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

PRISCILA OLIVEIRA LACHOVICZ

INFLUÊNCIA DO TIPO MALHA METÁLICA E DO TIPO DE ARGAMASSA NA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO CARBONATADO

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2020

PRISCILA OLIVEIRA LACHOVICZ

INFLUÊNCIA DO TIPO MALHA METÁLICA E DO TIPO DE ARGAMASSA NA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO CARBONATADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Materiais e Componentes da Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção de título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Matoski.
Coorientador: Prof. Dr. Wellington Mazer.

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Lachovicz, Priscila Oliveira
Influência do tipo malha metálica e do tipo de argamassa na realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto carbonatado [recurso eletrônico] / Priscila Oliveira Lachovicz. -- 2020.
1 arquivo texto (117 f.): PDF; 2,93 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.
Título extraído da tela de título (visualizado em 24 set. 2020).
Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.
Bibliografia: f. 104-115.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Argamassa - Confiabilidade. 3. Concreto - Corrosão. 4. Análise eletroquímica. I. Matoski, Adalberto, orient. II. Mazer, Wellington, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere – CRB 9/1271
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira

FOLHA DE APROVAÇÃO

A Dissertação de Mestrado intitulada INFLUÊNCIA DO TIPO MALHA METÁLICA E DO TIPO DE ARGAMASSA NA REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO CARBONATADO, defendida em sessão pública pela candidata **Priscila Oliveira Lachovicz**, no dia 26 de junho de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes da Construção Civil, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela banca examinadora formada pelos professores:

BANCA EXAMINADORA:

Professor Dr. Adalberto Matoski (Presidente) – UTFPR
Professor Dr. Arthur Medeiros – UTFPR
Professor Dr. José Marques Filho – UFPR

Curitiba (PR) 25 de junho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre iluminou e abençoou o meu caminho para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço minha família, principalmente aos meus pais, que sempre sonharam com o título de mestre junto comigo e não mediram esforços para me ajudar sempre que precisei, além de sempre me apoiarem para que eu finalizasse esta fase.

Agradeço ao meu noivo, Marlon, que me ajudou desde a entrada no programa até a finalização, me acompanhou diversas vezes na universidade e me ajudou com os experimentos, além de me dar apoio em todas as etapas da minha vida.

Aos meus amigos, que estiveram comigo acompanhando meu esforço, sempre me ajudaram e apoiaram, eu expresso minha tamanha gratidão.

Agradeço imensamente a UTFPR por proporcionar este sonho, aos professores que me auxiliaram, principalmente o professor, meu coorientador, Dr. Wellington Mazer, que me ajudou em todas as etapas experimentais e laboratoriais e ao professor orientador Dr. Adalberto Matoski por toda a dedicação e auxílio durante o programa.

Também agradeço aos professores que participaram das bancas, que dedicaram parte do seu tempo para avaliar meu trabalho e contribuir com críticas construtivas para o meu crescimento.

RESUMO

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

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise da influência da malha metálica e do tipo de argamassa na eficiência do processo de realcalinização eletroquímica. A realcalinização eletroquímica é um método não destrutivo realizado em estruturas de concreto armado que apresentam corrosão nas armaduras, ocasionadas pela carbonatação do concreto. Quando uma estrutura de concreto armado é afetada pelo fenômeno da carbonatação, o pH do concreto diminui para aproximadamente 8, enquanto seus valores normais variam entre 12,5 e 13,5 (pH básico). A diminuição do pH do concreto armado, com o passar do tempo, pode ocasionar dano na película passivadora existente entre o concreto e o aço, e, como consequência, pode desencadear a corrosão das armaduras. A realcalinização eletroquímica é uma técnica utilizada que objetiva o aumento do pH do concreto e a repassivação da armadura. Na técnica ocorrem reações de oxigênio e hidrogênio formando íons de hidroxila na superfície do aço o que permite o aumento do pH e a repassivação do aço. Apesar de ser um método efetivo, poucos estudos na área foram realizados, se tratando de um método com necessidade de aprimoramento. Para tanto, neste trabalho foi realizado uma análise no processo de realcalinização eletroquímica, testando outras variáveis no processo. Sendo assim, foram utilizados corpos de prova de 5 cm x 10 cm, confeccionados em dois traços diferentes sendo argamassados de alto desempenho e autoadensáveis, estes foram submetidos a uma câmera de carbonatação acelerada por um período de um ano e quatro meses. Após este período de exposição foi realizada a verificação da profundidade de carbonatação realizando o rompimento diametralmente dos corpos de prova e aspergindo uma solução de indicador de pH fenolftaleína. Os corpos de prova argamassados de traço autoadensável tiveram uma profundidade de carbonatação média de 3,14 mm e os de alto desempenho não apresentaram carbonatação. A técnica foi aplicada somente nos corpos de prova carbonatados (autoadensáveis), utilizando as malhas metálicas de aço inox, aço galvanizado e de alumínio, solução alcalina de carbonato de sódio, corrente de 1A/m² em um período de 7 dias de duração. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, absorção por capilaridade e porosimetria por intrusão de mercúrio. A absorção e porosimetria identificaram um aumento no percentual de porcentagem nas amostras realcalinizadas e uma diminuição nas carbonatadas, estando conforme o descrito pela literatura. A utilização das malhas de aço inox e de alumínio apresentaram aumento no pH das amostras e aumento na porosimetria nas amostras realcalinizadas, sendo a de aço inox a maior porcentagem observada, as de aço galvanizado não apresentaram aumento no pH nem aumento da porcentagem de porosidade.

Palavras-chave: Manifestações Patológicas, Carbonatação no Concreto, Corrosão nas Armaduras, Realcalinização Eletroquímica.

ABSTRACT

LACHOVICZ, Priscila Oliveira. **Influence of metal mesh and mortar type on the electrochemical realcalinization of carbonated concrete structures**. 2020. 119 f. Dissertation (Master in Civil Engineering). Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, Parana.

The objective of this work was to carry out an analysis of the influence of the metallic mesh and the type of mortar on the efficiency of the electrochemical realization process. Electrochemical realcalinization is a non-destructive method performed on reinforced concrete structures that present corrosion in the reinforcement, caused by the carbonation of the concrete. When a reinforced concrete structure is affected by the carbonation phenomenon, the pH of the concrete decreases to approximately 8, while its normal values vary between 12.5 and 13.5 (basic pH). The decrease in the pH of reinforced concrete, over time, can cause damage to the passivating film between the concrete and steel, and, as a consequence, can trigger the corrosion of the reinforcement. Electrochemical realcalinization is a technique used that aims at increasing the pH of the concrete and repassivating the reinforcement. In the technique, reactions of oxygen and hydrogen occur, forming hydroxyl ions on the surface of the steel, which allows an increase in the pH and the steel's passivation. Despite being an effective method, few studies in the area have been carried out, as it is a method in need of improvement. Therefore, in this work an analysis was carried out in the electrochemical realization process, testing other variables in the process. Therefore, specimens of 5 cm x 10 cm were used, made in two different strokes, being mortar of high performance and self-compacting, these were submitted to an accelerated carbonation camera for a period of one year and four months. After this exposure period, the carbonation depth was checked by diametrically breaking the specimens and spraying a phenolphthalein pH indicator solution. The self-compacting mortar specimens had an average carbonation depth of 3.14 mm and the high-performance specimens did not present carbonation. The technique was applied only to carbonated specimens (self-compacting), using stainless steel mesh, galvanized steel and aluminum, alkaline sodium carbonate solution, current of 1A / m² over a period of 7 days. Compressive strength, capillarity absorption and porosimetry by mercury intrusion tests were performed. Absorption and porosimetry identified an increase in the percentage of percentage in realcalinized samples and a decrease in carbonated samples, being as described in the literature. The use of stainless steel and aluminum meshes showed an increase in the pH of the samples and an increase in porosimetry in realcalinized samples, with stainless steel being the highest percentage observed, those of galvanized steel did not show an increase in pH or an increase in the percentage of porosity.

Keywords: Pathological Manifestations, Carbonation in Concrete, Corrosion in Steel, Electrochemical Realkalisation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução conceitual do projeto nas estruturas de concreto armado 21
Figura 2 - Lei de evolução de custos, Lei de Sitter 22
Figura 3 - Propriedades principais do concreto autoadensável 24
Figura 4 – Construção de rampas em concreto auto adensável na Arena Pernambuco 25
Figura 5 – Arquibancadas pré-moldadas em concreto auto adensável 25
Figura 6 – Porosidade na pasta de cimento com alto e baixo teor água/cimento 30
Figura 7 - Esquema da carbonatação no concreto 35
Figura 8 - Indicador de pH fenolftaleína (incolor: carbonatado, ... 37
Figura 9 - Armadura de aço com corrosão localizada 42
Figura 10 - Modelo de corrosão de armaduras no concreto 44
Figura 11 - Esquema corrosão das armaduras 44
Figura 12 - Esquema da realcalinização eletroquímica 47
Figura 13 - Esquema do método da realcalinização eletroquímica..... 48
Figura 14 - Corpos de prova argamassados 50
Figura 15 - Análise da malha de alumínio após o tratamento 52
Figura 16 – Corrosão das armaduras no pilar da Igreja de Santo Antonio 52
Figura 17 – Exemplo da aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica em estrutura real 53
Figura 18 - Fluxograma da pesquisa 56
Figura 19 – Curva granulométrica da sílica ativa 60
Figura 20 - Esquema de montagem das amostras 62
Figura 21 – Esquema de montagem 62
Figura 22 – Malhas utilizadas 63
Figura 23 - Câmara de carbonatação (a) e dispositivo de controle (b) 65
Figura 24 - Corpos de prova moldados 65
Figura 25 - Quantidade de corpos de prova para cada tipo de argamassa 66
Figura 26 – Fonte de transmissão de corrente elétrica contínua 67
Figura 27 - Esquema de montagem do sistema em série 68
Figura 29 - Ensaio de compressão diametral 76
Figura 29 - Teste do pH com fenolftaleína 77
Figura 30 - Comparação da profundidade de carbonatação. Argamassa auto 79

Figura 31 – Demonstração do sistema montado 83
Figura 32 – Malha de alumínio após realcalinização eletroquímica primeiro cp (a), último cp (b) e demais cps (c) 85
Figura 33 - Aspersão de fenolftaleína após a realização da realcalinização eletroquímica com malha de alumínio (comprovação do método pH alcalino) 86
Figura 34 - Corrosão da malha de aço galvanizado 87
Figura 35 - Malha de aço galvanizado após realcalinização eletroquímica primeiro cp (a), último cp (b) e demais cps (c) 87
Figura 36 – Corpo de prova após realcalinização 88
Figura 37 - Coloração amarelada na montagem do sistema 89
Figura 38 - Deposição de sais realcalinização 90
Figura 39 - Malha de aço iox após realcalinização eletroquímica primeiro cp (a), último cp (b) e demais cps (c) 91
Figura 40 - Aumento do pH após realcalinização 91
Figura 41 - Aço após o processo de realcalinização (a), (b) e (c) 92
Figura 42 - Tons de violeta aspersão de fenolftaleína na realcalinização feita com malha alumínio (a), aço galvanizado (b) e aço inox (c) 93
Figura 43 - Classificação dos tons da timolftaleína e fenolftaleína 93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia.....60
Gráfico 2 - Resistência à compressão - Argamassa autoadensável.....71
Gráfico 3 - Resistência à compressão - Argamassa de alta resistência 74
Gráfico 4 – Médias das medições da profundidade de carbonatação argamassa autoadensável.....77
Gráfico 5 – Ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova de argamassa autoadensável.....94
Gráfico 6 – Absorção por capilaridade – argamassa de alta resistência 95
Gráfico 7 – Porosidade total - Intrusão de mercúrio (argamassa autoadensável).....97
Gráfico 8 - Porosidade total - ensaio intrusão de mercúrio (argamassa de alto desempenho).....98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classe de agressividade ambiental 20
Quadro 2 - Principais fatores que ocasionam a carbonatação nas estruturas de concreto armado 36
Quadro 3 - Acidentes com marquises no Brasil 41
Quadro 4 - Probabilidade de corrosão em função da resistividade elétrica do concreto segundo CEB 192 45
Quadro 5 – Compilação de experimentos de realcalinização eletroquímica realizado por diversos 50
Quadro 6 - Boletim de ensaio do cimento (teores químicos) 57
Quadro 7 - Boletim de ensaio do cimento (teores físicos e mecânicos) 57
Quadro 8 - Boletim de ensaio do cimento (teores físicos e mecânicos) 58
Quadro 9 – Traço para argamassa autoadensável 58
Quadro 10 - Traço para argamassa de alto desempenho 59
Quadro 11 - Espessura do cobrimento segundo ABNT NBR 6118/2014 61
Quadro 12 – Médias das medições da câmara de carbonatação acelerada 64
Quadro 13 - ANOVA – Argamassa autoadensável (compressão) 72
Quadro 14 - ANOVA – Argamassa autoadensável (compressão) 72
Quadro 15 - Teste de Tukey análise dos valores médios obtidos nas resistências a compressão argamassa autoadensável 73
Quadro 16 – ANOVA – Argamassa de alta resistência (compressão) 75
Quadro 17 - Teste de Tukey análise dos valores médios obtidos nas resistências a compressão argamassa de alta resistência 75
Quadro 18 – ANOVA – Argamassa autoadensável – (profundidade de carbonatação) 78
Quadro 19 - Teste de Tukey análise das médias da medição dos pontos carbonatos 78
Quadro 20 - Análise da profundidade de carbonatação – Modelo Clássico 80
Quadro 21 - Parâmetros para profundidade de carbonatação Duracrete 81
Quadro 22 - Resultados modelo DURACRETE 82
Quadro 23 - Relação corrente e voltagem alcançada 83
Quadro 24 – Condutividade elétrica dos metais utilizados como ânodo 83
Quadro 25 – Comparativo do custo das malhas metálicas 84

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **13**
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA **15**
1.1.1 Delimitação do tema **15**
1.2 JUSTIFICATIVA **15**
1.3 OBJETIVOS **16**
1.3.1 Objetivo Geral **16**
1.3.2 Objetivos Específicos **16**
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO **17**
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **18**
2.1 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO **18**
2.2 CONCRETO/ARGAMASSA AUTOADENSÁVEL **22**
2.3 CONCRETO/ARGAMASSA DE ALTO DESEMPENHO **27**
2.3.1 Adições minerais **31**
2.4 CARBONATAÇÃO DO CONCRETO/ ARGAMASSA **34**
2.4.1 Modelos de previsão de vida útil – profundidade de carbonatação **37**
2.4.2 Modelo Clássico **38**
2.4.3 Duracrete **38**
2.5 CORROSÃO DAS ARMADURAS **40**
2.6 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA **45**
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL **56**
3.1 VARIÁVEIS DO ESTUDO **57**
3.1.1 Tipo de cimento **57**
3.1.2 Argamassa autoadensável **58**
3.1.3 Argamassa de alto desempenho **59**
3.1.4 Sílica ativa **59**
3.1.5 Areia **60**
3.1.6 Barra de aço **61**
3.1.7 Feltro sintético - geotêxtil **61**
3.1.8 Malha metálica **62**
3.1.9 Solução eletrolítica alcalina **63**
3.1.10 Indicador de pH **64**
3.1.11 Câmara de carbonatação acelerada **64**
3.2 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA **65**
3.3 CARBONATAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA **67**
3.4 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA **67**
3.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES **68**
3.5.1 Resistência à compressão axial **68**
3.5.2 Resistência à compressão diametral **69**
3.5.3 Ensaios de Porosidade **69**
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES **71**
4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL **71**
4.1.1 Argamassa autoadensável **71**
4.1.2 Argamassa de alto desempenho **73**
4.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NOS CPS **76**
4.2.1 Argamassa autoadensável – medição dos pontos **76**
4.2.2 Argamassa de alto desempenho – justificativa e modelo matemático **79**

4.3 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA **82**
4.3.1 Análise das malhas e resultados do processo **84**
4.3.1.1 Malha de alumínio **84**
4.3.2 Caracterização dos tons violeta **92**
4.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE **94**
4.4.1 Argamassa autoadensável **94**
4.4.2 Argamassa de alto desempenho **95**
4.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO POR INTRUSÃO **96**
4.5.1 Argamassa autoadensável **96**
4.5.2 Argamassa de Alto desempenho **98**
5 CONCLUSÕES **100**
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS **102**
REFERÊNCIAS **104**
APÊNDICE A **116**
ANEXO I **117**

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do volume de obras de construção civil em todo o mundo teve como consequência o aumento da atenção aos índices de manifestações patológicas apresentadas nessas edificações. Essas manifestações têm suas causas evidenciadas no momento da construção, motivadas principalmente por dois tipos de falhas: as identificadas na fase do projeto e as ocorridas na fase da execução (CUPERTINO; BRANDSTETTER, 2015).

Além disso o envelhecimento precoce das estruturas e a falta de manutenção também são fatores que corroboram para o surgimento das manifestações patológicas que podem ocasionar a diminuição da vida útil dessas estruturas (POSSAN; DEMOLINER, 2013).

Dentre as diversas manifestações patológicas existentes, destaca-se a carbonatação do concreto (DYER, 2015). Essa manifestação é considerada uma reação entre produtos de hidratação no concreto e o dióxido de carbono presente na atmosfera, que pode deixar a armadura de aço, no concreto armado, vulnerável à outra manifestação patológica, a corrosão (FUSCO, 2008; BAUER; DIAS, 2009; LEEMANN; MORO, 2016; GOYAL et al., 2018).

A corrosão das armaduras no concreto armado pode ser ocasionada por consequência da diminuição da alcalinidade do concreto, pela carbonatação e por meio do ataque de cloretos livres no concreto (CAVALCANTI; CAVALCANTI, 2010).

Foram ocasionadas diversas tragédias no Brasil pela corrosão das armaduras. No ano de 2007, parte da arquibancada do estádio da Fonte Nova, em Salvador, desabou por conta desta manifestação (POSSAN; DEMOLINER, 2013). Em 2019, o desabamento do Edifício Andrea, em Fortaleza, foi causado por manutenções nas corrosões identificadas nos pilares de sustentação do prédio, além de, diversas marquises que entraram em colapso devido a outras anomalias associadas à corrosão (ALBUQUERQUE, 2019).

Esses acidentes ocorrem porque essa manifestação acarreta perda da seção transversal do aço e, consequentemente, a diminuição da resistência da estrutura conforme preconizada em projeto. Caso não seja realizada nenhuma intervenção, com o passar dos anos pode ocorrer o colapso.

A principal intervenção utilizada para o tratamento da corrosão das armaduras é corretiva e destrutiva, onde é realizado a quebra da estrutura de concreto e tratamento ou substituição da região do aço afetada. No entanto, este tratamento pode vir a prejudicar a estrutura (dependendo do impacto gerado na quebra da região afetada), além de gerar resíduos sólidos da construção civil, causando um impacto ambiental.

Dessa forma, percebeu-se a necessidade de estudar técnicas de reparo não destrutivas e preventivas para solucionar a questão da corrosão de armaduras. Técnicas não destrutivas, como a realcalinização química e eletroquímica, estão sendo estudadas para a solução de corrosão ocasionada pela carbonatação, pois possibilitam a repassivação da armadura danificada (REUS et al., 2015).

Mais especificamente, a realcalinização eletroquímica é considerada uma técnica não-destrutiva utilizada para prolongar a vida útil de estruturas armadas com risco de dano devido à corrosão. Essa técnica tem como objetivo possibilitar a proteção do aço contra a corrosão, nos casos de ataque por carbonatação do concreto (GONZÁLEZ et al., 2011).

Para tanto, o método da realcalinização eletroquímica, consiste em envolver a área afetada com manta geotêxtil saturada com solução alcalina e uma malha metálica, para então ser iniciado o procedimento. Deve-se aplicar uma carga elétrica que deve estar entre 0,5 a 1 A/m² com dois polos, sendo o polo negativo conectado na armadura (formando um cátodo) e o polo positivo é interligado na malha (formando um ânodo), pelo período de 6 a 8 dias. Durante este processo o oxigênio é reduzido e as reações criam íons hidroxila (OH-) na superfície do aço, o que possibilita a passivação da armadura e, consequentemente, o aumento do pH do concreto armado (GOYAL et al., 2018).

Apesar de existir modelo para o método, as variáveis como solução alcalina, carga elétrica aplicada, tipo de malha metálica utilizada e tempo de duração do procedimento estão sendo estudadas por alguns pesquisadores.

Um exemplo desses estudos é a variação do tipo de malha metálica utilizada em estudos. Aguirre et al. (2016) utilizaram para o método uma malha metálica de aço galvanizado como ânodo, Goyal et al. (2018) citam que as malhas de titânio e aço são

comuns neste tratamento e Dyer (2015), descreveu que as malhas de liga de alumínio também podem ser utilizadas.

