A. C. C.; RAISDORFER, J.; SOUZA, D. J.; CEZARIO, H.; LENCZUK, B. S. T.; RODRIGUES, D. S.; MEDEIROS, M. H. F. Aplicação de soluções alcalinas para realcalinização de concretos carbonatados: uma alternativa para pontes de concreto armado. **Anais do 18º ENACOR - Encontro nacional de conservação rodoviária**, 2015b. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 32 e 48.

RÉUS, G. C.; JESUS, A. R.; MEDEIROS, M. H. F. Aplicação de soluções comercial alcalina para realcalinização química de concretos carbonatados. **Simpósio paranaense de patologia das construções (SPPC)**, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 36.

RÉUS, G. C.; JESUS, A. R.; MEDEIROS, M. H. F. Aplicação de soluções comercial alcalina para realcalinização química de concretos carbonatados. **Revista técnico-científica do CREA-PR**, v. 1, p. 1–13, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 36.

RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. Chemical realkalization for carbonated concrete treatment: Alkaline solutions and application methods. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020. Citado 15 vezes nas páginas 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 44, 52, 60, 65 e 80.

RÉUS, G. C.; SOUZA, D. J.; BECKER, A. C. C.; RAISDORFER, J.; MEDEIROS, M. H. F. Aplicação de soluções alcalinas para realcalinização de concretos carbonatados. **Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2015**, p. 1–15, 2015a. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 32 e 48.

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**, v. 40, p. 280–290, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 17, 83 e 86.

RILEM. Cpc-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. **RéUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX**, 1988. Citado na página 45.

ROMANO, P.; BRITO, P.; RODRIGUES, L. Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 827–832, 2013. Citado na página 83.

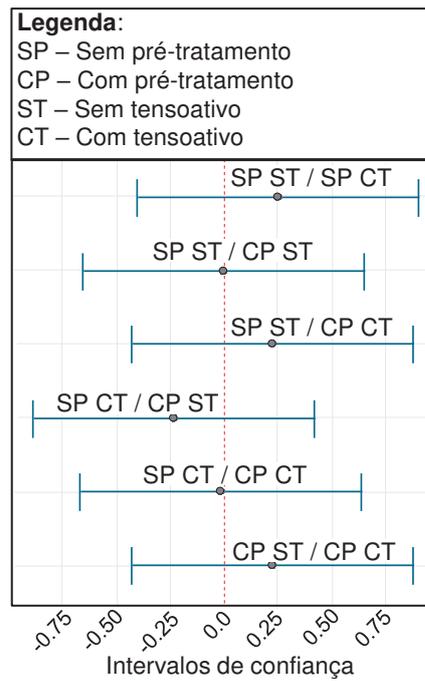
SÁ, R. R. de. **Influência da realcalinização por meio de absorção/difusão de soluções alcalinas na resistência a compressão do concreto, na aderência de tintas e vernizes e na repassivação das armaduras**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2006. Citado 10 vezes nas páginas 29, 31, 32, 36, 37, 38, 39, 44, 60 e 76.

SAMPAIO, J. A. **Caracterização de fibras de celulose recobertas por plasma**. 2013. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Citado na página 49.

- SCHUTTER, G.; AUDENAERT, K. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. **Materials and Structures**, v. 37, p. 591–596, 2004. Citado na página 27.
- SHAH, B.; S., B. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 219–232, 2018. Citado na página 35.
- SOLA, E.; OZBOLT, J.; BALABANI, G.; MIR, Z. Experimental and numerical study of accelerated corrosion of steel reinforcement in concrete: Transport of corrosion products. **Cement and Concrete Research**, v. 120, p. 119–131, 2019. Citado na página 88.
- SUN, X.; ZUO, X.; YIN, G.; JIANG, K.; TANG, Y. J. Electrochemical and microscopic investigation on passive behavior of ductile iron in simulated cement-mortar pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 703–713, 2017. Citado na página 86.
- THOMPSON, J.; SILSBEE, M.; GILL, P.; SCHEETZ, B. Characterization of silicate sealers on concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 1561–1567, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 56.
- 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**, v. 42, p. 84–94, 2012. Citado na página 17.
- TUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, p. 1–469, 1982. Citado na página 33.
- WILLIAMSON, J.; ISGOR, O. The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel bar. **Corrosion Science**, v. 106, p. 82–95, 2016. Citado na página 86.
- WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. Citado na página 23.
- YEIH, W.; JIANG, J. C. A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 516–524, 2005. ISSN 09500618. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- ZHANG, D.; SHAO, Y. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 516–526, 2016. Citado na página 36.
- ZHANG, Y. M.; SUN, W.; YAN, H. D. Hydration of high-volume fly ash cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 445–452, 2003. Citado na página 35.