Dentre os estudos realizados não há uma comparação efetiva da eficiência do tipo de ânodo utilizado no processo da realcalinização eletroquímica. Sabe-se que o titânio possui um custo elevado, aumentando assim o custo de todo o sistema de recuperação da estrutura.

Dessa forma, neste trabalho serão utilizados três tipos de malhas metálicas no processo de realcalinização eletroquímica, sendo estas de alumínio, aço inox e aço galvanizado, em dois tipos diferentes de argamassa, a fim de verificar a eficiência do sistema nas diferentes situações que serão expostas, com o objetivo de aprimorar a técnica.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Qual a influência da utilização de três diferentes ânodos aplicadas em corpos de prova de dois tipos de argamassas no processo de realcalinização eletroquímica?

1.1.1 Delimitação do tema

Utilização de malha metálica de alumínio, aço inoxidável e aço galvanizado e corpos de prova confeccionados de argamassas autoadensáveis utilizando cimento CPV ARI RS, areia artificial e aditivo superplastificante e de alto desempenho adicionando sílica ativa no traço.

1.2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que a corrosão da armadura é uma manifestação patológica que pode influenciar na vida útil da estrutura preconizada em projeto, e que a correção desta manifestação ainda é realizada de forma destrutiva, tem-se, consequentemente, nesses reparos o acúmulo de resíduos sólidos, a poluição sonora e os riscos de segurança no trabalho (no que se refere a mão de obra).

Sendo uma técnica de reparo não destrutiva, a realcalinização eletroquímica poderá contribuir para as medidas socioambientais, no que diz respeito aos resíduos

sólidos da construção civil (RSCC) e diminuir a poluição sonora existente nessas situações de reparos.

Além disso, o processo de realcalinização eletroquímica pode ser realizado como forma de manutenção preventiva, gerando economia para a edificação. A importância da manutenção preventiva pode ser comprovada com a Lei de Sitter (SITTER, 1984), ou lei dos cinco, desenvolvida por Sitter, que evidencia que os custos com manutenção evoluem de forma progressiva, sendo que, quando é adiada uma intervenção, a consequência é que o investimento para esta pode significar o aumento dos custos diretos em progressão geométrica de razão 5. Deste modo, quanto antes for realizada a manutenção preventiva, menor o custo com essa intervenção.

Evidencia-se que existem estudos englobando, e, aprimorando a realcalinização eletroquímica como os de Bertolini, Carsana e Redaelli (2008), González et al. (2011), Tong et al. (2012), Ribeiro et al. (2013), Reus et al. (2015), Aguirre et al. (2016), Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018), Goyal et al. (2018).

Deste modo, este trabalho irá colaborar com os estudos já realizados, buscando melhorias nos tratamentos atualmente utilizados nos sentidos tecnológicos, econômicos e socioambientais e de decisão de escolha de solução de reparo.

1.3 OBJETIVOS

Nos itens abaixo serão apresentados o objetivo geral desta pesquisa e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência do tipo de malha metálica e do tipo de argamassa na eficiência do processo de realcalinização eletroquímica, utilizando argamassa autoadensável e de alto desempenho e malhas metálicas de aço inox, aço galvanizado e alumínio.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

i. Avaliar a carbonatação nos corpos de prova para realizar o método da realcalinização eletroquímica;
ii. Avaliar os resultados da realcalinização eletroquímica nos corpos de prova;
iii. Avaliar a integridade das diferentes malhas após o processo de realcalinização eletroquímica;
iv. Comparar a repassivação da armadura nos processos realizados;
v. Analisar a eficiência da realcalinização eletroquímica através de teste com indicador de pH nos dois tipos de argamassa com os três tipos de malha metálica.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em 5 (cinco) capítulos, sendo o atual, Capítulo 1 (um), correspondente aos itens de introdução em que se apresentam o problema da pesquisa, a delimitação e justificativa do tema, e os objetivos que deverão ser alcançados no decorrer do trabalho. O Capítulo 2 (dois) menciona uma revisão bibliográfica de literatura no que se refere ao tema deste trabalho, bem como o estado da arte das mesmas, com os seguintes assuntos abordados: durabilidade das estruturas de concreto armado, manifestações patológicas com ênfase em carbonatação do concreto e corrosão das armaduras e a técnica de reparo por realcalinização eletroquímica. No Capítulo 3 (três), tem se a descrição do programa experimental, realizado com a finalidade de atingir o objetivo geral proposto. Em seguida, no Capítulo 4, serão abordadas as análises dos resultados do programa experimental, realizado conforme as diretrizes citadas no Capítulo 3. Por fim, no Capítulo 5, serão apresentadas as conclusões, sendo essas alinhadas com os resultados obtidos no Capítulo 4 e os objetivos citados no Capítulo 1, juntamente com a indicação para trabalhos futuros. Ainda neste último capítulo, serão realizadas sugestões para trabalhos futuros correlacionados com a área deste trabalho de dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo e nos primórdios de sua utilização a principal característica controlada e levada em conta no seu dimensionamento e dosagem era a resistência a compressão (POSSAN; DEMOLINER, 2013).

Coutinho (1997) definiu o concreto como um material composto pela mistura, proporcional de cimento, areia, brita e água, que eventualmente pode ter em sua composição o acréscimo de aditivos e adições.

Petrucci (1998) conceituou o concreto como um material de construção formado pela mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes e água, o qual deve oferecer condições de plasticidade e trabalhabilidade que facilitem operações como o transporte, manuseio e no concreto endurecido forneça coesão e resistência à compressão.

Neville e Brooks (2013) classificaram o concreto como um material amplo produzido a partir do uso de um meio cimentante, sendo este um produto entre cimento hidráulico e água.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) o traço do concreto composto por cimento, agregados, aditivos e água influenciam nos processos químicos e físicos que interferem na durabilidade das estruturas.

Além dos componentes convencionais o concreto também pode ser constituído de pigmentos, adições minerais, agregados especiais e fibras. A dosagem destes componentes deve ser realizada de tal modo que atenda as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade e as características de lançamento, adensamento, transporte e trabalhabilidade (HELENE; ANDRADE, 2010).

No Brasil, a norma NBR 12655 (ABNT, 2015) define o concreto como:

> Material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água) (ABNT, 2015).

Dessa forma, a utilização de aditivos ou adições minerais no concreto, bem como as proporções utilizadas na mistura, dependem principalmente da definição do uso deste material. Para cada tipo de utilização se tem um traço específico ao uso que deve ser calculado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Tutikian e Helene (2011), no Brasil os métodos de dosagem mais utilizados para definição do traço do concreto são:

> Método de dosagem IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), o método de dosagem INT (Instituto Nacional de Tecnologia), o método de dosagem ITERS (Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul), o método da ABCP (Associação Brasileira do Cimento Portland), o método de Vallete (1949), o método de De Larrard (1990), o método de Helene & Terzian (1992), o método de Alaejos Gutiérrez y Cánovas (1994), o método de Isaia (1995), o método de Berenice Carbonari (1996), o método de Vitervo O'Reilly (1998), o método de Aitcin (1998) e o método de Tutikian (2007), entre outros (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Sendo assim, a partir da dosagem, o concreto pode ser considerado um material durável, porém, quando submetido a falhas no projeto, danos durante a execução dos serviços e ação de agentes agressivos, pode ter como consequência a sua deterioração prematura, afetando a durabilidade e vida útil da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define a durabilidade nas estruturas de concreto como:

> As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil (ABNT, 2014).

Entretanto, pode-se afirmar que o estudo da durabilidade e vida útil das estruturas começa na fase de projeto, onde alguns cuidados como a espessura do cobrimento da armadura, a relação água/cimento, a abertura máxima de fissuras, a composição dos materiais, a dimensão da peça, as condições de exposição desta estrutura, a resistência à compressão, entre outros, devem ser levados em conta, a fim de contribuir para uma maior vida útil da estrutura (VESIKARI, 2014).

Outros fatores como dosagem, lançamento, preparo do concreto, cura, projeto e execução da obra também influenciam na durabilidade e vida útil da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No Reino Unido a norma inglesa *British Standard* 7453, fornece as principais diretrizes sobre a durabilidade das estruturas de concreto e destaca que os principais agentes que podem causar a deterioração e, consequentemente, a diminuição da vida útil determinada em projeto das edificações, são: temperatura, radiação (infravermelha, visível, ultravioleta e térmica), água (tanto no estado sólido quanto nos fluidos), constituintes normais do ar (oxigênio, dióxido de carbono e maresia), contaminantes do ar, congelamento/descongelamento, vento, fatores biológicos (ataques de bactérias, insetos e fungos, roedores e pássaros, plantas e árvores), incompatibilidade química (removedores, solventes, terra contaminada e materiais expansivos) e fatores de uso (desgaste normal da edificação ou abusivo causado pelo usuário) (BRITISH STANDARD, 2015).

Outros fatores como o ataque das águas ácidas, a lixiviação, a expansão por sulfatos (principalmente em ambientes marinhos), a reação álcali-agregado e a agressividade do ambiente são mecanismos preponderantes de deterioração do concreto (FUSCO, 2008).

Segundo a ABNT (2014), NBR 6118, ações como movimentações térmicas, impactos, ações mecânicas e cíclicas, retração e fluência também são fatores corroborantes na durabilidade das estruturas, podendo ocasionar corrosões por carbonatação e cloretos na armadura do concreto armado.

No que se refere a durabilidade das estruturas de concreto, a NBR 6118 no item 6.1, ordena as classes de agressividade ambiental, de acordo com exposições das estruturas às ações físicas e químicas (ABNT, 2014), conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1 - Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana[a,b]	Pequeno
III	Forte	Marinha[a]	Grande
		Industrial[a,b]	
IV	Muito forte	Industrial[a,c]	Elevado
		Respingos de maré	
a* Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).			

b* Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.
c* Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

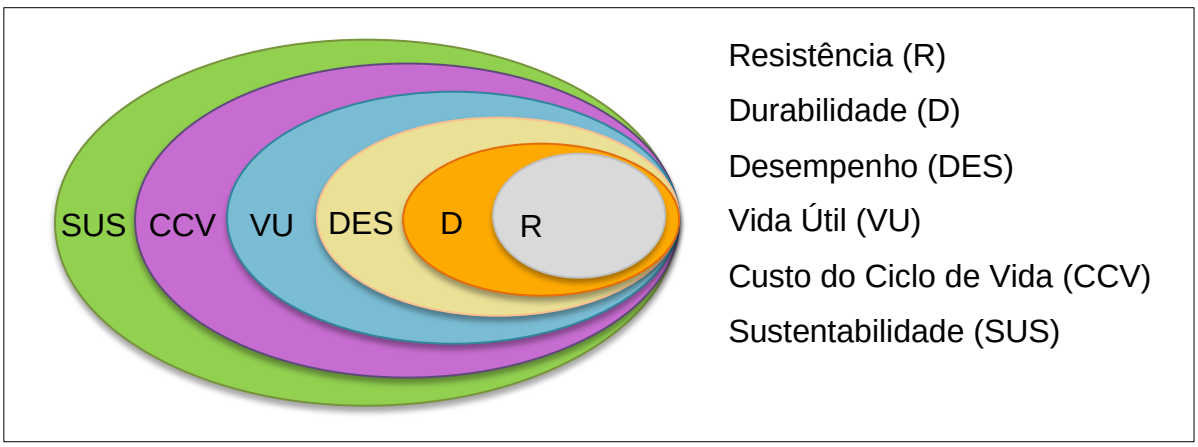
Fonte: (ABNT, 2014).

Portanto pode-se atestar que a deterioração precoce das estruturas de concreto armado afeta a durabilidade e, consequentemente, ocasiona a diminuição da vida útil da estrutura preconizada em projeto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A vida útil das estruturas de concreto pode ser definida, de acordo com a *International Organization for Standardization* 13823 (ISO, 2008) como, "[...] o período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem a requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo". Logo, a partir dos conceitos descritos é possível observar a relação entre a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto.

Segundo Possan (2010), no decorrer dos tempos ocorreram atualizações nas tecnologias dos materiais de construção, nos procedimentos de cálculos das estruturas e mudanças na exposição das estruturas de concreto armado frente a agentes agressivos. Com essas modificações, para elaboração de novos projetos, deve-se pensar na edificação como um todo e não apenas na resistência à compressão, que esta estrutura apresenta. Fatores como a durabilidade, o desempenho, a vida útil, o custo do ciclo de vida e a sustentabilidade das estruturas devem ser levados em conta a fim de garantir a durabilidade e a vida útil da edificação. Esse esquema pode ser observado na Figura 1.

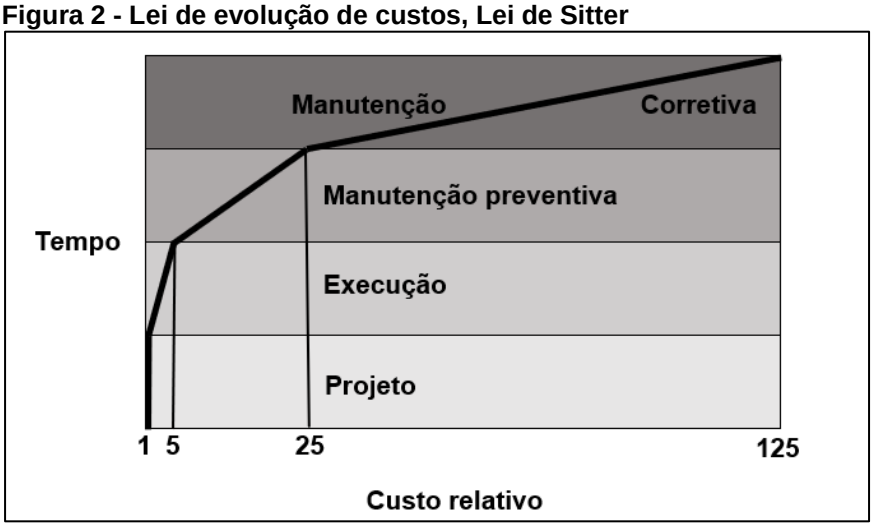
Figura 1 – Evolução conceitual do projeto nas estruturas de concreto armado



Fonte: A autora (2020) adaptado de Possan (2010).

O custo do ciclo de vida se refere aos itens de manutenção, (corretiva e preventiva), diagnóstico e reparo das edificações (POSSAN, 2010). De acordo com a Lei do Sitter, também conhecida como a lei dos cinco, uma manutenção quando realizada preventivamente, pode ter um custo reduzido em até cinco vezes em comparação a manutenção corretiva. Dessa forma é possível observar que os diagnósticos e reparos realizados de forma preventiva, além de diminuir o risco da edificação, também contribui para a economia nesta intervenção, como é possível visualizar na Figura 2 (SITTER, 1994).

Figura 2 - Lei de evolução de custos, Lei de Sitter



Fonte: A autora (2020) adaptado de Sitter (1984).

Portanto, de acordo com Possan (2010) é imprescindível que os critérios resistência, durabilidade, desempenho, vida útil, custo do ciclo de vida e sustentabilidade sejam verificados e aplicados a partir da fase de concepção e projeto de uma edificação de concreto armado. De forma que, esses critérios, juntamente com uma execução seguindo normas, leis e boas práticas construtivas possam colaborar para a durabilidade e a vida útil das estruturas.

2.2 CONCRETO/ARGAMASSA AUTOADENSÁVEL

O estudo do concreto autoadensável foi iniciado em 1983, no Japão, devido à baixa durabilidade nas construções de concreto armado, ocasionadas por falhas na vibração deste material durante a concretagem (OKAMURA, 1997).

Em 1986, Okamura descreveu a importância e a necessidade de um concreto que descartasse ou minimizasse a necessidade da vibração no momento da concretagem e, como consequência, evitasse falhas, corroborando para a durabilidade da estrutura. Deste modo, após a realização de diversas análises foi averiguado que, para o desenvolvimento de um concreto que dispensasse a necessidade de vibração, seria necessário o aprimoramento de uma das propriedades mais importantes do concreto, a trabalhabilidade (OKAMURA; OUCHI, 2003).

No ano de 1988, foi realizado o primeiro protótipo construído de concreto autoadensável, por Okamura. Com essa efetivação o pesquisador entendeu que na produção de concretos e argamassas autoadensáveis, era necessário a adição de aditivos superplastificantes para gerar maior fluidez e trabalhabilidade, além de aditivos modificadores de viscosidade, a fim de aumentar a viscosidade do concreto (TAKADA, 2004; SAVARIS et al., 2019).

A principal função dos aditivos superplastificantes no concreto autoadensável é realizar o controle da consistência no concreto fresco, de modo que não afete outras características do material, tais como quantidade de vazios, o ar incorporado, a pega e a resistência mecânica (RAMACHANDRAN et al., 1998).

Esses aditivos devem ser dispersantes de grande eficiência e os mais indicados para o traço do concreto autoadensável são os de base de policarboxilatos ou poliéster, conhecidos como aditivos de terceira geração, pois estes permitem uma maior dispersão das partículas do cimento na mistura (PONIKIEWSKI; GOLASZEWSKI, 2014; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Além do aditivo superplastificante e modificadores de viscosidade é convencional que no traço do concreto autoadensável se utilize uma maior quantidade de materiais com granulometria finas, para garantir as características evidenciadas no estado fresco e uso de adições especiais (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015; XAVIER, 2018; BERGMANN et al. 2020).

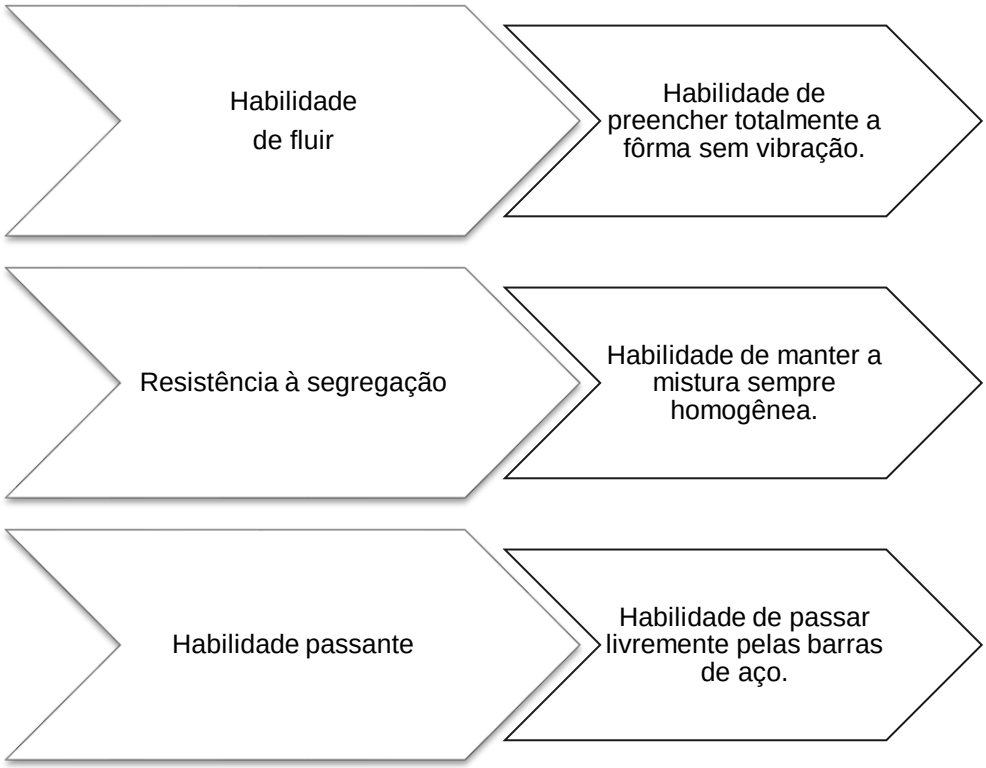
A ABNT (2017), NBR 15823-1 define o concreto autoadensável como:

> Concreto capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

Assim, complementando com a definição da ABNT (2017), NBR 15823-1, entende-se que o concreto autoadensável tem como principal característica preencher as lacunas na concretagem, fluindo uniformemente através da armadura de aço no concreto armado a partir da ação da gravidade, se auto consolidando sem a necessidade de vibração, mantendo a homogeneidade do material sem a segregação dos componentes (RAMPRADHEEP; SIVARAJA, 2016).

De acordo com Manuel (2005) para que um concreto possa ser classificado como autoadensável, é necessário que possua três propriedades principais, que podem ser observadas na Figura 3.

Figura 3 - Propriedades principais do concreto autoadensável



Fonte: A autora (2020) – adaptado de Manuel (2005).

As propriedades e as características do concreto autoadensável fazem com que sua utilização seja diversificada, dentre os usos pode-se destacar a indústria de pré-moldados e pré-fabricados, pontes, edifícios (vigas, pilares e lajes), túneis, barragens, blocos, paredes, caixas de inspeção (esgoto, gordura, pluvial) e tanques de concreto (NUNES, 2001; NUNES et al., 2009; TUTIKIAN et al., 2006; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015; ABNT 2017).

Um exemplo da utilização de concreto auto adensável no Brasil foi a construção do estádio de futebol Arena Pernambuco, em Recife, construído com o objetivo de sediar os jogos da Copa das Confederações em 2013 e a Copa do Mundo de 2014. Na construção cerca de 40% (aproximadamente 23.200 m³) do concreto utilizado era autoadensável. Este material foi utilizado principalmente nos pilares, rampas e paredes moldados *in loco*, demonstrado na Figura 4, e nas arquibancadas construídas com estrutura pré-moldada, conforme observado na Figura 5 (CALADO et al., 2015).

Figura 4 – Construção de rampas em concreto auto adensável na Arena Pernambuco

Fonte: (CALADO et al., 2015).

Figura 5 – Arquibancadas pré-moldadas em concreto auto adensável na Arena Pernambuco

Fonte: (CALADO et al., 2015).

As vantagens da utilização do concreto autoadensável são diversas e com a eliminação da vibração podem ser adquiridos outros benefícios, tais como: melhor

qualidade no concreto, diminuição no custo da concretagem (aumento da velocidade de concretagem, redução de mão de obra, energia e equipamentos), melhoria no acabamento final da estrutura devido a homogeneidade e fluidez desse tipo de concreto (GOODIER, 2003; SONEBI, 2004).

Em relação as obras verticais comparando a utilização do concreto autoadensável com o concreto convencional o autoadensável apresenta uma redução no ruído da obra, uma produtividade melhor, redução na quantidade de mão de obra necessária, porém ainda apresenta um custo maior do que o convencional sendo inviabilizado em algumas situações (COSTA; CABRAL, 2019).

Ademais, a utilização dos vibradores para o concreto, além de ruídos, gera efeitos maléficos para a saúde dos operadores, pelo fato de que o manuseio deste equipamento pode danificar os nervos e vasos sanguíneos, tendo como consequência a síndrome da “vibração da mão”. Com isso, como a aplicação do concreto autoadensável descarta o uso deste equipamento, as vantagens deste uso vão além da durabilidade nas estruturas (NEVILLE, 2011).

Segundo Singh e Singh (2016), quando o concreto autoadensável é utilizado em estruturas de concreto armado, a vida útil dessas estruturas é prolongada, devido ao fato de que a taxa de carbonatação nesses concretos é menor do que nos convencionais, devido a menor porosidade existente e, consequentemente, as taxas de corrosão identificadas são menores.

A dosagem para o traço deste tipo de concreto requer uma menor relação água cimento, comparado ao concreto convencional, para obter uma maior resistência á compressão que é ocasionada devido a uma perfeita integração entre o agregado e a pasta de cimento da mistura (COSTA; CABRAL, 2019).

Os agregados graúdos com formato esféricos são considerados ideais para o uso pois ocasionam um menor atrito interno fazendo com que aumente a fluidez da mistura diminuindo a dificuldade de passar pelo aço (EFNARC, 2005).

As areias naturais são consideradas agregados miúdos com melhor desempenho na mistura do concreto autoadensável isso por possuírem formato dos grãos mais uniformes e arredondados. Outros tipos de areia podem apresentar grãos com diferentes tamanhos e ângulos entre as partículas podendo ocasionar maior

adsorção de água sendo necessário aumento da relação água cimento e aumento da quantidade de adição dos aditivos (REPETTE, 2011).

O controle de qualidade dos agregados deve ser ainda mais rígido no concreto autoadensável do que o concreto convencional, isso pois o volume de agregados miúdo na mistura é aproximadamente 30% (OKAMURA; OUCHI, 2003), sendo menor do que este volume nas misturas de concreto convencional onde correspondem a cerca de 45% até 65% dependendo da dimensão do agregado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para compensar a redução dos agregados na mistura do concreto autoadensável é usual a utilização de adições minerais com partículas menores que 0,125 mm sendo as mais comuns metacaulim, sílica ativa, cinza de casca de arroz e escória de alto forno. Além disso as adições podem diminuir a segregação da mistura pois melhoram a coesão entre as partículas, corroboram para a redução da retração, do consumo de cimento e do calor de hidratação do concreto (EFNARC, 2005; SIMONETTI, 2008; PONIKIEWSKI; GOLASZEWSKI, 2014).

O maior teor de finos no concreto autoadensável juntamente com a redução da porosidade, permeabilidade e coeficiente de difusão de íons de cloro pode ser considerável mais durável que o concreto convencional, comparando essas propriedades no estado endurecido, o que comprova a sua eficiência e viabilidade técnica para o uso (CALADO et al., 2015).

2.3 CONCRETO/ARGAMASSA DE ALTA RESISTÊNCIA

Na década de 50 as estruturas de concreto que atingiam uma resistência à compressão de 35 MPa eram consideradas de alta resistência. Já na década de 70 os registros indicam que os concretos de alta resistência apresentavam resistências à compressão chegavam de até 60 MPa. Em meados dos anos 80 e 90 com a utilização de adições minerais e aditivos as resistências de 100 MPa foram atingidas (DAMAS, 2015).

Os concretos que atingem grandes resistências podem ser classificados como de alta resistência e de alto desempenho, porém essas classificações indicam significados diferentes (BIANCHINI, 2010). O concreto de alta resistência tem como

elemento básico atingir uma alta resistência mecânica, já o concreto de alto desempenho é focado ao desempenho global da peça tendo que apresentar obrigatoriamente alta trabalhabilidade, alta resistência e alta durabilidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

No Brasil não existe uma classificação para os concretos de alto desempenho, somente para os de alta resistência sendo identificado nas normas NBR 8953 e a NBR 6118 a classificação dos concretos em duas classes sendo a classe I os concretos com resistência de 20 até 50 MPa e a classe II sendo os concretos de alta resistência contemplando os valores de 55 até 90 MPa (ABNT 2014; ABNT 2015).

O concreto de alta resistência apresenta as principais propriedades (VELASCO 2002; FREITAS 2005; NEVILLE E BROOKS 2013):

- Alta resistência à compressão (entre 55 a 90 MPa de acordo com a NBR 8953 e NBR 6118);
- Menor permeabilidade;
- Menor fluência;
- Aumento na durabilidade;
- Redução no volume de concreto;
- Fator água/cimento considerado relativamente baixo tendo seu valor máximo limitado a 0,40;
- Alto módulo de elasticidade, podendo atingir até 50 GPa;
- Devido aos aditivos apresentam: ótima fluidez, adensamento e lançamento no concreto fresco;
- Maior cuidado em relação a cura, devido ao baixo fator água/cimento;
- Maior resistência à abrasão (cerca de 10 vezes mais comparado ao concreto convencional.

Em relação a microestrutura os concretos de alta resistência são compostos por três fases sendo a fase do agregado, a pasta de cimento e a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. A zona de transição deste tipo de concreto é considerada resistente e em alguns casos é até imperceptível (BIANCHINI, 2010).

Além das propriedades mencionadas algumas vantagens dentro da engenharia foram observadas algumas vantagens com a utilização do concreto de alta resistência, sendo elas (FREITAS 2005; LEVY 2005):

- Vantagens econômicas: Evidenciado um rápido retorno financeiro pois as peças apresentam alta resistência nas primeiras idades o que possibilita uma diminuição no prazo final do cronograma de obras. Além de proporcionar menores custos pois possibilitam mais opções entre resistência a compressão e o custo da obra;
- Vantagens ambientais: Melhoria no aproveitamento dos recursos ambientais ocasionado devido ao aumento da durabilidade das estruturas causado pelas altas resistências mecânicas verificando uma diminuição no consumo de matérias primas. Diminuição do volume do concreto e consequentemente diminuição do consumo de energia e da emissão de CO_2 para produção, aplicação e transporte do concreto.

Além das vantagens mencionadas pode-se considerar que a principal vantagem e facilidade na utilização do concreto de alta resistência é a possibilidade de redução da dimensão de peças de concreto armado, principalmente os pilares, podendo resultar em ampliação de áreas úteis, melhoria no distribuição de pilares em garagens, diminuição do o peso próprio da estrutura e fundações e redução nas taxas de armadura (GAMA, 2015).

Os materiais utilizados na dosagem do concreto de alta resistência são o cimento, agregados, água, aditivos e adição mineral (BIANCHINI, 2010).

Os cimentos indicados para uso no concreto de alta resistência são os que possuem menor finura, pois quanto mais fino for este componente, maior será o ganho de resistência à compressão. Isso ocorre devido a fase de silicatos entrar em contato com a água de forma mais rápida ocasionando no aumento da resistência (AITCIN, 2000; ALMEIDA, 2005).

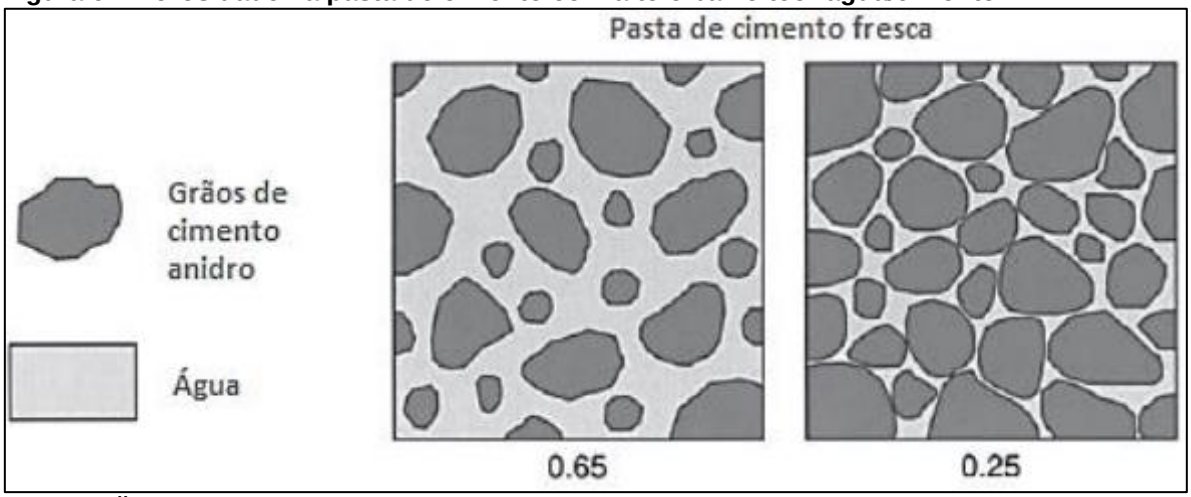
A escolha dos agregados graúdos para obtenção da alta resistência deve ser preferencialmente aqueles que possuem partículas equidimensionais que possam

garantir uma boa aderência entre a pasta de cimento e este agregado (NEVILLE, 2013).

Em relação ao agregado miúdo é indicado a utilização de areias grossas com módulo de finura variando entre 2,7 e 3,2. Isso pois o traço deste concreto já possui alto teor de finos, sendo descartado a necessidade de finos no agregado para melhorar a aderência, além disso as areias com maior módulo de finura precisam de uma menor quantidade de água (está obtida com baixo teor água/cimento da mistura) e as partículas maiores geram tensões de cisalhamento na mistura o que contribui para evitar a floculação dos grãos do cimento (AITICIN, 2000; NEVILLE,2013; MEHTA; MONTEIRO 2014).

A partir da dosagem com a obtenção da pasta e a redução do fator água/cimento na mistura do concreto de alta resistência é consequentemente obtido uma diminuição na porosidade da pasta de cimento hidratada. O resultado desta diminuição faz com que as partículas de cimento fiquem mais perto uma das outras na pasta de cimento, ocasionando uma menor porosidade, podendo ser observada na Figura 6 (AÏTCIN 2000).

Figura 6 – Porosidade na pasta de cimento com alto e baixo teor água/cimento



Fonte: (AÏTCIN 2000).

No entanto, no estudo e desenvolvimento do concreto de alta resistência foi verificado que apenas as misturas usuais para concreto convencional como areia, brita, água e cimento não seriam suficientes para que as peças estruturais apresentassem as altas resistências desejadas. Desse modo, se deu início as aplicações de adições minerais e aditivos nas misturas, que resultaram em um grande

aumento de resistência à compressão dos concretos. Sendo assim, na maioria dos casos são utilizadas as adições minerais nas misturas para que as peças estruturais possam atingir a alta resistência mecânica nos concretos e argamassas (BIANCHINI, 2010).

2.3.1 Adições minerais

As adições minerais nas misturas de concreto, quando dosadas especificamente para o uso destinado, podem proporcionar um melhor desempenho na estrutura, pois, alteram e melhoram algumas propriedades, como a trabalhabilidade, resistência a fissuração e resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As partículas das adições minerais possuem granulometria muito fina o que permite que ocorra a quebra da inércia do sistema na mistura, a partir da ação da nucleação das partículas de cimento resultando numa hidratação dessas partículas de maneira completa e rápida (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

O ganho de resistência mecânica devido a adição mineral ocorre com a reação química entre as pozolanas e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), produzido na fase de hidratação do cimento Portland. Assim, nesta reação química, as pozolanas consomem quase completamente o CH, que se transforma em silicato de cálcio hidratado (C-S-H), fazendo com que o concreto se torne mais resistente e durável (CARMO; PORTELLA, 2008; TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A utilização das adições minerais pode melhorar as seguintes características do concreto (FURQUIM, 2006):

- Redução do consumo de energia e poluição do ar;
- Diminuição do calor de hidratação;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhoria na zona de transição entre o agregado e a pasta;
- Diminuição da permeabilidade;
- Diminuição da exsudação;
- Melhora na fluidez e trabalhabilidade do concreto;
- Incremento de resistência mecânica em idades avançadas.

Além dos benefícios para as estruturas de concreto, a utilização das adições minerais nas misturas também auxiliam no impacto ambiental, isso porque o processo de fabricação do cimento gera um alto índice de poluição ao meio ambiente, e, a substituição parcial do clínquer por pozolanas de origem industrial faz com que esse impacto seja minimizado (ISAIA et al., 2017).

Nas misturas de concreto, onde são utilizadas adições minerais pozolânicas, é possível verificar um aumento no refinamento dos poros e dos grãos dos produtos de hidratação, atribuindo a esta estrutura de concreto uma menor porosidade. Além disso, a utilização das adições minerais pode colaborar para a durabilidade do concreto, pois possuem alta resistência ao ataque de agentes externos (ISAIA, GASTALDINI, 2004).

Dessa forma, as adições minerais podem ser utilizadas no concreto por duas formas: pela substituição a quantidade de cimento (retirando parte desse teor), ou pela adição ao cimento (retirando parte dos agregados da mistura). Portanto, salienta-se que, para a realização dessa adição, deve ser realizado um estudo de dosagem, pois a medida que acrescenta-se um novo material, os demais devem ser retirados para que assim seja possível manter o mesmo volume (ALBUQUERQUE; LIMA, 2014).

A substituição de parte do cimento Portland por adições minerais proporciona a formação de compostos hidratados com maior homogeneidade na mistura o que leva a uma redução nos teores de hidróxido de cálcio nos poros dos concretos, fazendo com que resulte em uma pasta mais densa e homogênea com poros menores dificultando o ataque e ingresso de agentes agressivos no interior da pasta melhorando a resistência e durabilidade deste concreto ou argamassa (BERTEQUINI et al., 2019).

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), as adições minerais com composição pozolânica, como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim, são as mais utilizadas para obtenção de ganho de resistência mecânica nas misturas de concreto e argamassas de alto desempenho, sendo a sílica ativa a mais utilizada.

A sílica ativa é considerada um subproduto da indústria composta quase completamente, em torno de 92%, de dióxido de silício SiO_2. Os outros 8% são compostos por pequenas quantidades de magnésio, óxidos e ferro (BERTEQUINI et al., 2019).

A fabricação da sílica ativa é realizada a partir de fornos com temperaturas acima de 2000º C onde liberam o SiO_2 em estado gasoso. Quando o SiO_2 entra em contato com baixas temperaturas em estado gasoso, acaba se solidificando adquirindo então a forma de pó que é removido dos filtros das chaminés (DALMOLIN, 2011).

A definição da sílica ativa segundo a NBR 13956-1 (ABNT, 2012), é:

> Material decorrente do processo de produção de silício metálico ou ligas de ferro-silício 75% em fornos elétricos, onde durante o processo, é gerado o gás SiO que, ao sair do forno, oxida-se formando partículas de SiO_2, que são captadas por sistema de filtros coletores, esse material constitui um tipo de pozolana formada essencialmente por partículas esféricas com diâmetros menores que 10^{-6} m de sílica no estado amorfo (ABNT, 2012).

A sílica ativa no Brasil é comercializada em três formas sendo densificada, natural ou não densificada ou em formato de lama e em outros países é comercializada em misturas do cimento Portland (BIANCHINI 2010; ABNT 2012).

A contribuição da sílica ativa para o aumento da resistência no concreto ocorre basicamente de duas maneiras sendo a partir de ações químicas e físicas.

As reações químicas ocorrem a partir do efeito da pozolana onde as reações da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, da reação do cimento, produzem cristais de cálcio hidratado fazendo com que aumente a resistência e reduza a porosidade (ROMANO et al., 2008, NEVILLE, 2013).

E as reações físicas ocorrem a partir da finura do microfíler que ocasiona o empacotamento dos sólidos preenchendo os vazios dos grãos de sílica ativa e de cimento. A finura deste elemento faz com que sua atuação seja em uma faixa complementar dos materiais existentes na dosagem das misturas de argamassas e concretos, podendo melhorar o fator do empacotamento das partículas com uma dosagem específica e diminuindo o efeito de parede na zona de transição (DALMOLIN, 2011).

Dessa forma quando a sílica ativa reage com o $Ca(OH)_2$ do cimento forma silicato de cálcio hidratado adicional, resultando nos compósitos de argamassas, concretos e pasta algumas propriedades e características especiais são adquiridas tais como (ABNT, 2012):

- Aumento da coesão da pasta;

- Redução da exsudação e segregação;
- Diminuição da porosidade e da permeabilidade;
- Diminuição da possibilidade de ocorrência de eflorescência nas peças;
- Aumento das resistências tanto flexão como compressão;
- Maior resistência à difusão de íons de cloreto;
- Redução das reações álcali-agregado;
- Aumento da resistividade elétrica;
- Menor consumo de energia e emissão de CO_2;
- Melhoria na resistência ao ataque de sulfatos.

2.4 CARBONATAÇÃO DO CONCRETO/ ARGAMASSA

O pH do concreto é alcalino (básico) e varia de 12,5 a 13,5. Essa alcalinidade se dá pelo hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ produzido a partir da hidratação do cimento, que produz também silicatos de cálcio hidratado (CUNHA; HELENE, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2014; DYER, 2015).

A elevada alcalinidade no concreto armado faz com que exista uma camada passivadora nas barras de aço, essa película é invisível e é a responsável pela proteção contra a corrosão nas armaduras (MEDEIROS et al., 2017).

Quando se inicia o processo de carbonatação ocorre uma reação entre o dióxido de carbono existente na atmosfera (CO_2) e os produtos de hidratação do cimento no concreto, tendo como consequência a diminuição do pH do concreto para aproximadamente 9 (DYER, 2015; GONZÁLEZ et al., 2011; YEIH; CHANG, 2005; RILEM, 1988).

Quando a alcalinidade do concreto armado diminui, o dióxido de carbono, presente no ar no estado gasoso pode penetrar no concreto de duas maneiras: pela porosidade do material ou por fissuras existentes na estrutura (MERAH; KROBBA, 2017).

Desse modo, quando o CO_2 da atmosfera entra em contato com a água é formado ácido carbônico (H_2CO_3), de acordo com a reação, descrita na Equação 1.

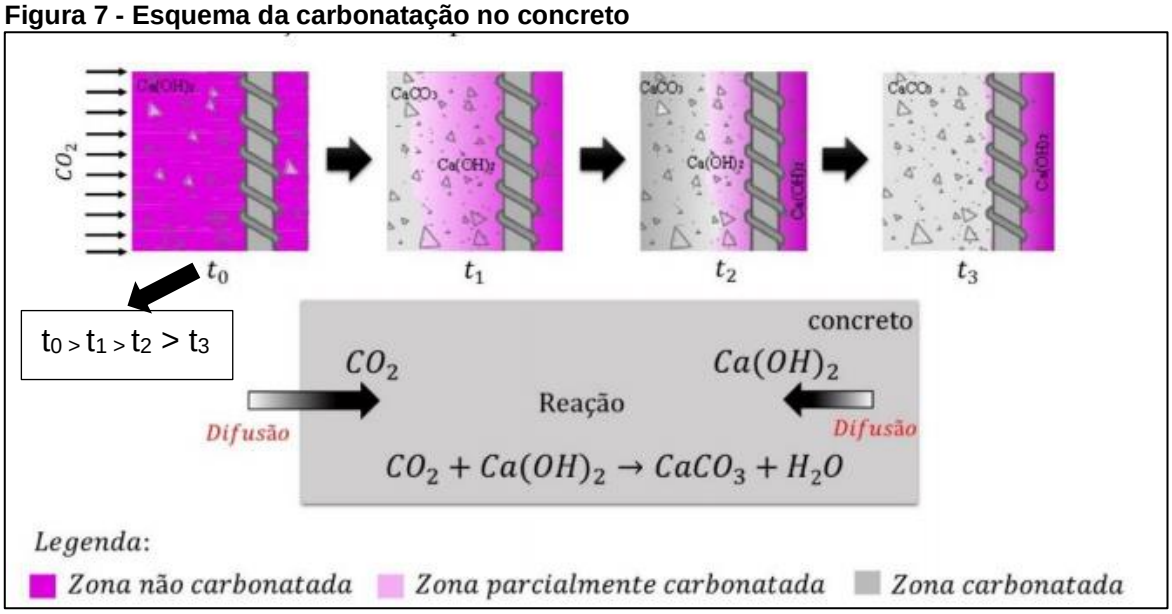
$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \quad (1)$$

A água existente nos poros do concreto com o ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio existente no concreto e forma carbonato de cálcio (reação da carbonatação), equação 2 (DYER, 2015; GOYAL et al. 2018).