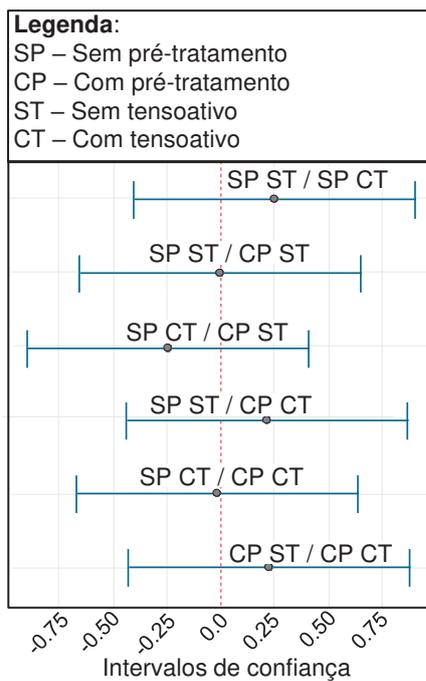
## APÊNDICE A – TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO COM KOH

Teste Tukey com 95% de confiança para o coeficiente de realcalinização das amostras do capítulo 4 realcalinizadas com hidróxido de potássio.



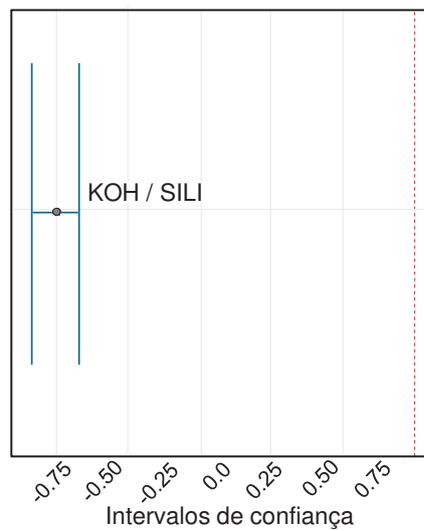
## APÊNDICE B – TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO COM SILICATO DE SÓDIO ALCALINO

Teste Tukey com 95% de confiança para o coeficiente de realcalinização das amostras do capítulo 4 realcalinizadas com silicato de sódio alcalino.



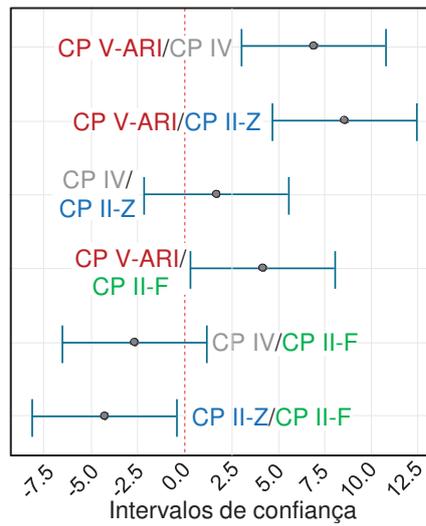
## APÊNDICE C – TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO COM KOH E SILICATO DE SÓDIO ALCALINO

Teste Tukey com 95% de confiança para o coeficiente de realcalinização das amostras do capítulo 4 realcalinizadas com hidróxido de potássio e silicato de sódio alcalino.



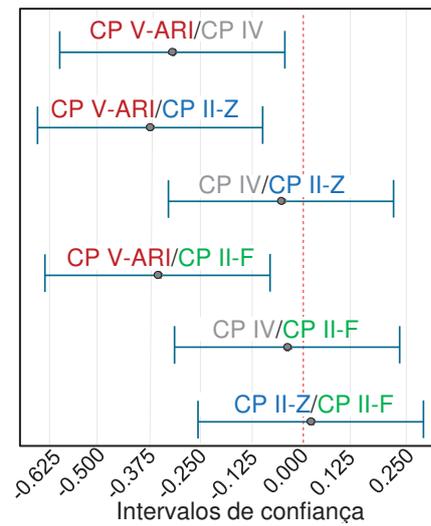
## APÊNDICE D – TESTE TUKEY PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Teste Tukey com 95% de confiança da resistência à compressão das amostras de concreto do capítulo 5 com 28 dias de cura.



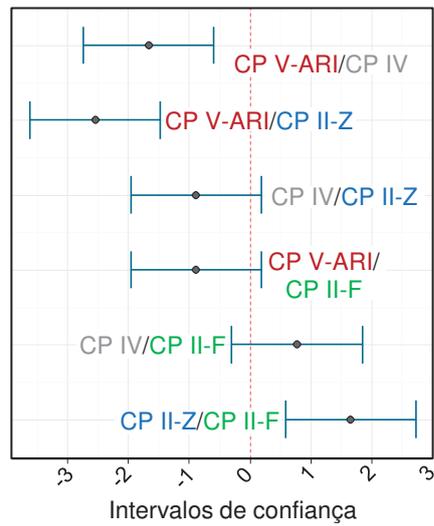
## APÊNDICE E – TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE CARBONATAÇÃO

Teste Tukey com 95% de confiança para o coeficiente de carbonatação em amostras de concreto do capítulo 5.