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O \quad (2)$$

Na Figura 7, tem-se o efeito da carbonatação no concreto evidenciando o risco de corrosão com a diminuição do pH e quebra na película passivadora.

Figura 7 - Esquema da carbonatação no concreto



Fonte: Adaptado de Possan (2010).

De acordo com Bertolini, Carsana e Redaelli (2008), quando ocorre a despassivação da camada de proteção, a umidade existente no ambiente irá induzir a armadura ao processo de corrosão que, por consequência, ocorrerá a expansão deste material levando a retração e, por conseguinte, a fissuração da estrutura.

Pires (2016), determinou que a profundidade da carbonatação e a velocidade com que esta atinge a estrutura depende de vários fatores condicionantes relacionados com o meio e as propriedades do concreto endurecido. Esses fatores podem ser observados no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais fatores que ocasionam a carbonatação nas estruturas de concreto armado

Fatores condicionantes	
Condições de exposição	Concentração CO_2
	Umidade relativa do ambiente
	Temperatura
	Condições para difusão do CO_2
Características do concreto	Relação água/cimento
	Tipo e consumo de cimento
	Adições minerais
	Compactação
	Cura
	Idade
	Reserva alcalina
	Porosidade

Fonte: A autora (2020) adaptado de Pires (2016).

González et al. (2011), citaram que fatores como: o cobrimento de armadura menor do que especificado nas normas; alta relação água/cimento; deficiência na compactação e na cura do concreto aceleram o efeito da carbonatação no concreto armado, levando a estrutura à processos de deterioração devido à corrosão das armaduras muitas vezes anteriormente à vida útil preconizada em projeto.

A porosidade diminui em decorrência da carbonatação, além disso também ocorrem a diminuição de massa e do volume devido à retração por carbonatação e, em consequência desse fator, tem-se um aumento da densidade. Para determinar a porosidade podem ser realizados ensaios de absorção por capilaridade, imersão, ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio e outros (CINCOTTO et al., 2010; MORANDEAU et al., 2014; DYER, 2015).

No Brasil, a determinação da absorção de água em amostras de concreto e argamassas por imersão é padronizada pelas diretrizes da norma NBR 9778 (ABNT, 2005) e a absorção por capilaridade pela NBR 9779 (ABNT, 2012).

Apesar da absorção por capilaridade e imersão serem técnicas difundidas, a porosimetria por intrusão de mercúrio ainda é a mais precisa, isso se deve ao fato de que é a única técnica que se propõe a verificar a existência da larga gama de valores de poros existentes em concretos e argamassas, devido a medição dos poros em um intervalo com diferenças de tamanho de até seis ordens de magnitude (DIAMOND, 1989; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

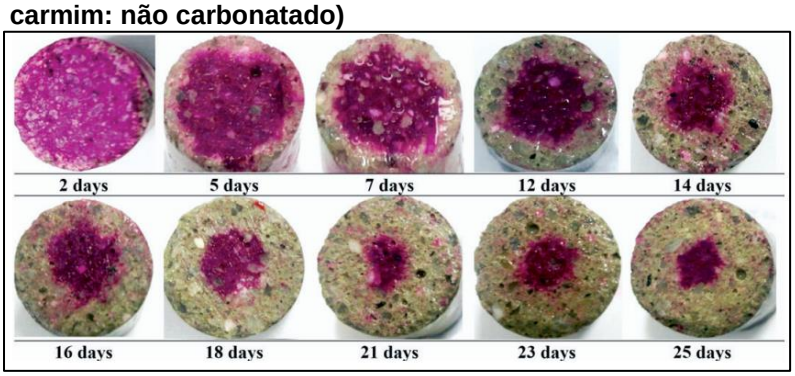
Para verificar a profundidade de carbonatação de estruturas de concreto armado, é usual a utilização de indicadores de pH. Dentre os mais utilizados destacam-se a fenolftaleína ($Ca_{20}H_{14}0_4$), que apresenta carmim ou violeta quando a peça de concreto ou argamassa tem pH superior a 9,5, e a timolftaleína ($Ca_{28}H_{30}0_4$), que adquire coloração azulada quando apresenta pH superior a 10,5. Ambas apresentam coloração incolor quando registram na estrutura pH abaixo dos valores superiores (CASCUDO, 1997; TONG et al., 2012; REDAELLI; BERTOLINI, 2016).

A fenolftaleína apresenta um uso maior do que os outros indicados. Isso se justifica por possuir um baixo custo e apresentar com facilidade e rapidez no ensaio com uma precisão relativamente boa (SILVA, 2007). Além disso, o uso da fenolftaleína é indicado pela CPC-18 (RILEM, 1988) e pela BS EN 14630 (CEN, 2006).

Na utilização da fenolftaleína é realizada uma solução do produto (que é comercializado normalmente em pó). Dessa forma pode-se utilizar uma solução de 1g de fenolftaleína diluída com 50% de água deionizada ou destilada e 50% de álcool (SIQUEIRA et al., 2017). Também pode-se utilizar a proporção de 1% de fenolftaleína diluída em 30% de álcool e 70% de água (MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2014). Ou até mesmo 1% de fenolftaleína diluída somente em solução de álcool (GARRABRANTS; KOSSON, 2003).

Um exemplo da aplicação da fenolftaleína como indicador de pH, da frente de carbonatação de amostras de concreto pode ser observado na figura 8.

Figura 8 - Indicador de pH fenolftaleína (incolor: carbonatado, carmim: não carbonatado)



Fonte: Lacerda et al. (2017).

2.4.1 Modelos de previsão de vida útil – profundidade de carbonatação

Para verificar a profundidade de carbonatação das estruturas de concreto existem alguns modelos matemáticos que foram criados ao longo do tempo, com o objetivo de equacionar a velocidade de carbonatação do concreto. No entanto, essa modelagem é complexa, pois, depende de vários fatores, dentre estes as formas de degradação das estruturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dentre os principais modelos de previsão de vida útil relacionados com a profundidade de carbonatação, serão destacados, o Modelo Clássico e o proposto por Duracrete (1999).

2.4.2 Modelo Clássico

O modelo clássico para determinação da profundidade de carbonatação é dado a partir da segunda lei de Fick, para meios homogêneos e fluxos unidirecionais, sendo apresentado de acordo com a Equação 3 (POSSAN, 2010; YAZIGI, 2008).

$$e_c = k.\sqrt{t} \tag{3}$$

Onde:

e_c = profundidade de carbonatação em mm;

k = coeficiente de carbonatação que depende dos materiais em mm/ano;

t = tempo decorrido em segundos.

2.4.3 Duracrete

O modelo proposto por Duracrete (1999), contém basicamente três parâmetros ambientais: C_{s,CO_2}, k_{e,CO_3} e n_{CO_3}. Conforme Equação 4 (YAZIGI, 2008).

$$x_c = \sqrt{\frac{2.k_{C.CO_3}.k_{e,CO_3}.k_{t,CO_3}.D_{eff}.C_{s,CO_2}}{a}}.\ \sqrt{t}.\left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_{CO_3}} \tag{4}$$

Onde:

x_c = profundidade na frente carbonatada em mm;

$k_{C.CO_3}$ = fator relacionado com a cura;

k_{e,CO_3}= fator ambiental;

k_{t,CO_3} = fator dependente do meio do ensaio;

D_{eff} = coeficiente efetivo de difusão;

C_{s,CO_2}= concentração de dióxido de carbono na superfície;

t_0 = tempo de referência de exposição em anos;

t = tempo em segundos;

n_{CO_3} = fator de idade, depende do tempo de atuação da umidade relativa e da chuva;

a = é a capacidade de fixação do CO_2 (função da quantidade de CaO do cimento).

Para determinação do parâmetro k_{e,CO_3} deve-se considerar o efeito do nível de umidade médio, sendo que pode se considerar $k_{e,CO_3} = 1{,}0$ relativo ao clima, quando normalmente é utilizado em laboratório uma temperatura de 20º C e 65% de umidade relativa (YAZIGI, 2008).

Porém, quando não se tem essas condições de laboratório, este valor, pode ser obtido pela Equação 5.

$$k_{e,CO_3} = \left(\frac{1-RH^f}{1-RH_{ref}^f}\right)^g \quad (5)$$

Onde:

$k_{C.CO_3}$ = fator relacionado com a cura;

RH = Umidade relativa no cobrimento do concreto;

RH_{ref} = Umidade de referência;

f = varia entre 1 – 10;

g = varia entre 2 – 5.

O valor de k_{e,CO_3} é obtido a partir da média da umidade relativa em áreas protegidas da chuva e depende da umidade média da superfície do concreto e provavelmente da sua amplitude, portanto, a consequência esperada é que o valor de k_{e,CO_3} decresça com a duração da chuva (YAZIGI, 2008).

Já o valor de n_{CO_3} é equivalente a zero para o clima de laboratório e vai variar entre 0 a 0,18, de acordo com tempo de duração dos períodos de chuva durante o ano (YAZIGI, 2008).

O coeficiente de difusão do CO_2 no concreto é dado por (m²/s) e pode ser obtido a partir da Equação 6 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

$$D_{CO2} = -10^{(-6,5+\frac{f_{ck}}{20})} \quad (6)$$

Onde:

D_{CO2} = é o coeficiente de difusão do CO_2 no concreto (m²/s);

f_{ck} = é a resistência característica a compressão do concreto (MPa).

2.5 CORROSÃO DAS ARMADURAS

A corrosão das armaduras no concreto armado pode ser classificada, principalmente, em dois grandes grupos: a corrosão química e a corrosão eletroquímica (POPOV, 2015).

Durante o processo da corrosão, o metal tende a voltar a sua forma iônica, isso devido à exposição a eletrólitos tais como: a atmosfera, água, solo, produtos químicos, entre outros (DYER, 2015).

Segundo Gentil (2011), a corrosão química ocorre no momento em que o metal realiza interação com os gases do meio, ocasionando produtos de corrosão, porém, esse tipo de corrosão pouco importa para a construção civil, devido ao fato de que o processo é lento e os óxidos criados formam uma película sobre o metal, que reduz a velocidade das reações com maior mensuração quando submetidos a altas temperaturas.

Já a corrosão eletroquímica é aquela que ocorre no concreto armado e pode apresentar elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando manchas superficiais, fissuração, destacamento do cobrimento da estrutura, redução da seção transversal do aço, falha na aderência entre o concreto e o aço podendo levar a estrutura ao colapso (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015).

De acordo com Medeiros e Grochoski (2008), Gonçalves (2011), (SILVA et al., 2016), no Brasil, diversos acidentes com colapsos de marquises de concreto

armado tiveram como causa principal a corrosão das armaduras, como é possível verificar no Quadro 3.

Quadro 3 - Acidentes com marquises no Brasil

Edificação	Ano	Idade da edificação	Vítimas	Tipo de estrutura	Agentes causadores
Edf. Mercúrio (RJ)	1990	Não declarado	1 morte	Laje engastada em viga	Corrosão de armaduras com cobrimento insuficiente
Edf. Terminus (RJ)	1992	Não declarado	1 morte 2 feridos	Laje engastada em viga	Corrosão de armaduras e sobrecarga devido a camadas sobrepostas de impermeabilização
Restaurante da Tijuca (RJ)	1992	37 anos	Nenhuma	Laje engastada em viga	Corrosão das armaduras
Prédio do BANDERN (RJ)	1993	> 50 anos	Nenhuma	Laje engastada em parede de alvenaria	Corrosão das armaduras
Edf. Tavares (RJ)	1995	Não declarado	1 ferido	Laje engastada	Sobrecarga por falta de drenagem e letreiro sobre a marquise
Hospital Mun. Barata Ribeiro (RJ)	1996	48 anos	Nenhuma	Laje engastada	Mau posicionamento da armadura, água não drenada e sobreposição de impermeabilização
Hotel Palace (BA)	2000	66 anos	1 morte 2 feridos	Não declarado	Corrosão das armaduras e excesso d'água não drenada
Edf. M. D'Almeida	2001	Não declarado	1 morte 7 feridos	Não declarado	Corrosão das armaduras e excesso d'água não drenada
Edf. Granville	2004	24 anos	Nenhuma	Laje engastada	Mau posicionamento da armadura negativa
Centro de Ciências Sociais Aplicadas (PR)	2006	7 anos	2 mortes 21 feridos	Laje engastada em viga	Corrosão das armaduras e excesso d'água não drenada
Bar Parada Obrigatória Vila Isabel (RJ)	2006	50 anos	3 mortes 4 feridos	Não declarado	Corrosão das armaduras
Hotel Canadá (RJ)	2007	40 anos	2 mortes 14 feridos	Não declarado	Corrosão das armaduras e sobrecargas
Edif. Em Maringá (PR)	2010	Não declarado	Nenhuma	Laje engastada	Não declarado
Escola Municipal Wilson Simões (RJ)	2010	Não declarado	10 feridos	Não declarado	Não declarado
Edif. Região metropo. (RE)	2015	Não declarado	Nenhuma	Laje engastada	Não declarado
Edif. Zona Norte (RE)	2015	Não declarado	1 ferido	Não declarado	Não declarado

Fonte: Medeiros e Grochoski (2008), Gonçalves (2011) e Silva et al., 2016

Os colapsos ocorrem com a degradação de parte da armadura pela corrosão. Essa degradação pode ser observada na Figura 9, onde no local da estrutura de concreto armado houve destacamento do cobrimento e a armadura corroída ficou exposta (ANDRÉ, 2013).

Figura 9 - Armadura de aço com corrosão localizada

Fonte: ANDRÉ (2013).

A armadura de aço é protegida dentro do concreto armado devido a formação de uma camada passivante formada por γFe_2O_3 sobre a superfície do aço. Essa camada é submicroscópica e protege o aço da corrosão, desde que o nível de pH do concreto permaneça alcalino (HELENE, 1993; ANDRADE, 2001).

Segundo Helene (1993), Cavalcanti e Cavalcanti (2010), Gentil (2011), Dyer (2015), Goyal et.al (2018) e outros autores, a carbonatação e o ataque de cloretos nas estruturas de concreto armado são os principais agentes que podem diminuir o pH do concreto, ocasionando a corrosão eletroquímica das armaduras.

A corrosão eletroquímica incide em um processo espontâneo, podendo advir quando o metal ou liga entra em contato com o eletrólito, onde ocasionam respectivamente as reações de oxidações (anódicas) e de reação (catódicas),

ocasionando então a deterioração do material (MAINIER; SANDRES; TAVARES, 2007).

Para Figueiredo (1994), Gentil (2011) e Dyer (2015), a célula de corrosão é formada pela zona anódica e a zona catódica. Dessa forma, na zona anódica existem reações de oxidação do ferro, que ocasionam a perda de elétrons que toma a forma de ionização em sua superfície, com a reação indicada na Equação 7.

$$\mathrm{Fe} \rightarrow \mathrm{Fe}^{2+} + 2\mathrm{e}^{-} \tag{7}$$

Na zona catódica, a reação existente é de redução, dessa forma ocorre o ganho de elétrons de oxigênio e não acarreta a perda de massa no trecho, conforme reação apresentada na Equação 8.

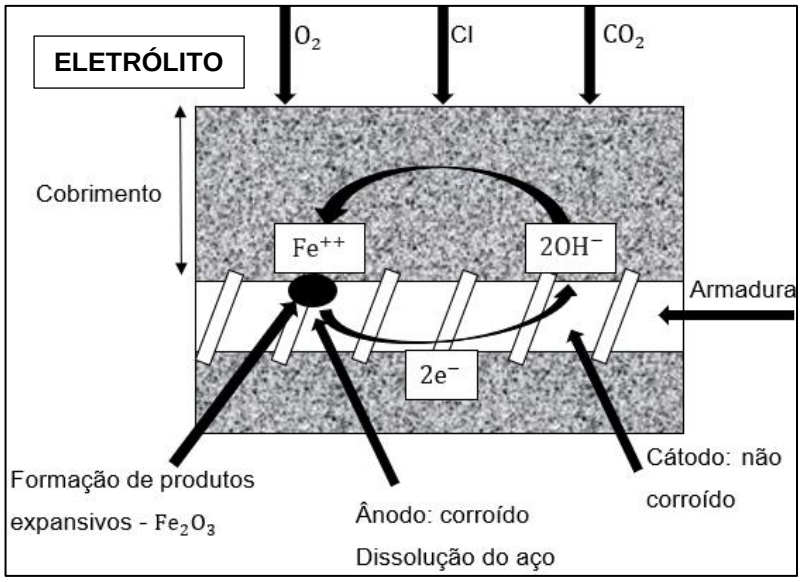
$$\mathrm{H_2O} + 1/2\mathrm{O_2} + 2\mathrm{e}^{-} \rightarrow 2\mathrm{OH}^{-} \tag{8}$$

Na origem da pilha de corrosão ocorre a movimentação (através dos meios de transporte), dos íons e elétrons originados no processo de corrosão, nas áreas anódicas e catódicas. Desse modo, os íons migram por dissolução e migração pela solução e os elétrons migram a partir do contato direto entre metal-metal. Assim, as reações da pilha de corrosão fazem com que ocorra deslocamento dos íons de hidroxila formados pela reação de oxidação da área catódica, por meio do eletrólito para a área anódica, combinados com os íons de Fe^{++}, existentes nesta região do metal, dando origem aos produtos de corrosão a partir da reação indicada na Equação 9 (ANDRADE, 2001).

$$\mathrm{Fe}^{++} + 2\mathrm{OH}^{-} \rightarrow \mathrm{Fe(OH)_2} \tag{9}$$

Dessa forma, o esquema da corrosão, com as reações geradas no processo e a formação de eletrólito (composto por concreto + poros + água + agentes agressivos), pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Modelo de corrosão de armaduras no concreto



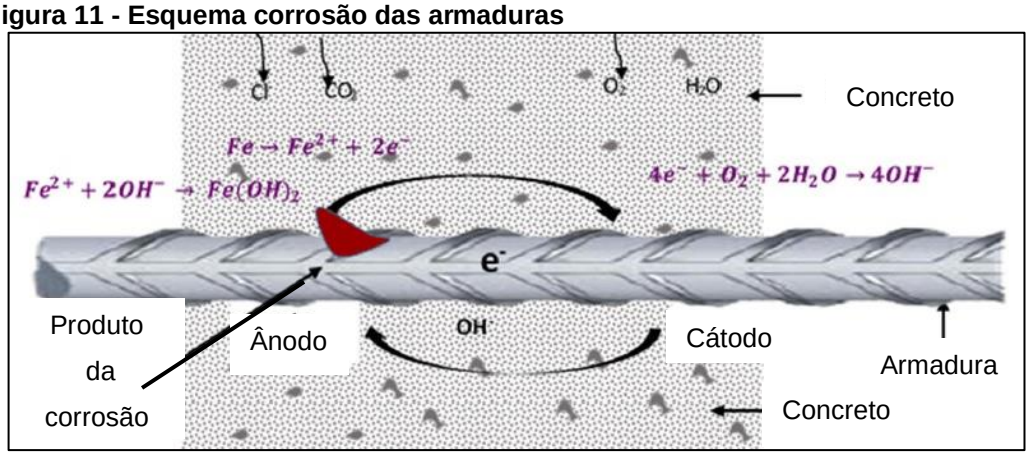
Fonte: Andrade (2001).

Além das Equações 7, 9, quando em contato com outro metal, sob condições de pH neutro, ocorre também uma reação de redução, expressa pela reação demonstrada na Equação 10 (DYER, 2015).

$$4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4OH^- \tag{10}$$

Podendo as Equações 7, 9 e 10, serem observadas no esquema de corrosão demonstrado na Figura 11:

Figura 11 - Esquema corrosão das armaduras



Fonte: Goyal et al. (2018).

Desse modo, pode-se realizar uma associação entre o cobrimento do concreto e a proteção do aço, devendo este ser seguido rigorosamente conforme projeto (levando em conta os possíveis ataques em cada estrutura), a fim de evitar a

despassivação do aço e, consequentemente, a corrosão das armaduras. Ainda, é essencial que o concreto empregado nas estruturas seja durável, garantindo que as resistências mecânicas preconizadas em projeto sejam equivalentes à sua vida útil (SOARES; VASCONCELOS; NASCIMENTO, 2015).

Um dos parâmetros utilizados para o monitoramento da taxa do desenvolvimento da corrosão nas armaduras do concreto armado é a resistividade elétrica deste material. Isso ocorre, pois, a resistividade controla o andamento dos íons que se propagam pelo concreto a partir da solução aquosa existente nos poros do concreto, sendo assim muito sensível ao teor de umidade e à temperatura, reduzindo com seu aumento (LENCIONI e LIMA, 2010).

Desse modo é entendido que existe uma relação entre a porosidade do concreto e a resistividade, sendo que quanto mais porosidade existir em uma peça de concreto armado, menor será a resistividade elétrica e, portanto, maior a possibilidade de ocorrência da corrosão (POLDER; PEELEN, 2002 *apud* LÜBECK, 2008).

O critério desenvolvido para análise da probabilidade da taxa de corrosão em relação com a resistividade elétrica do concreto foi elaborado em 1988 pelo CEB (Comitê Euro-Internacional Du Betón), no Bulletin D'Information número 192, conforme visualizado no Quadro 4 (CEB, 1992).

Quadro 4 - Probabilidade de corrosão em função da resistividade elétrica do concreto segundo CEB 192

Resistividade do concreto ρ (k.Ω.cm)	Taxa de corrosão provável
>20	Desprezível
Entre 10 e 20	Baixa
Entre 5 e 10	Alta
<5	Muito alta

Fonte: CEB (1992).

Porém, apesar da resistividade elétrica ser um parâmetro para a determinação da corrosão é importante frisar que nem sempre pode ser considerada o fator determinante na velocidade de corrosão, para tanto é indicado que esse método não seja o único a ser analisado durante o diagnóstico da corrosão (MEDEIROS, 2001).

2.6 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

Estudos revelam que o método da realcalinização eletroquímica começou a ser difundido em meados de 1980. Pocock (1994) desenvolveu uma visão geral sobre o tema e Mietz (1998) aplicou a realcalinização eletroquímica em concretos carbonatados e após isso outros estudos sobre o tema foram surgindo.

Bertolini et al. (2008), definiram que a realcalinização eletroquímica transforma o concreto carbonatado em alcalino, criando dessa forma um ambiente favorável para a passivação do aço.

Para a carbonatação de amostras de concreto em laboratório são utilizadas câmaras de carbonatação artificial acelerada com concentração controlada, e, para monitoramento da eficiência e progresso, são realizados testes com indicador de pH (normalmente fenolftaleína) a fim de verificar a profundidade de carbonatação das amostras (MENEGON; NEVES JUNIOR, 2018).

Na carbonatação ocorre a diminuição do pH do concreto, que faz com que a camada passivadora em torno da armadura seja prejudicada, ocorrendo então, a corrosão das armaduras. Para tanto, o método busca aumentar o pH do concreto para restaurar e manter a película passivadora. Isso é possível porque durante o processo as reações entre o oxigênio e o hidrogênio criam íons hidroxila na superfície do aço, o que ajuda a atingir sua passividade (GOYAL et al., 2018).

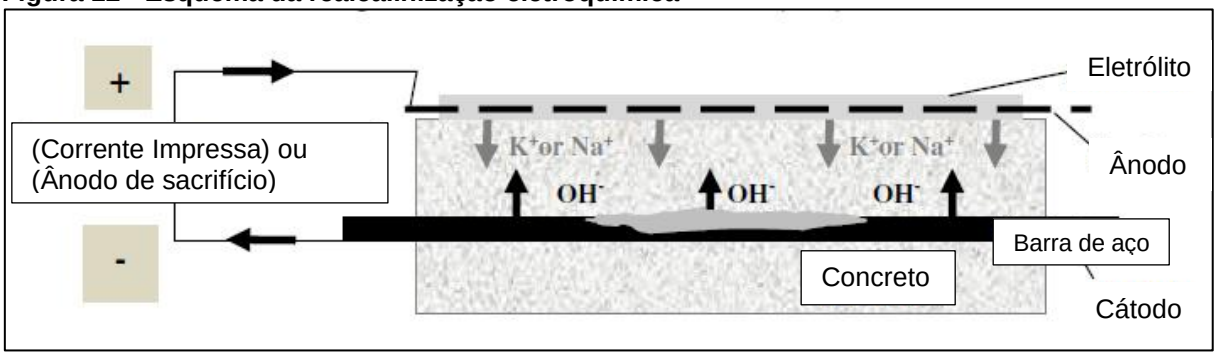
De acordo com Bertolini et al. (2012), a realcalinização eletroquímica é uma técnica baseada na aplicação de uma corrente catódica contínua no aço do concreto armado, juntamente com a peça embebida em solução alcalina.

A corrente elétrica contínua pode ser aplicada em uma ou várias peças de concreto ao mesmo tempo, podendo o sistema ser montado em série (GONZÁLEZ et al., 2011; SAHAL et al., 2011; HORNBOSTEL et al., 2013 e AGUIRRE-GUERRERO e GUTIÉRREZ 2018) ou em paralelo (AGUIRRE et al., 2016).

Ribeiro et al., (2013) classificaram a realcalinização como um tratamento que ocorre a partir de uma fonte de alimentação externa com um dos polos ligados ao aço (cátodo) e outro polo ligado a uma malha metálica auxiliar (ânodo), normalmente de titânio. Para o processo, a estrutura deve estar embebida em um eletrólito, sendo comum neste caso a utilização da solução de carbonato de sódio, para então ser submetida a uma corrente contínua, que varia entre 0,8 e 2 A/m², por alguns dias, até

que seja possível verificar o retorno da alcalinidade do concreto. O esquema pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 - Esquema da realcalinização eletroquímica



Fonte: Tong et al. (2012).

Segundo Goyal et al. (2018), para aplicação do método é necessária uma corrente elétrica de 0,5 a 1 A/m², aplicada entre o aço existente no concreto armado e um ânodo externo (malha metálica normalmente de titânio ou aço) em uma solução eletrolítica alcalina contendo carbonato de sódio, potássio ou lítio.

Ainda de acordo Mietz (1995) e Ribeiro et al. (2013) durante o processo de realcalinização eletroquímica ocorrem os seguintes mecanismos de:

- Absorção devido aos efeitos capilares da solução alcalina dissociada;
- Difusão de compostos alcalinos devido a diferença de concentrações;
- Migração de íons dentro do campo elétrico, sendo os íons negativos, como OH^-, CL^- se movendo em direção ao ânodo e os íons positivos, como Na^+, K^+, se movendo em direção ao cátodo;
- Ao redor do cátodo (armadura em aço), são gerados íons hidroxila, devido à eletrólise da água e auxiliado pela eletro-osmose ocasionada a partir da solução eletrolítica. Pode-se observar essas reações a partir da Equação 11:

$$2H_2O + 2e^- = H_2 + 2OH^- \quad (11)$$

- Além da Equação 11, ocorrem as reações com o oxigênio existente no concreto, na Equação 12:

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- = 2OH^- \quad (12)$$

- No ânodo, os íons hidroxila são oxidados, fazendo com que o pH seja diminuído nesta região, sendo representados pelas Equações 13 e 14:

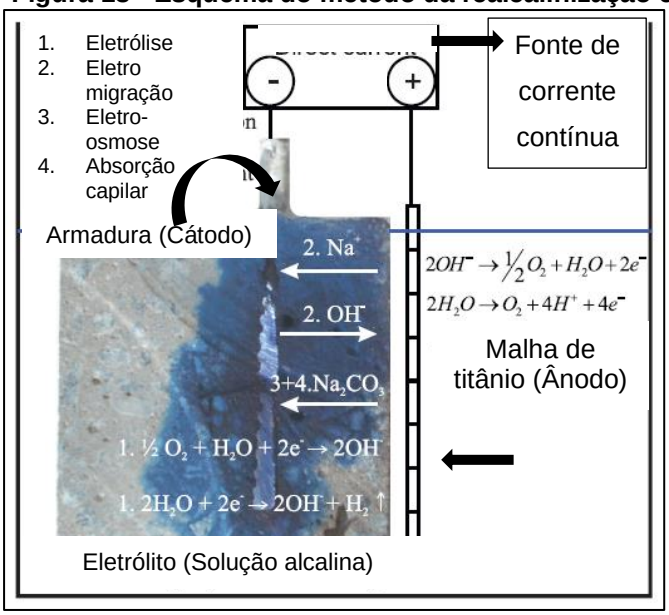
$$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \quad (13)$$

$$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^- \quad (14)$$

- Eletro-osmose: o eletrólito na superfície do concreto se move em direção ao cátodo, isso ocorre devido ao campo elétrico existente.

As reações verificadas podem ser observadas no esquema demonstrado pela Figura 13.

Figura 13 - Esquema do método da realcalinização eletroquímica



Fonte: Ribeiro et al. (2013).

Dessa forma, a solução alcalina (carbonato de sódio, lítio ou potássio) migra para o concreto carbonatado enquanto os íons hidroxila são, ao mesmo tempo, produzidos pela eletrólise da água ao redor da armadura. Assim, espera-se que esses

fenômenos aumentem o pH e restabeleçam a passividade da armadura (TONG et al., 2012).

Do mesmo modo, o número de hidróxidos gerados próximo ao aço é considerado uma consequência da corrente aplicada durante o tratamento da realcalinização eletroquímica, isso significa que quanto mais longo o tratamento, maior será a quantidade de hidróxidos gerados e então os níveis de alcalinidade alcançados no concreto serão maiores (RIBEIRO et al., 2013).

A norma de número 14038-1 do Comitê Europeu de Normatização, cita que o término do tratamento da realcalinização eletroquímica ocorre quando o experimento alcança uma corrente equivalente a 200 A.h/m² e que para atestar a eficiência do método deve ser realizado teste do pH da peça com fenolftaleína (ou outro indicador de pH) (CEN, 2016).

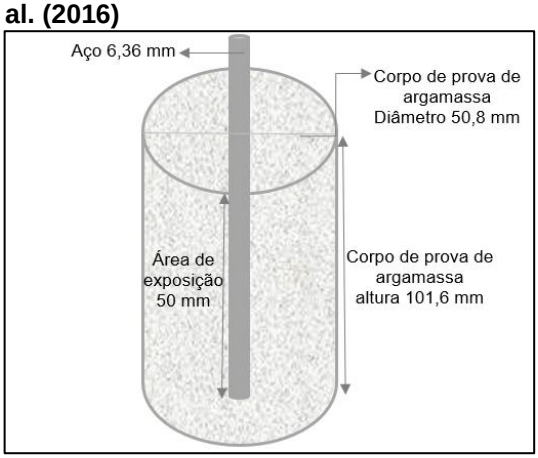
Redaelli e Bertolini (2016) em seus experimentos evidenciaram que o processo de realcaliniização eletroquímica, realizada com soluções alcalinas de carbonato de sódio, pode agir de maneira preventiva nas estruturas de concreto armado, evitando assim a diminuição do pH e, consequentemente, a carbonatação e corrosão.

Apesar de ser um processo eficiente, a realcalinização eletroquímica não pode reverter situações em que o aço está com grandes corrosões que comprometa a seção da armadura, desse modo, a aplicação deve ser realizada em estruturas que possuem corrosão em estado inicial. Esse método também pode ser considerado um procedimento de manutenção preventiva nas estruturas, mas não deve ser classificado como uma reabilitação (GONZÁLEZ et al., 2000; AGUIRRE-GUERRERO; GUTIÉRREZ, 2018).

Aguirre et al. (2016) realizaram o processo de realcalinização eletroquímica em corpos de prova de argamassa (Figura 14), e alcançaram bons resultados nas amostras que atingiram um nível de carbonatação parcial e corrosão superficial. Dessa forma, concluíram que na aplicação da técnica, a vida útil do aço pode ser aumentada, porém, a melhor utilização da técnica se aplica de forma preventiva nos casos em que o aço está iniciando o processo de corrosão.

A área de exposição de 50 mm indicado na Figura 14 indica a área de contato entre a argamassa e a barra de aço.

Figura 14 - Corpos de prova argamassados com barra de aço realizados por Aguirre et al. (2016)



Fonte: A autora (2020), adaptado de Aguirre et al. (2016).

Segundo Gentil (2011) os materiais comuns utilizados em processos como ânodos de sacrifício são os metais de ligas de magnésio, zinco ou alumínio.

Alguns autores realizaram o método da realcalinização eletroquímica em seus experimentos, com variáveis malhas, corrente aplicada e dias utilizados no tratamento. Para tanto, essas informações foram compiladas e podem ser observadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Compilação de experimentos de realcalinização eletroquímica realizado por diversos autores

AUTORES	TIPO DE MALHA UTILIZADA	CORRENTE APLICADA	QUANTIDADE DE DIAS UTILIZADOS
Bertolini et al. (2008)	Malha de aço galvanizado e tinânio	0,8 A/m²	17 dias
González et al. (2011)	Malha de titânio	1 A/m²	20 dias
Tong et al. (2012)	Malha de alumínio	1 A/m²	33 dias
Bertolini, Spagnolo e Redaelli (2012)	Malha de titânio	0,5 A/m²	21 dias
Ribeiro et al. (2013)	Malha de titânio	2 A/m²	8 a 18 dias
Aguirre et al. (2016)	Malha de aço galvanizado	1 A/m²	15 dias
Xiong, Deng e Wu (2016)	Malha de aço inoxidável	1 A/m²	7 dias
Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018)	Malha de aço inoxidável	1 A/m²	7, 15 e 21 dias

Fonte: A autora (2020).

Analisando o Quadro 5, pode-se verificar que foram realizados estudos de realcalinização com malhas de aço inoxidável, aço galvanizado, alumínio e de titânio.

A utilização do titânio como ânodo é considerada eficiente, isso porque este material apresenta alta resistência à corrosão e, consequentemente, maior vida útil. Porém, o titânio é um material de alto custo nem sempre está comercialmente disponível (MONTEIRO, 2002; LOURENÇO, 2007; RIBEIRO, 2009; REDAELLI; BERTOLINI, 2011).

As malhas de aço galvanizado são originadas do processo de galvanização do aço, que é realizado a partir de um banho de zinco fundido a aproximadamente 450º C. O zinco no aço galvanizado desempenha um papel de proteção, evitando a corrosão e tornando a peça mais resistente a meios agressivos. Dessa forma, o aço galvanizado pode ser utilizado devido a sua resistência a corrosão composta pela reação entre o ferro e o zinco e por ter na maioria das vezes um baixo custo para aquisição (ANDRADE, 1992).

Os ânodos de alumínio, como a maioria dos metais puros, oferecem baixa resistências mecânicas e sua estrutura oferece resistência a corrosão considerável, alta condutividade elétrica e térmica. Além disso, por ser um metal puro possui um bom custo-benefício (TOTTEN; MACKENZIE, 2003).

Aços inoxidáveis são aqueles em que o metal não oxida mesmo em exposição a agentes agressivos. As malhas de aço inox têm em sua composição o ferro acrescido de cromo. A função da adição do cromo é principalmente criar a camada de proteção. Esse material possui um custo de aquisição maior devido a composição de cromo e a durabilidade do material que se torna maior comparado a outros tipos, devido a alta resistência a corrosão (CHIAVERINI, 2012).

De acordo com Lourenço (2007), os fatores que devem ser levados em consideração para a definição do ânodo utilizado no processo são, principalmente: a durabilidade deste material, a facilidade de manuseio e o custo-benefício.

Tong et al. (2012), analisaram a malha metálica de alumínio utilizada como ânodo no tratamento da realcalinização eletroquímica e realizaram seu registro, verificando os sais resultados do processo, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Análise da malha de alumínio após o tratamento da realcalinização eletroquímica

Fonte: Tong et al. (2012).

Desse modo pode-se verificar que na Figura 15, a malha de alumínio (ânodo) foi consumida durante o método, sendo sua degradação observada. Os sais presentes trata-se dos resíduos do eletrólito combinados com a corrente elétrica durante o processo.

Embora pouco difundida, a técnica da realcalinização eletroquímica vem sendo empregada em grandes estruturas de concreto armado. Um exemplo dessa aplicação foi explorado por Bertolini et al. (2008), onde a aplicação da técnica foi realizada em um pilar da Igreja de Igreja de Santo Antonio na Cidade de Valmadrera na Itália. Os pilares apresentavam pequenos pontos de corrosão e destacamento do cobrimento, conforme Figura 16.

Figura 16 – Corrosão das armaduras no pilar da Igreja de Santo Antonio

Fonte: Bertolini et al. (2008).

Os pontos destacados na Figura 16 foram reparados com argamassa com ativação alcalina e então foi aplicada a fibra de celulose embebida com uma solução alcalina de carbonato de sódio, uma camada de malha metálica de titânio, outra camada de fibra embebida e por último a aplicação do papel filme para manter a saturação do sistema (BERTOLINI et al. 2012). A montagem pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Exemplo da aplicação da técnica de realcalinização eletroquímica em estrutura real

Fonte: Bertolini et al. (2012).

Após o período de 17 dias com aplicação de corrente de 0,8 A/m² o sistema foi interrompido e todas as camadas foram retiradas. Para verificar a eficiência do processo foram realizados testes de verificação do pH da amostra com fenolftaleína e após essa verificação a estrutura foi protegida para evitar novas ações de carbonatação (BERTOLINI et al., 2008).

No trabalho mencionado, evidencia-se a utilização da técnica de realcalinização eletroquímica em grandes peças de concreto armado como nos pilares demonstrados nas Figuras 16 e 17.

Sendo assim, é importante que o sistema mantenha a saturação até o final da aplicação da corrente, pois a saturação faz com que a corrente se mantenha contínua. Para isso pode-se utilizar elementos para envolver a tela, os comumente utilizados são: fibras de celulose (BERTOLINI et al., 2008; TONG et al., 2012; AGUIRRE et al., 2016; AGUIRRE-GUERRERO; GUTIÉRREZ, 2018), esponjas (MARTÍNEZ et al., 2009) e feltros sintéticos (GONZÁLEZ et al., 2011) envoltos com plástico filme.

Outra propriedade importante verificada no processo de realcalinização eletroquímica é a porosidade, visto que, a tendência é que com a aplicação da corrente, juntamente com os sais da solução eletrolítica e a troca de íons hidroxila, os poros da peça aumentem (DYER, 2015; GOYAL et al. 2018).

Esse fato foi analisado por Castellote et al. (2006), onde no processo experimental de realcalinização eletroquímica verificou-se que na amostra localizada próxima a armadura foi observada uma diminuição nos poros e, consequentemente, na porcentagem de porosidade (devido a precipitação de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio). Em contrapartida, analisando próximo a superfície onde a peça entra em contato com o ânodo foi verificado um aumento no valor da porosidade, devido à dissolução das fases sólidas durante o processo.

Após a realização do processo de realcalinização eletroquímica uma nova característica da peça de concreto ou argamassa é adquirida, que é como se a estrutura adquirisse uma condição adequada de proteção, podendo ser comparada como uma estrutura nova. Apesar dessa nova característica ser importante no processo, é indicado que a peça passe por uma proteção, pois nada impede que a carbonatação possa ocorrer novamente no local. Para isso, é indicado a utilização de pinturas de proteção ou impermeabilização na peça e que essa proteção passe por manutenções preventivas ao longo do tempo, garantindo a vida útil da proteção e do método realizado (GONÇALVES et al. 2003; DYER, 2015; GOYAL et al. 2018).

Portanto, pode-se observar a relação existente entre a vida útil, a durabilidade das estruturas de concreto e o processo de realcalinização eletroquímica em estruturas carbonatadas de concreto. Isso porque a carbonatação ocorre em muitas das estruturas e o avanço dessa anomalia pode corroborar para outra manifestação patológica, a corrosão das armaduras. Por outro lado, a corrosão causa diversos problemas nas estruturas de concreto como a diminuição da área a seção transversal e, consequentemente, a diminuição da resistência da peça preconizada em projeto, o destacamento do cobrimento do concreto e podendo em alguns casos levar a estrutura ao colapso.

Se tratando de uma manifestação patológica que pode trazer muitos danos para as estruturas de concreto armado, os métodos de tratamento para esta vêm sendo difundidos nos últimos tempos. Pode-se citar que um desses métodos é o de

realcalinização eletroquímica que evita a geração de resíduos sólidos da construção civil, diminui a mão de obra necessária para realização do tratamento e é indicado para aplicação quando a corrosão inicial é identificada e de forma preventiva, ou seja, quando a armadura apresenta corrosão apenas superficial. Por se tratar de um método preventivo é classificado como uma prática econômica, pois de acordo com a lei do Sitter, uma manutenção preventiva pode custar até cinco vezes menos do que uma manutenção corretiva.