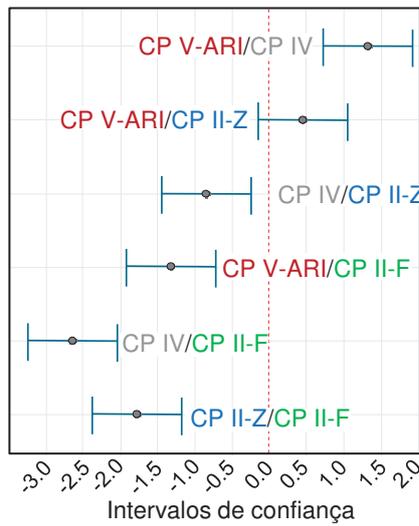
## APÊNDICE F – TESTE TUKEY PARA O COEFICIENTE DE REALCALINIZAÇÃO

Teste Tukey com 95% de confiança para o coeficiente de realcalinização em amostras de concreto do capítulo 5.



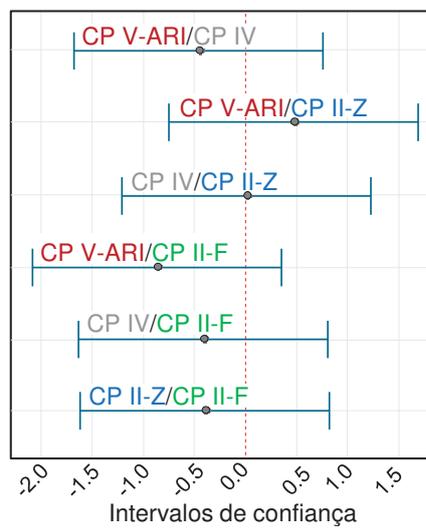
## APÊNDICE G – TESTE TUKEY PARA A POROSIDADE APARENTE

Teste Tukey com 95% de confiança para a porosidade aparente das amostras de pasta de cimento do capítulo 5.



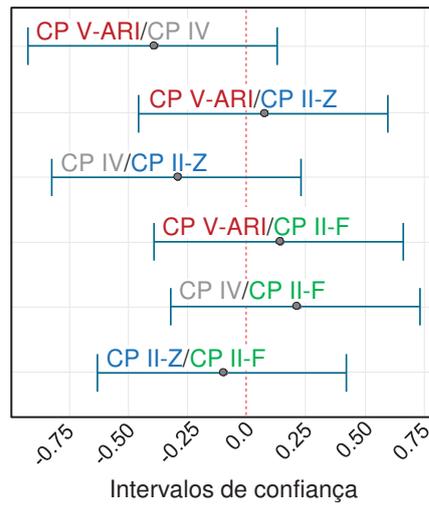
## APÊNDICE H – TESTE TUKEY PARA O PH DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA

Teste Tukey com 95% de confiança para o pH das amostras de referência de pasta de cimento do capítulo 5.



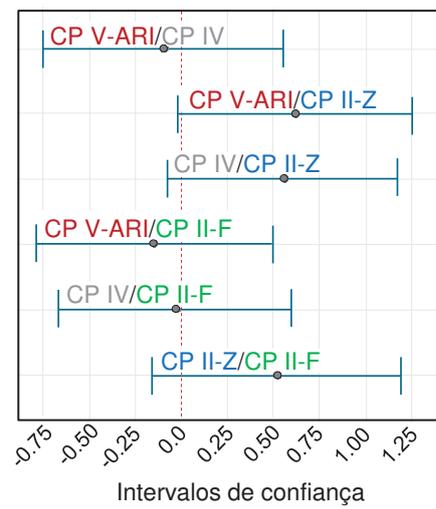
## APÊNDICE I – TESTE TUKEY PARA O PH DAS AMOSTRAS CARBONATADAS

Teste Tukey com 95% de confiança para o pH das amostras carbonatadas de pasta de cimento do capítulo 5.



## APÊNDICE J – TESTE TUKEY PARA O PH DAS AMOSTRAS REALCALINIZADAS

Teste Tukey com 95% de confiança para o pH das amostras realcalinizadas de pasta de cimento do capítulo 5.



## APÊNDICE K – TESTE TUKEY PARA O PH DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA, CARBONATADAS E REALCALINIZADAS

Teste Tukey com 95% de confiança para o pH das amostras de referência, carbonatadas e realcalinizadas de pasta de cimento do capítulo 5.