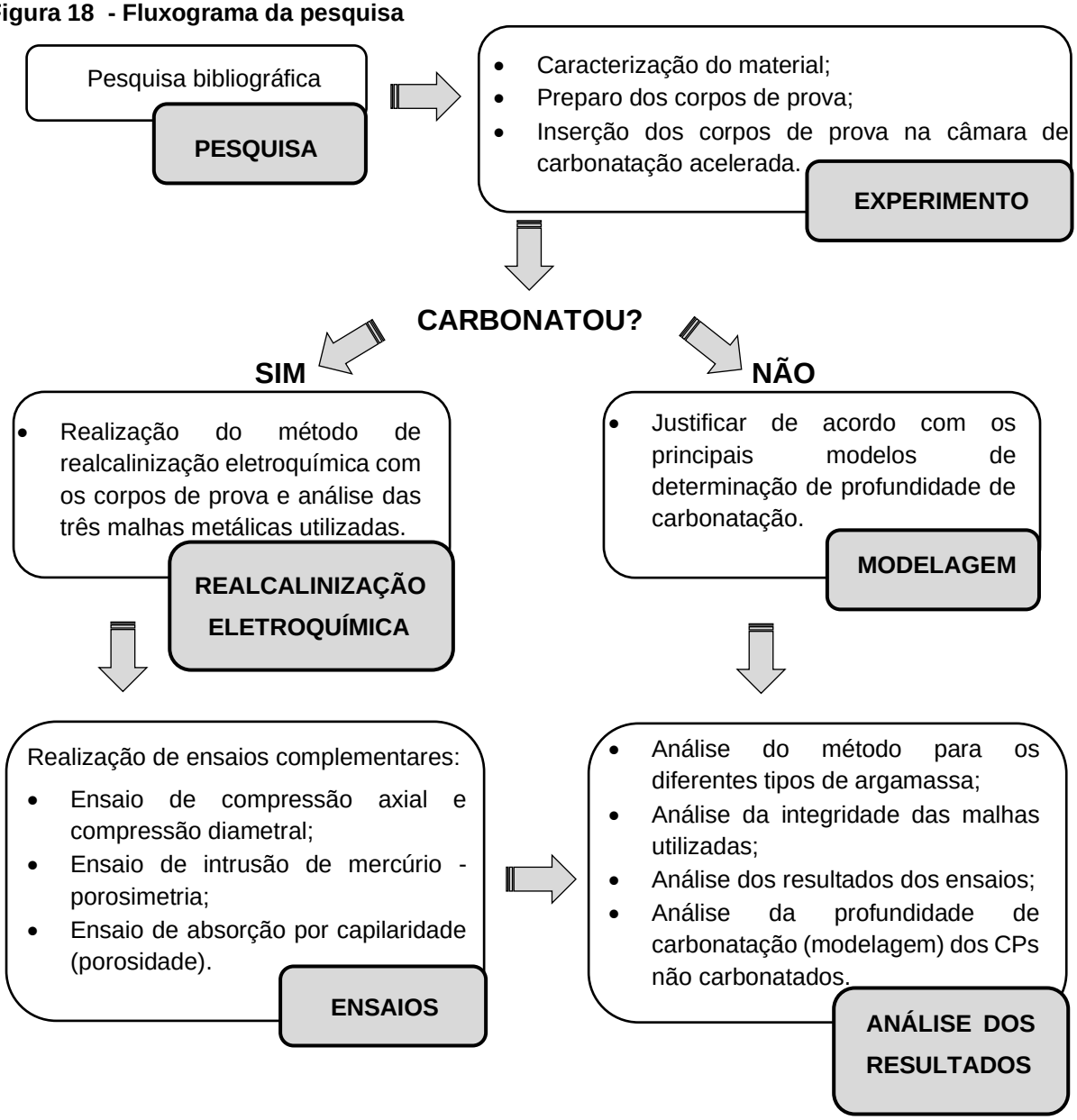
Apesar de estudos evidenciarem a técnica, não existe um padrão para aplicação da mesma e, portanto, novas pesquisas podem colaborar para o aprimoramento e melhoria do método (ASTM, 2018).

Para esse ensaio serão retiradas pequenas amostras dos corpos de prova moldados aos 60 dias, carbonatados e nos realcalinizados serão retiradas amostras de cada tipo de malha metálica utilizada na parte superficial do corpo de prova e no meio em contato com a armadura. Isso pois a carbonatação não chegou a afetar a armadura nos corpos de prova e o aumento do pH se dará apenas na superfície da amostra então poderá ser analisado a eficiência no processo verificando os resultados deste ensaio.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a realização da metodologia deste trabalho foi realizada uma pesquisa experimental, com uma abordagem quantitativa contendo objetivos explicativos de natureza aplicada (SILVA; MENEZES, 2005). A pesquisa seguiu as etapas conforme a figura 18.

Figura 18 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: A autora (2020).

3.1 VARIÁVEIS DO ESTUDO

3.1.1 Tipo de cimento

Para realização dos experimentos foi utilizado o cimento CP V-ARI/RS (cimento Portland de alta resistência inicial, resistente à sulfatos), tanto para a argamassa de alto desempenho como para a argamassa autoadensável.

A utilização do cimento CP V-ARI RS se justifica por ser um cimento altamente utilizado em obras de médio e grande porte devido sua alta resistência inicial e final, além de possuir maior durabilidade.

De acordo com o laudo da empresa fabricante a massa específica do cimento era de 2,97 g/cm³ e a resistência à compressão média de 39,4 MPa aos 7 dias, conforme indicado nos Quadros 6, 7 e 8.

Quadro 6 - Boletim de ensaio do cimento (teores químicos)

ENSAIOS	QUÍMICOS			
	TEORES (%)			
	PF (Perda ao fogo)	MgO (Óxido de Magnésio)	SO_3 (trióxido de enxofre)	RI (Resíduo Insolúvel)
LIMITES DA NORMA NBR 16697	≤ 6,5	N/A	≤4,5	N/A
MÉDIA	4,4	5,8	3,2	10,8
DESVIO PADRÃO	0,5	0,1	0,1	1,3
MÍNIMO	3,6	5,5	3,1	9,3
MÁXIMO	5,3	6,0	3,4	13,1

Fonte: Empresa fornecedora (2018).

Quadro 7 - Boletim de ensaio do cimento (teores físicos e mecânicos)

ENSAIOS	FÍSICOS E MECÂNICOS			
	FINURA (%)		BLAINE	ÁGUA DE CONSIST. (%)
	#200	#325	(cm²/g)	
LIMITES DA NORMA NBR 16697	≤6,0	N/A	≥3000	N/A
MÉDIA	0,1	1,4	5013	30,4
DESVIO PADRÃO	0,1	0,7	198	0,4
MÍNIMO	0,0	0,5	4810	29,6
MÁXIMO	0,4	2,5	5290	31,0

Fonte: Empresa fornecedora (2018).

Quadro 8 - Boletim de ensaio do cimento (teores físicos e mecânicos)

ENSAIOS	FÍSICOS E MECÂNICOS			
	EXPANSÃO A QUENTE (mm)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
		1 dia	3 dias	7 dias
LIMITES DA NORMA NBR 16697	≤ 5,0	≥11,0	≥24,0	≥34,0
MÉDIA	0,3	22,5	33,3	39,4
DESVIO PADRÃO	0,3	1,3	0,9	1,2
MÍNIMO	0,0	20,2	31,8	37,8
MÁXIMO	0,5	24,8	24,8	41,3

Fonte: Empresa fornecedora (2018).

Mesmo sabendo que na câmera de carbonatação não há incidência de sulfatos foi optado pela utilização deste a fim de não existir outras interferências na carbonatação que era o objetivo deste.

3.1.2 Argamassa autoadensável

Para argamassa autoadensável foi determinado um traço de acordo com a especificação de dosagem da ABCP para atingir uma resistência à compressão de 25 MPa, a descrição dele será apresentado no Quadro 9. O uso deste tipo de argamassa se justifica pelo fato de que a utilização de concreto/argamassa autoadensável vem aumentando cada vez mais, pois conforme descrito no item 2.2, este tipo de produção dispensa a compensação e diminui os defeitos das peças.

Quadro 9 – Traço para argamassa autoadensável

ARGAMASSA AUTOADENSÁVEL			
CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	ÁGUA (L)	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE
1	4,7	0,65	0,08 %

Fonte: A autora (2020).

Conforme o item 2.2, para utilização de concreto e argamassa autoadensável é recomendado o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes para contribuir com a fluidez do material. Dessa forma, foi acrescentado ao traço 0,08% (sobre o consumo de cimento) de aditivo superplastificante a base de polímeros policarboxilatos.

3.1.3 Argamassa de alta resistência

A definição do uso da argamassa de alta resistência se deu ao fato de que este material é altamente utilizado em construções de grande porte, tais como prédios, pontes, túneis etc. Com sua grande utilização teve-se a ideia inicial de analisar o comportamento deste material frente a carbonatação e após a realcalinização.

Para tanto, foi desenvolvido um traço de acordo com a especificação de dosagem da ABCP para atingir uma resistência de 65 MPa. Este pode ser observado no Quadro 10.

Quadro 10 - Traço para argamassa de alto desempenho

ARGAMASSA DE ALTO DESEMPENHO				
CIMENTO (kg)	SÍLICA ATIVA (kg)	AREIA (kg)	ÁGUA (L)	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE
1	0,1	3,7	0,4	0,15%

Fonte: A autora (2020).

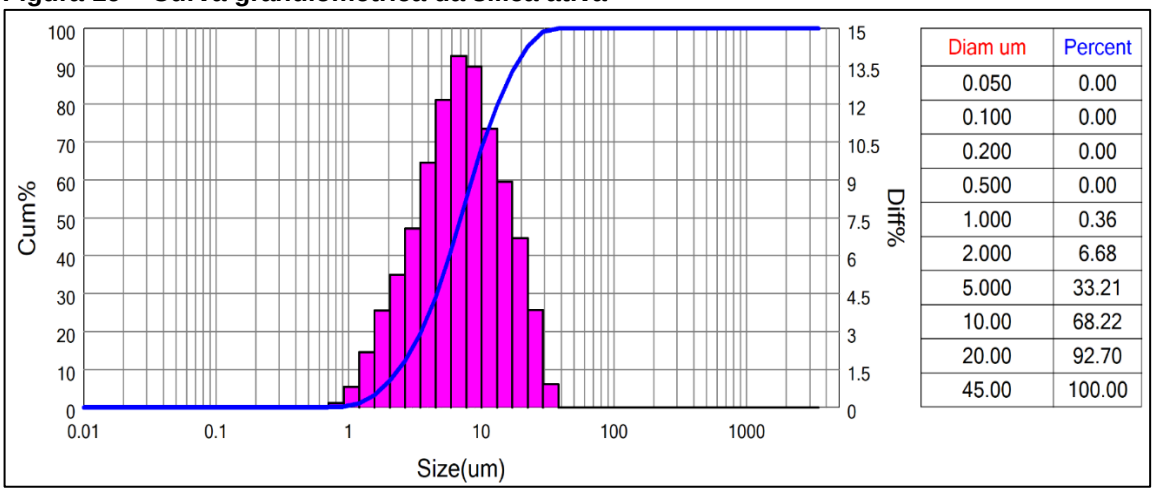
Para auxílio no ganho de resistência desta argamassa foi utilizada a adição mineral de sílica ativa e para melhorar as propriedades de trabalhabilidade e fluidez foi acrescentado 0,15% (sobre o consumo de cimento) de aditivo superplastificante a base de polímeros policarboxilatos.

3.1.4 Sílica ativa

A sílica ativa foi utilizada como adição mineral a fim de possibilitar o aumento de resistência mecânica juntamente com os demais componentes da mistura do concreto de alta resistência.

A classificação da granulometria e análise dos grãos foi realizada com o equipamento granulômetro a lazer Bettersizer S3 Plus, na UTFPR e o gráfico da curva granulométrica está apresentado na Figura 19. O laudo completo na análise realizada pelo equipamento está identificado no Anexo I.

Figura 19 – Curva granulométrica da sílica ativa



Diam um	Percent
0.050	0.00
0.100	0.00
0.200	0.00
0.500	0.00
1.000	0.36
2.000	6.68
5.000	33.21
10.00	68.22
20.00	92.70
45.00	100.00

Fonte: A autora 2020, adaptado Bettersizer UTFPR 2019

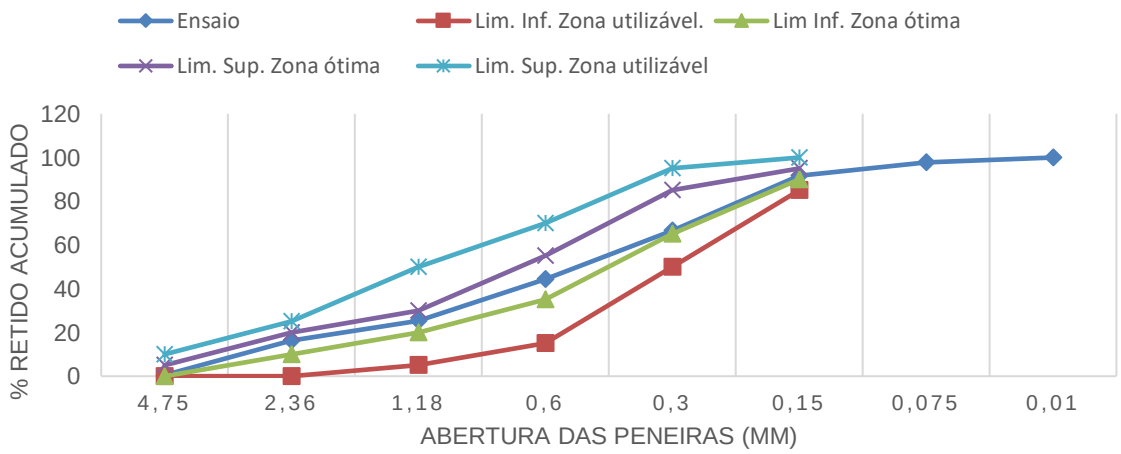
3.1.5 Areia

A areia utilizada para compor o traço dos dois tipos de argamassa foi uma areia artificial média, com módulo de finura igual a 2,45. A classificação do tipo de areia foi realizada de acordo com os parâmetros da norma NBR 7211 (ABNT, 2019).

O uso da areia artificial justifica-se, pois, a sua utilização vem sendo empregada em diversos tipos de obras, tendo em vista um menor custo comparado com areias naturais em algumas regiões, além de causar um menor impacto ambiental em relação as areias naturais, devido a sua exploração por dragagem (DRAGO; VERNEY; PEREIRA, 2009).

A curva granulométrica do agregado miúdo (areia) encontra-se no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia



Fonte: A autora (2020).

A curva granulométrica foi traçada de acordo com os dados obtidos no laboratório seguindo as diretrizes da NBR 7211 (ABNT, 2019).

3.1.6 Barra de aço

Para simular os efeitos do concreto armado, foi inserida uma barra de AÇO CA 50 (a sigla CA indica Concreto Armado, e o número, a categoria, referente a resistência de escoamento mínima, em kN/cm²) de 4,2 mm de diâmetro, centralizada no corpo de prova, simulando uma estrutura com espessura de cobrimento da armadura, variando entre 20 a 25 mm. Nessas configurações o cobrimento do corpo de prova atende as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014) para laje na classe de agressividade ambiental I e II, viga/pilar para classe de agressividade I, conforme indicado no Quadro 11. Além de seguir o padrão realizado por Aguirre et al. (2016), demonstrado na Figura 14.

Quadro 11 - Espessura do cobrimento segundo ABNT NBR 6118/2014

Tipo de estrutura	**Componente ou elemento**	**Classe de agressividade ambiental (indicada no Quadro 1)**			
		I	**II**	**III**	**IV**
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50

Fonte: Adaptado (ABNT, 2014).

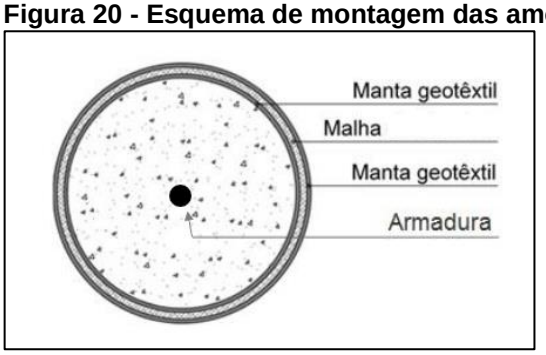
3.1.7 Feltro sintético - geotêxtil

Durante todo o processo de realcalinização eletroquímica é importante que a saturação do sistema seja mantida para garantir a eficiência do sistema. Para isso, são utilizadas neste sistema fibras de celulose, esponja e feltros sintéticos.

Neste caso foi optado pela utilização de feltro sintético geotêxtil, este encontrado com facilidade no mercado, pois também é utilizado para jardinagem e sistemas de drenagem, além de ter uma aplicação mais facilitada comparada com a

fibra de celulose e a esponja. A montagem do sistema seguiu o exemplo demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Esquema de montagem das amostras

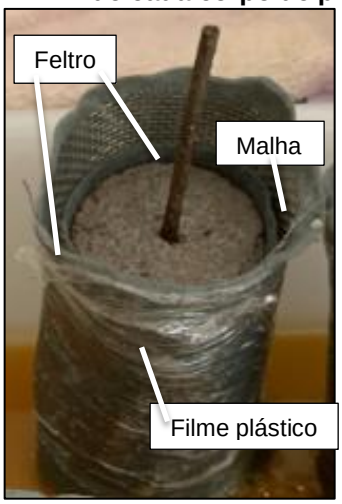


Fonte: Adaptado (TEIXEIRA et al., 2018).

Além disso, ao redor de todo sistema da Figura 20 foi utilizado filme plástico de uso para alimentos a fim de garantir a saturação do sistema, sendo demonstrado a montagem na Figura 21.

.

Figura 21 – Esquema de montagem de cada corpo de prova

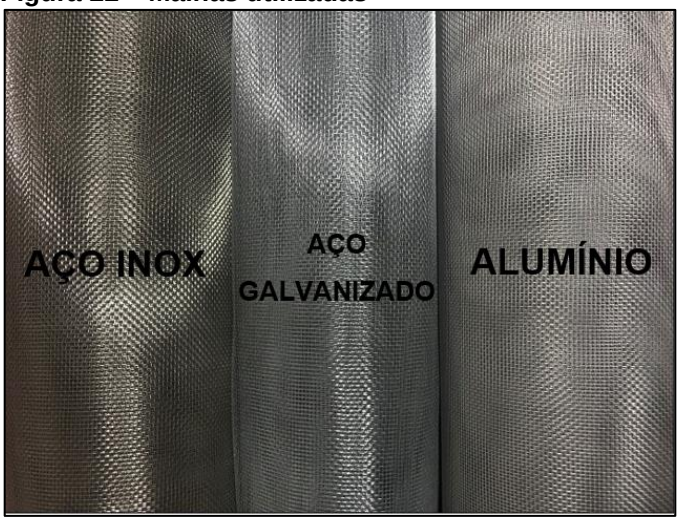


Fonte: A autora (2020)

3.1.8 Malha metálica

Para o estudo da realcalinização eletroquímica serão analisados três tipos de malhas metálicas de mesmo fio (diâmetro) e abertura, variando somente o material: aço inox, aço galvanizado e alumínio. As malhas utilizadas possuem abertura de 1,4 x 1,4 mm e fio 31, essas podem ser visualizadas na Figura 22.

Figura 22 – Malhas utilizadas



Fonte: A autora (2020).

A definição dos tipos de malha ocorreu a partir da realização de análise comparativa das classes já utilizadas por outros autores nesse mesmo tipo de experimento. Dessa forma, de acordo com o Quadro 5, pode-se observar que Bertolini, Carsana e Redaelli (2008) e Aguirre et al. (2016) utilizaram em seus experimentos malha metálica de aço galvanizado, Tong et al. (2012) empregou tela de alumínio em suas amostras e Xiong, Deng e Wu (2016) e Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018) optaram pela utilização de malhas do tipo aço inoxidável, sendo então selecionados esses três tipos de malhas metálicas para a realização dos experimentos deste trabalho.

3.1.9 Solução eletrolítica alcalina

Conforme citado no item 2.6, no processo de realcalinização eletroquímica é necessário que a estrutura esteja embebida em solução para a formação de eletrólito alcalino. Essa solução é chamada de solução eletrolítica alcalina e pode ser composta por carbonato de sódio, potássio ou lítio.

Dessa forma, optou-se pela utilização de barrilha leve composta por carbonato de sódio (Na_2CO_3), devido ao fato de que esta solução tem maior facilidade de aquisição, pois também é um material utilizado para tratamento de águas em piscinas.

Para tanto, foi utilizada solução eletrolítica de barrilha na concentração de 5 %, diluída com água. A proporção da mistura desta solução foi calculada considerando 1 mol de Na_2CO_3 a partir da sua massa molar de 106 g/mol.

3.1.10 Indicador de pH

Para verificação da carbonatação dos corpos de prova será aspergida no corpo de prova rompido por compressão, fenolftaleína ($Ca_{20}H_{14}O_4$), como indicador de pH. Dessa forma, no local onde a aplicação da solução contendo fenolftaleína apresentar aspecto incolor significa que este ponto está com o pH baixo (até 8,2 de acordo com fabricante) ocasionando a carbonatação do concreto e onde apresentar a coloração violeta o local apresenta pH alto (acima de 10 conforme fabricante). Desta forma é possível então realizar a medição da espessura da carbonatação da amostra.

O uso da fenolftaleína se justifica devido a sua facilidade de compra com baixo custo, resultados obtidos logo após da aspersão além de possuir uma precisão boa nos resultados (SILVA, 2007).

A solução utilizada foi de 1g de fenolftaleína para uma solução de 100 ml sendo 50 ml de água deionizada e 50 ml de álcool, conforme também utilizado por Siqueira et al. (2017).

3.1.11 Câmara de carbonatação acelerada

Os corpos de prova foram preparados e deixados em uma câmara de carbonatação acelerada, construída de madeira e revestida de fibra de vidro com resina de poliuretano. A câmara possui dispositivo de controle de temperatura, concentração de CO_2 e umidade, que faz medições a cada minuto, portanto, foi contabilizada uma média das medições realizadas, sendo essas observadas no Quadro 12.

Quadro 12 – Médias das medições da câmara de carbonatação acelerada

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

Fonte: A autora (2020).

Pode-se observar a câmara de carbonatação acelerada na Figura 23 (a) e seus dispositivos de controle na Figura 21(b).

Figura 23 - Câmara de carbonatação (a) e dispositivo de controle (b)

Fonte: A autora (2020).

3.2 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

Para preparo dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos 5 x 10 cm. Para a moldagem foram seguidas as instruções da norma Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, NBR 7215 (ABNT, 1996). Dessa forma, foram preenchidas 4 camadas de argamassa com 30 golpes de soquete metálico em cada camada.

Os corpos de prova após a moldagem podem ser observados na Figura 24, onde é verificado que a maioria se encontra com o aço centralizado e algumas amostras estão sem o aço, esses foram destinados para ensaios de compressão diametral.

Figura 24 - Corpos de prova moldados

Fonte: A autora (2020).

Para a quantidade dos corpos de prova foi realizado um cálculo para determinação do tamanho da amostra a partir do nível de confiança, utilizando a Equação 15 (DAL MOLIN et al., 2005).

$$n = z^2_{\alpha/2} \cdot \frac{CV^2}{Er^2} \qquad (15)$$

Onde: n = número de repetições;

Er = erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10%;

CV = coeficiente de variação da amostra;

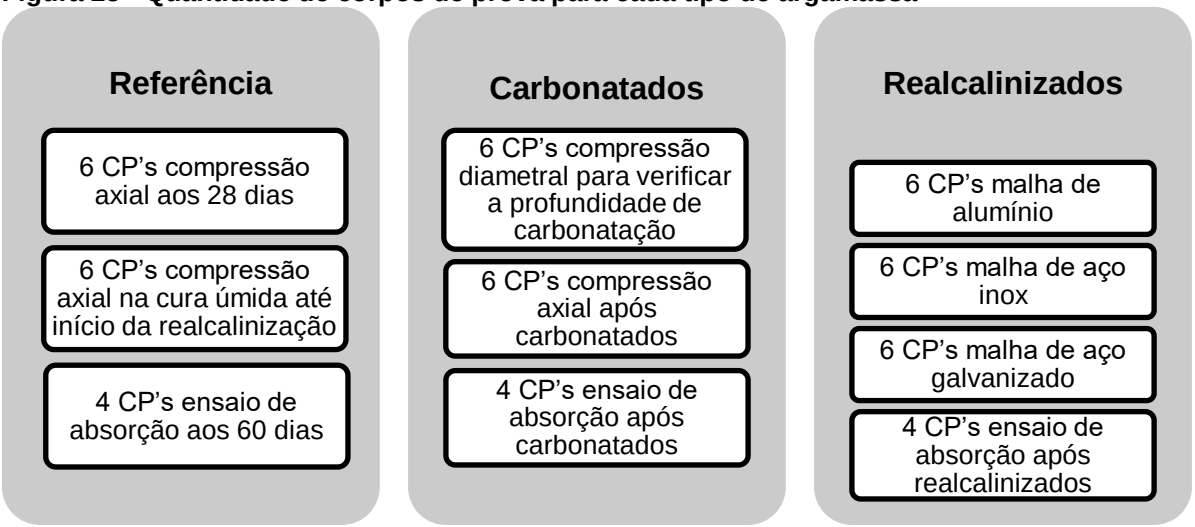
$z_{\alpha/2}$ = valor tabelado que, para α = 5% de significância possui o valor de 1,96.

Arbitrando como viável um CV de 10%, tem-se que o número de repetições “n” = $1{,}96^2$ = 3,84, sendo assim, considera-se que com no mínimo 4 amostras é possível obter respostas a um nível estatístico de confiança de 95%.

Portanto 4 amostras para cada tipo de comparação é suficiente para representar o universo (DAL MOLIN et al., 2005).

Foram consideradas 6 amostras para cada verificação e 4 para os ensaios de absorção. No total foram moldados 108 corpos de prova, divididos como referência, carbonatados e realcalinizados, com as quantidades determinadas na Figura 25.

Figura 25 - Quantidade de corpos de prova para cada tipo de argamassa



Fonte: A autora (2020).

Para os corpos de prova referência foi optado pela cura úmida até a data do início do processo de realcalinização eletroquímica.

Após a moldagem os corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação acelerada.

3.3 CARBONATAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram deixados na câmara de carbonatação acelerada durante o maior período possível, a fim de encontrar maiores valores para a profundidade de carbonatação. Os corpos de prova permaneceram na câmara por período de um ano e quatro meses, após esse período os corpos de prova foram rompidos diametralmente para verificar a profundidade de carbonatação com indicador de pH, sendo este uma solução de fenolftaleína. Assim, foi comprovada a carbonatação e dado início ao processo de realcalinização eletroquímica.

O processo foi realizado para os 3 tipos de malhas metálicas utilizadas nos corpos de prova de argamassa autoadensável (pois os de alta resistência não apresentaram valores de carbonatação para realização do processo de realcalinização eletroquímica).

3.4 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

Para a realização do processo de realcalinização eletroquímica, foi utilizada uma fonte para transmissão de corrente elétrica contínua com dois polos, sendo um interligado na malha metálica e outro na barra de aço existente no corpo de prova. A fonte utilizada é observada na Figura 26.

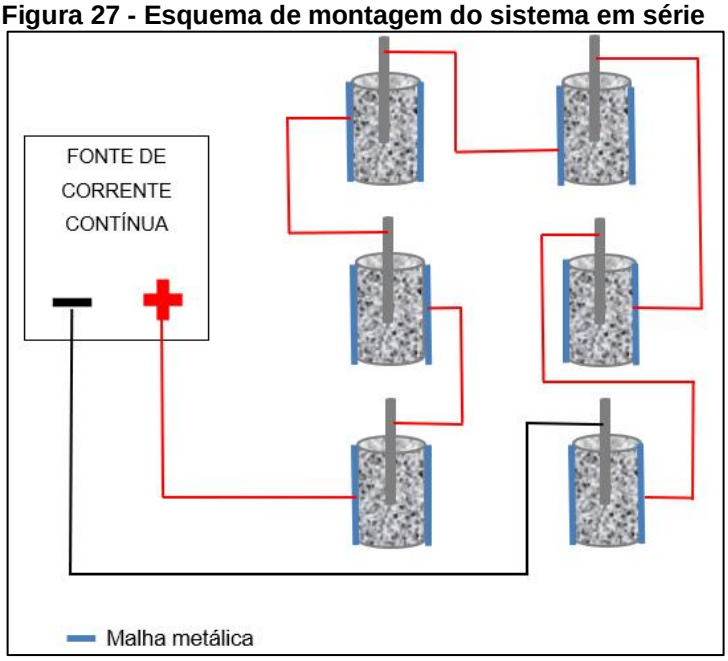
Figura 26 – Fonte de transmissão de corrente elétrica contínua

Fonte: A autora (2020).

A corrente contínua utilizada foi de 1 A/m² (sendo calculado 1 Ampére para cada m² do corpo de prova), a mesma adotada pelos autores González et al. (2011), Tong et al. (2012), Aguirre et al. (2016), Xiong, Deng e Wu (2016) e Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018), indicado no Quadro 5.

O sistema foi montado com 6 (seis) corpos de prova interligados em série seguindo o proposto pelos autores González et al. (2011), Sahal et al. (2011) e Hornbostel et al. (2013). A montagem do sistema foi realizada conforme esquema demonstrado na Figura 27.

Figura 27 - Esquema de montagem do sistema em série



Fonte: A autora (2020).

O processo foi realizado por 7 dias conforme indicado por Goyal et.al. (2018) e utilizado por Xiong, Deng e Wu (2016) e Aguirre-Guerrero e Gutiérrez (2018) em seus experimentos, indicado no Quadro 7.

3.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES

3.5.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados a fim de comparar as resistências nos corpos de prova referência aos 28 dias, na câmara

úmida desde a moldagem até o início do processo de realcalinização e carbonatados (que estava durante todo o período de 1 ano e 4 meses dentro da câmara).

Esses ensaios seguiram as diretrizes da norma Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto, parte 1: Resistência à compressão axial, NBR 7680-1 (ABNT, 2015).

3.5.2 Resistência à compressão diametral

Foram realizados ensaios de resistência à compressão diametral somente para a verificação da profundidade de carbonatação com indicador de pH (fenolftaleína), não avaliados os valores obtidos. O ensaio foi realizado de acordo com os critérios da norma Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto, parte 2: Resistência à tração, NBR 7680-2 (ABNT, 2015).

3.5.3 Ensaios de Porosidade

3.5.3.1 Ensaio de absorção por capilaridade

Os ensaios de absorção por capilaridade seguem as diretrizes NBR 9779 (ABNT, 2012). O objetivo deste ensaio é a verificação da porosidade nas amostras, visto que essa é uma característica importante, pois quando os corpos de prova são submetidos a carbonatação a tendência é que a porosidade do material diminuir e os que passaram pelo processo da realcalinização eletroquímica o esperado é que a porosidade aumente (CINCOTTO et al., 2010; DYER, 2015).

3.5.3.2 Ensaio de absorção por intrusão de mercúrio – porosimetria

O ensaio de porosimetria foi realizado com o intuito de avaliar a diferença de tamanho dos poros entre as amostras carbonatadas e realcalinizadas, visto que, na carbonatação a tendência é que a porosidade diminua, e na realcalinização a tendência é que aumente.

O porosímetro utilizado é da UTFPR Curitiba e contém as seguintes especificações técnicas:

Porosímetro: Marcha Quantachrome, Modelo: PoreMaster 33, Faixa de pressão: De 0,2 a 33.000 psia / Faixa de tamanho dos poros (ângulo de contato de 150°): de 1100 µm a 0,0064 µm / Estação de baixa pressão: 2 (de 0,2 a 50 psia) / Estações de alta pressão: 1 (de 20 a 33.000 psia) / Resolução de volume: ±0,0001 cc.

O ensaio é realizado com base nas diretrizes da norma ASTM D4404-10 e é determinado com a intrusão do mercúrio a distribuição do tamanho dos poros, o volume de intrusão (volume total dos poros), área total dos poros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados e análise dos processos.

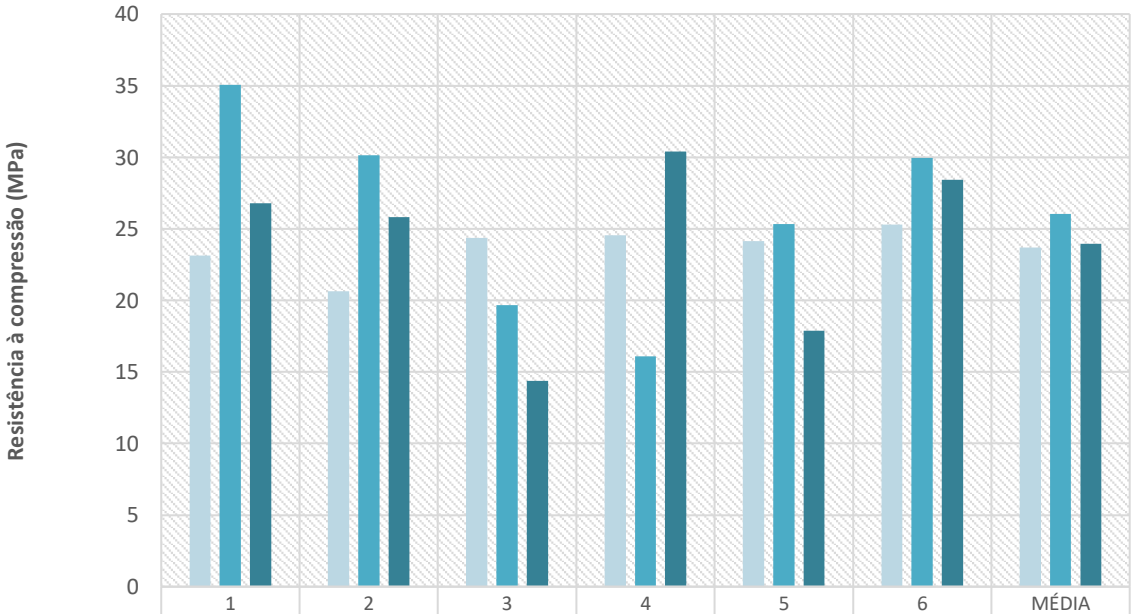
4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Neste momento serão demonstrados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão. Para tanto, foram realizadas as comparações entre os corpos de prova sendo os que foram rompidos aos 28 dias de cura, os que estavam na câmara úmida há 1 ano e 4 meses e os que estavam na câmara de carbonatação há 1 ano e 4 meses antes de realizar o processo de realcalinização eletroquímica.

4.1.1 Argamassa autoadensável

O Gráfico 2 apresenta os valores de resistência à compressão axial encontrados nos corpos de prova de argamassa autoadensável para as três situações.

Gráfico 2 - Resistência à compressão - Argamassa autoadensável



	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
28 dias	23,12	20,63	24,36	24,56	24,15	25,31	23,69
Carbonatado	35,07	30,12	19,65	16,09	25,33	29,95	26,04
Cura	26,78	25,81	14,36	30,39	17,89	28,43	23,94

Fonte: A autora (2020).

Em análise ao Gráfico 2 observou-se que existiu uma grande variabilidade entre os corpos de prova 1, 3, 4 e 5 e foram realizadas análise de variância ANOVA e teste de TUKEY's.

A análise de variância ANOVA demonstrada no Quadro 13 demonstra os valores obtidos na análise a partir dos dados coletados.

Quadro 13 - ANOVA – Argamassa autoadensável (compressão)

	Soma de Quadrados SQ		**Graus de Liberdade GDL**	**Médias Quadradas**		**F**	**Valor-p**
Blocos (entre grupos)	SQB	19,8939	(k-1) = 2	MQB	9,94694	0,318	0,7324
Residual (dentro dos blocos)	SQR	469,248	(N-k) = 15	MQR	31,2832		
Total	SQT	489,142	(N-1) = 17		0,7291		
Tabela de distribuição de F: Fα (k-1,N-k)... F(0,05) = 3,98							

Fonte: A autora (2020).

Analisando a tabela ANOVA, evidenciada no Quadro 13, foi verificado que o valor obtido por F de 0,318 é menor que o F crítico para 0,05 que é de 3,98 e o valor identificado no fator p foi de 0,318, ou seja, maior do que o limite de 0,05, logo verifica-se que os valores encontrados não possuem diferença estatística significativa.

Então, para nova validação ANOVA foram excluídos os dados espúrios, sendo esses, os menores valores encontrados de 19,65, 16,09, 14,36 e 17,89 MPa e a partir dessa exclusão pode-se verificar nova análise conforme Quadro 14.

Quadro 14 - ANOVA – Argamassa autoadensável (compressão)

	Soma de Quadrados SQ		**Graus de Liberdade GDL**	**Médias Quadradas**		**F**	**Valor-p**
Blocos (entre grupos)	SQB	106,448	(k-1) = 2	MQB	53,224	7,987	0,007202
Residual (dentro dos blocos)	SQR	73,3002	(N-k) = 11	MQR	6,66336		
Total	SQT	179,748	(N-1) = 13		0,006		
Tabela de distribuição de F: Fα (k-1,N-k)... F(0,05) = 3,98							

Fonte: A autora (2020).

Dessa forma foi possível atestar analisando que o valor obtido por F de 7,987 é maior que o F crítico para 0,05 que é de 3,98 e o valor identificado no fator p foi de 0,007, ou seja, menor do que o limite de 0,05, logo verifica-se que os valores encontrados são estatisticamente significativos e portanto diferentes.

Também se verificou que as três médias das resistências à compressão de todos os corpos de prova analisados no Gráfico 2 se aproximam da meta de 25 MPa mas com alta dispersão.

Pela comparação de médias de TUKEY foram identificadas as comparações aos pares de médias conforme Quadro 15.

Quadro 15 - Teste de Tukey análise dos valores médios obtidos nas resistências a compressão argamassa autoadensável

	A	B	C	RESULTADO
A		0,006888	0,07032	A≠B
B	5,457		0,4552	B=C
C	3,534	1,755		A=C
A = 28 dias; B = Carbonatado; C = Cura úmida.				

Fonte: A autora (2020).

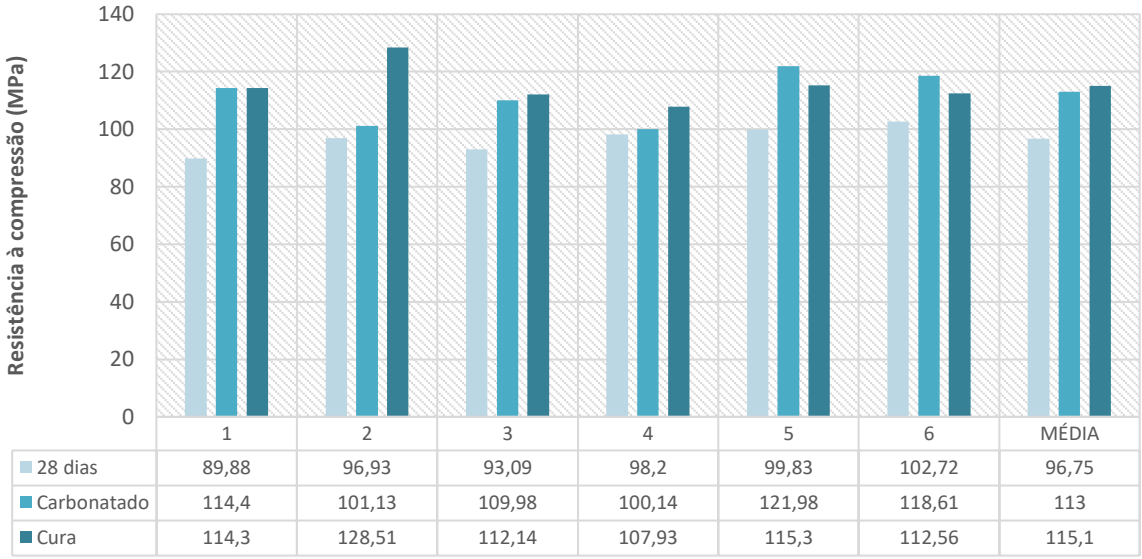
Em análise ao Quadro 15 pode-se verificar que existe diferença significativa comparando as médias das argamassas aos 28 dias com as médias das argamassas carbonatadas. Porém quando se compara as médias aos 28 dias com as da cura úmida e as médias carbonatadas com a cura úmida não existe diferença significativa.

Dessa forma verifica-se a relação entre a carbonatação e a resistência a compressão sendo possível observar um aumento na resistência a compressão nas amostras carbonatadas quando se compara com as amostras aos 28 dias e submetidas a cura úmida.

4.1.2 Argamassa de alta resistência

No Gráfico 3, é possível visualizar as resistências à compressão axial para os 6 corpos de prova nas 3 situações comparadas (28 dias, carbonatado e cura). Para tanto, é verificado que os valores obtidos no ensaio de compressão realizados nos corpos de prova de argamassa de alta resistência.

Gráfico 3 - Resistência à compressão - Argamassa de alta resistência



Fonte: A autora (2020).

Em análise ao gráfico 3, pode-se analisar que os corpos de prova em cura úmida apresentaram a maior média dos valores de resistência a compressão sendo essa média aproximadamente 16% maior comparando a média obtida pelos corpos de prova rompidos aos 28 dias e aproximadamente 2% maior em relação aos que estavam localizados dentro da câmara de carbonatação.

Apesar dos corpos de prova na cura úmida apresentarem maiores valores de resistência, pode-se analisar que em 28 dias também foram obtidos valores altos (média de 96,75 MPa).

Isso se deve ao fato de que o cimento utilizado CPV-ARI-RS tem características de apresentar valores altos de resistência inicial devido a sua composição, dado pelo baixo teor de adições em sua mistura, sendo formado basicamente por clínquer acrescidos de sulfatos de cálcio na proporção de porcentagem em massa de 90% a 100%.

Além do cimento o fato da mistura contar com baixo teor de a/c, adição mineral de sílica e aditivo superplastificante corroboraram para que as amostras atingissem valores altos de resistência a compressão.

Além disso, pode-se verificar que as resistências identificadas superaram o esperado de acordo com o método de dosagem utilizado de 65 MPa.

Na verificação e validação dos resultados obtidos das resistências encontradas foi verificado a partir da análise de variância ANOVA, Quadro 16 e teste de TUKEY.

Quadro 16 – ANOVA – Argamassa de alta resistência (compressão)

	Soma de Quadrados SQ		**Graus de Liberdade GDL**	**Médias Quadradas**		**F**	**Valor-p**
Blocos (entre grupos)	SQB	1113,87	(k-1) = 2	MQB	556,934	10,96	0,001167
Residual (dentro dos blocos)	SQR	762,535	(N-k) = 15	MQR	50,8357		
Total	SQT	1876,4	(N-1) = 17		0,00155		
Tabela de distribuição de F: Fα (k-1,N-k) = F0,05 (3,68)							

Fonte: A autora (2020).

O valor identificado para F neste caso foi de 10,96, sendo este maior do que o F crítico para 0,05 que é de 3,68 e o valor encontrado para p foi de 0,001167 sendo este menor do que o limite de 0,05, verificando que os resultados das médias encontradas são estatisticamente significativos.

O resultado da comparação dos pares de médias no teste de Tukey pode ser verificado no Quadro 17.

Quadro 17 - Teste de Tukey análise dos valores médios obtidos nas resistências a compressão argamassa de alta resistência

	A	**B**	**C**	**RESULTADO**
A		0,009117	0,001259	A≠B
B	4,901		0,5929	A≠C
C	6,304	1,403		B=C
A = 28 dias; B = Carbonatado; C = Cura úmida.				

Fonte: A autora (2020).

Em análise ao Quadro 17 constatou-se que existe diferença significativa comparando as médias das argamassas aos 28 dias com as médias das argamassas em cura úmida e carbonatadas. Porém quando se compara as médias carbonatadas com a cura úmida não existe diferença significativa.

4.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NOS CPS

Os corpos de prova permaneceram dentro da câmara de carbonatação acelerada por um período de 1 ano e 4 meses após a moldagem. Depois desse período foram retirados e realizados ensaios de compressão diametral (Figura 29) a fim de realizar a aspersão do indicador de pH para verificar a profundidade de carbonatação nos dois tipos amostras (argamassa autoadensável e de alto desempenho).

Figura 28 - Ensaio de compressão diametral

Fonte: A autora (2020).

Dessa forma, serão apresentados os valores encontrados de profundidade de carbonatação nos corpos de prova.

4.2.1 Argamassa autoadensável – medição dos pontos

Após o rompimento dos corpos de prova diametralmente, foi realizada a aspersão de fenolftaleína a fim de verificar a diferença de pH e analisar a profundidade de carbonatação dos corpos de prova (Figura 29).

Figura 29 - Teste do pH com fenolftaleína

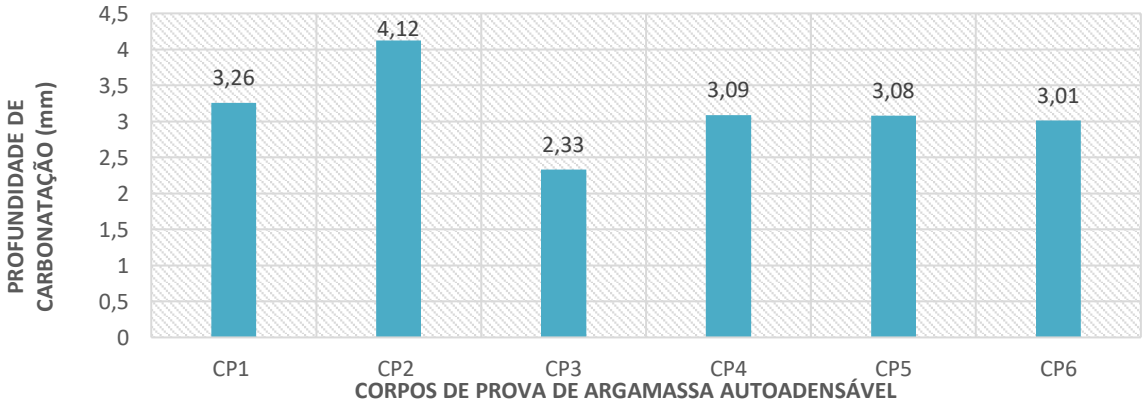
Fonte: A autora (2020).

Com a aspersão da fenolftaleína foi possível observar a profundidade da carbonatação nos corpos de prova de argamassa autoadensável, conforme Figura 29.

Deste modo, foram rompidos 6 corpos de prova e realizadas medições com paquímetro em 10 pontos de cada corpo de prova a fim de verificar a profundidade de carbonatação.

Como as medições foram realizados nas amostras rompidas diametralmente em cada metade foram realizadas 5 medições sendo duas delas na parte superior da amostra, uma em cada lateral e uma no fundo, assim em cada metade totalizando a medição de 10 pontos por corpo de prova. Todas as medições realizadas foram contabilizadas e para cada corpo de prova foi definido um valor médio de profundidade de carbonatação, esses valores foram compatibilizados no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Médias das medições da profundidade de carbonatação argamassa autoadensável.



Fonte: A autora (2020).

A média da profundidade de carbonatação nos corpos de prova de argamassa auto adensável foi de 3,14 mm e o desvio padrão identificado foi de 1,31 mm.

Verificando os valores encontrados de profundidade de carbonatação a partir da ANOVA, obteve-se os dados identificados no Quadro 18.

Quadro 18 – ANOVA – Argamassa autoadensável – (profundidade de carbonatação)

	Soma de Quadrados SQ		Graus de Liberdade GDL	Médias Quadradas		F	Valor-p
Blocos (entre grupos)	SQB	16,5348	(k-1) = 5	MQB	3,30697	2,115	0,07
Residual (dentro dos blocos)	SQR	84,435	(N-k) = 54	MQR	1,56361		
Total	SQT	100,97	(N-1) = 59		0,00155		
Tabela de distribuição de F: Fα (k-1,N-k) = F0,05 (2,336)							

Fonte: A autora (2020).

Nesse caso, como os valores encontrados foram diferenciados, o valor de F foi menor do que F crítico de 0,05 e o valor de p encontrado também é maior que o limite de 5%, sendo assim não existe diferença estatística.

Na análise dos pares de média pelo teste de TUKEY foi possível constatar os dados identificados no Quadro 19.

Quadro 19 - Teste de Tukey análise das médias da medição dos pontos carbonatos

	A	B	C	D	E	F	RESULTADO
A		0,6418	0,5615	0,9996	0,9995	0,9976	A≠B | A≠C | A=D | A=E | A=F
B	2,175		0,02642	0,4485	0,4375	0,3642	B≠A | B≠C | B≠D | B≠E | B≠F
C	2,352	4,527		0,7507	0,7609	0,8272	C≠A | C≠B | C≠D | C≠E | C≠F
D	0,4299	2,605	1,922		1	1	D≠B | D≠C | D=A | D=E| D=F
E	0,4552	2,63	1,897	0,02529		1	E≠B | E≠C | E=A | E=D| E=F
F	0,6322	2,807	1,72	0,2023	0,177		F≠B | F≠C | F=A | F=D| F=E
A = CP1; B = CP2; C = CP3; D = CP4; E = CP5; F = CP6.							

Fonte: A autora (2020).

Em análise ao Quadro 19 verificou-se que pela comparação dos pares de médias da medição da profundidade de carbonatação nos corpos de prova de argamassa autoadensável apenas os corpos de prova 2 e 3 são estatisticamente diferentes.

4.2.2 Argamassa de alto desempenho – justificativa e modelo matemático

Os corpos de prova de argamassa de alto desempenho não apresentaram profundidade de carbonatação, mesmo estando nas mesmas condições dos corpos de prova de argamassa autoadensável.

Na Figura 30 pode-se verificar a comparação da profundidade de carbonatação nos corpos de prova com os dois tipos de argamassa. O ensaio da verificação do pH com fenolftaleína foi realizado logo após a retirada das amostras da câmara de carbonatação acelerada (onde ficaram armazenadas por um período de 1 ano e 4 meses), onde foi verificado que os corpos de prova com argamassa de alto desempenho não carbonataram.

Figura 30 - Comparação da profundidade de carbonatação. Argamassa auto adensável e argamassa de alto desempenho

Fonte: A autora (2020).

Dessa forma verificou-se que na aspersão da fenolftaleína os corpos de prova de alto desempenho apresentaram cor carmim em sua totalidade, ou seja, apresentavam pH alcalino, não tendo sido afetado pelo fenômeno da carbonatação durante o tempo de exposição do horizonte deste trabalho. Logo, não foi necessário aplicar o método de realcalinização eletroquímica nestes corpos de prova.

Para compreender a não carbonatação dos corpos de prova de alto desempenho foram realizadas análises nos métodos matemáticos que calculam os valores da profundidade de carbonatação. Os métodos analisados foram o Clássico e Duracrete (POSSAN, 2010; YAZIGI, 2008).

4.2.2.1 Análise profundidade de carbonatação - Modelo Clássico

Utilizando a fórmula do modelo Clássico e substituindo os valores encontrados, tem-se os valores apresentados no Quadro 20.

Quadro 20 - Análise da profundidade de carbonatação – Modelo Clássico

ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO UTILIZANDO O MODELO CLÁSSICO					
ARGAMASSA AUTOADENSÁVEL		**ARGAMASSA ALTO DESEMPENHO**			
		ATUAL		**PARA ATINGIR ec = 3,14 mm**	
ec (mm)	3,14	ec (mm)	1	ec (mm)	3,14
t (anos)	1,33	t (anos)	1,33	t (anos)	1,33
k (mm/ano)	2,723	k (mm/ano)	0,86710997	k (mm/ano)	0,87
ec = 25 mm (para atingir a armadura)		ec = 25 mm (para atingir a armadura)		ec = 3,14 mm (para atingir a carbonatação autoadensável)	
ec (armadura)	25	ec (armadura)	25	ec (armadura)	3,14
t (anos)	84,3	t (anos)	831,25	t (anos)	13,11

Fonte: A autora (2020).

Em análise ao Quadro 20 pode-se verificar que a autoadensável demoraria 84,3 anos para que a carbonatação atingisse a armadura ocasionando a corrosão.

Considerando uma carbonatação hipotética de 1 milímetro nas argamassas de alto desempenho, para o tempo de exposição utilizado nesta dissertação, verificou-se que demoraria mais de 800 anos para que a carbonatação chegasse até a armadura.

Em comparação aos corpos de prova de alto desempenho e autoadensável pode-se verificar que para atingir os 3,14 mm (média carbonatada pelos corpos de prova autoadensáveis) os corpos de prova de alto desempenho demorariam mais de 13 anos para ser afetado pela mesma profundidade identificada nas amostras de argamassa autoadensáveis.

Dessa forma, o modelo clássico justifica a não carbonatação dos corpos de prova de alto desempenho. Para atingir carbonatação nestes corpos de prova, estes deveriam passar muito mais tempo em exposição aos gases responsáveis pela carbonatação.

4.2.2.2 Análise profundidade de carbonatação - Duracrete

Para a análise da profundidade de carbonatação de Duracrete (1999) alguns parâmetros foram definidos conforme Quadro 21.

Quadro 21 - Parâmetros para profundidade de carbonatação Duracrete

Coeficiente	Descrição	Argamassa autoadensável	Argamassa de alto desempenho ATUAL	Argamassa de alto desempenho P/ xc =3,14 mm
x_c	Profundidade de penetração de CO_2 (valor medido em laboratório, em m)	0,00314	0,001	0,001
x_{c*}	Profundidade de penetração de CO_2 até chegar na armadura (em m)	0,025	0,025	0,00314
$k_{C.CO_3}$	Fator relacionado com a cura[1]	1	1	1
k_{e,CO_3}	Fator ambiental[1]	1	1	1
$k_{t,CO_3.}$	Fator dependente do meio do ensaio[1]	1	1	1
D_{eff}	Coeficiente de difusão de CO_2 (valor calculado para o concreto real) m²/s [3]	$1{,}67x10^{-7}$	$1{,}7x10^{-8}$	$1{,}7x10^{-8}$
$Cs/_a$	Relação para equação do CEB [2]	$7x10^{-6}$	$7x10^{-6}$	$7x10^{-6}$
t	Tempo de exposição (em laboratório, em segundos)	41942880	41942880	41942880
t_0	Tempo de cura (em anos)	1	1	1
fck	MPa (obtido em laboratório)	23,7	96,8	96,8
n_{CO_3}	Fator de idade, depende do tempo de atuação da umidade relativa e da chuva[4]	0	0	0

[1] CEB (1996): $k_{C.CO_3}$, k_{e,CO_3}, $k_{t,CO_3.}$ 1 para cura boa e ambiente interno, 2 para cura ruim e ambiente interno e 0,5 cura boa e ambiente externo.
[2] CEB (1996)
[3] MEHTA; MONTEIRO (2014)
[4] YAZIGI (2008): O fator n_{CO_3} deve ser considerado zero para clima de laboratório.

Fonte: A autora (2020)

A partir dos parâmetros obtidos no Quadro 21, realizou-se o modelo matemático e obteve-se os resultados demonstrados no Quadro 22.

Quadro 22 - Resultados modelo DURACRETE

ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO UTILIZANDO O MODELO DURACRETE					
ARGAMASSA AUTOADENSÁVEL		ARGAMASSA ALTO DESEMPENHO			
		ATUAL		PARA ATINGIR xc = 3,14 mm	
xc (mm)	25	xc (mm)	25	xc (mm)	3,14
t (anos)	84,3	t (anos)	831,3	t (anos)	13,1

Fonte: A autora (2020)

Verificou-se que os valores encontrados no modelo matemático de Duracrete foram semelhantes ao modelo de profundidade Clássico sendo o tempo para profundidade de carbonatação entrar em contato com a armadura nas amostras de argamassa autoadensável igual a 84,3 anos.

Nos corpos de prova de argamassa de alto desempenho o tempo para a amostra atingir a mesma profundidade atual dos corpos de prova autoadensável seria de 13,1 anos e para a carbonatação atingir a armadura de 851,3 anos.

4.3 REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA

O método da realcalinização eletroquímica foi aplicado apenas nos corpos de prova de argamassa autoadensável, visto que, os de argamassa de alto desempenho não carbonataram.

Primeiramente os corpos de prova foram retirados da câmara de carbonatação acelerada, envoltos em uma camada de feltro geotêxtil, a malha metálica (aço inox, aço galvanizado ou alumínio), mais uma camada de feltro e envoltos por papel filme para garantir a saturação da amostra.

Após os corpos de prova preparados a solução foi colocada em um recipiente juntamente com os corpos de prova, conforme Figura 31.

Figura 31 – Demonstração do sistema montado

Fonte: A autora (2020).

O sistema foi montado com seis corpos de prova, ligados em série conforme mostrado na Figura 31, e então realizada a aplicação da corrente. A proposta foi a aplicação de uma corrente de 1A/m² no sistema, porém, devido a capacidade do equipamento essa corrente foi menor e para cada tipo de malha alcançou um valor máximo diferente tanto de corrente como de voltagem. Esses valores podem ser verificados no Quadro 23.

Quadro 23 - Relação corrente e voltagem alcançada

Tipo de malha	Área (m²)	Corrente (A)	Voltagem (V)
Alumínio	0,018	0,06	31,8
Inox	0,018	0,62	32
Galvanizada	0,018	0,02	31,9

Fonte: A autora (2020).

Os diferenciados valores de corrente obtidos nos sistemas com as malhas de alumínio, aço inox e aço galvanizado são ocasionados devido a diferente condutividade elétrica dos metais.

Os valores da condutividade elétrica dos metais utilizados no processo foram compilados no Quadro 24.

Quadro 24 – Condutividade elétrica dos metais utilizados como ânodo

Metal	Condutividade Elétrica $[(\Omega.\mathbf{m})^{-1}]$
Alumínio	$3{,}8\ x\ 10^{7}$
Aço inoxidável	$0{,}6\ x\ 10^{7}$
Aço galvanizado (zinco)	$6{,}2\ x\ 10^{7}$

Fonte: A autora (2020) – adaptado CALLISTER JUNIOR (1999).

Comparando os dados dos Quadros 23 e 24 pode-se verificar que a condutividade elétrica é uma propriedade inversamente proporcional a corrente, pois quanto maior o valor da condutividade elétrica, menor é a corrente encontrada neste sistema.

Pode-se atribuir essa diferença a condutividade elétrica da tela, pois os corpos de prova utilizados eram do mesmo material com a mesma resistividade para as três malhas diferentes.

A duração definida para o método foi de 7 dias para cada tipo de malha, porém o acompanhamento foi feito diariamente a fim de verificar a estabilidade na corrente.

O custo das malhas metálicas está identificado no Quadro 25. As malhas possuem abertura de 1,4 x 1,4 mm e fio 31.

Quadro 25 – Comparativo do custo das malhas metálicas

Tipo de Malha	Valor por m²
Alumínio	R$ 43,60
Aço inox	R$ 75,00
Aço galvanizada	R$ 37,00

Fonte: A autora (2020).

Deste modo, comparando os valores por m² de cada tipo de malha metálica observa-se que a malha de aço inox é a que apresenta o maior custo (mais da metade do valor da malha galvanizada), a malha de alumínio apresenta um valor intermediário e a aço galvanizado foi a que representou o menor custo entre as três malhas utilizadas.

4.3.1 Análise das malhas e resultados do processo

Na sequência será comentado sobre os resultados obtidos nos processos comparando a utilização das três malhas testadas durante o período de 7 dias do método da realcalinização eletroquímica nos corpos de prova de argamassa autoadensável.

4.3.1.1 Malha de alumínio

O processo foi realizado e as malhas de alumínio apresentaram alguns danos visíveis após a finalização da realcalinização eletroquímica. Tais danos podem ser observados nas Figuras 32 a, b e c.

Figura 32 – Malha de alumínio após realcalinização eletroquímica primeiro cp (a), último cp (b) e demais cps (c)

Fonte: A autora (2020).

Em análise aos resultados obtidos no método aplicado em 7 dias foi observada a integridade da malha metálica e a eficiência do procedimento.

No caso da realcalinização eletroquímica, realizada com o ânodo de malha metálica de alumínio, foi possível observar grande degradação nas malhas, principalmente nos corpos de prova que estavam no início e no final do sistema, conforme indicado nas Figuras 32 a, b e c.

Apesar das malhas do início e fim do sistema serem as mais danificadas (Figuras 32 a e b), pode-se verificar que as demais também (Figura 32.c) apresentaram danos e não poderiam ser reutilizadas, pois comprometeria os resultados de um novo sistema.

A malha de alumínio é considerada composta por metal puro com baixa resistência mecânica e essa característica se reflete nos resultados obtidos, visto que, as malhas foram consumidas durante o processo, e pode-se verificar que algumas delas apresentaram quebras em alguns pontos, demonstrando sua fragilidade mecânica.

Além disso, comprova-se que a malha de alumínio tem uma boa resistência à corrosão, pois não foram verificados pontos com oxidação nas malhas, somente pontos danificados pela junção da corrente aplicada com a solução eletrolítica (pontos esbranquiçados verificados nas Figuras 32 a, b e c.

Apesar das malhas não apresentarem boa resistência e quebrarem facilmente durante o processo, no resultado obtido na realcalinização eletroquímica os corpos de prova apresentaram um aumento de pH, retomando a alcalinidade da amostra, conforme Figura 33.

Figura 33 - Aspersão de fenolftaleína após a realização da realcalinização eletroquímica com malha de alumínio (comprovação do método pH alcalino)

Fonte: A autora (2020).

Esse fato foi comprovado no teste realizado com indicador de pH fenolftaleína, onde verificou-se que toda a área dos corpos de prova apresentou cor carmim, ou seja, pH alcalino, sem a presença de carbonatação, conforme observado na Figura 33.

Dessa forma, entende-se que o processo de 7 dias com a corrente de 0,06 A/m² aplicada pelo equipamento e com o ânodo de malha de alumínio obteve-se resultados positivos na repassivação das armaduras ocorridas pelo aumento do pH da amostra comprovado com a aspersão do indicador de pH fenolftaleína.

4.3.1.2 Malha de aço galvanizado

O mesmo procedimento aplicado para o sistema com ânodo de alumínio foi realizado para o ânodo de malha aço galvanizado, conforme Figura 34.

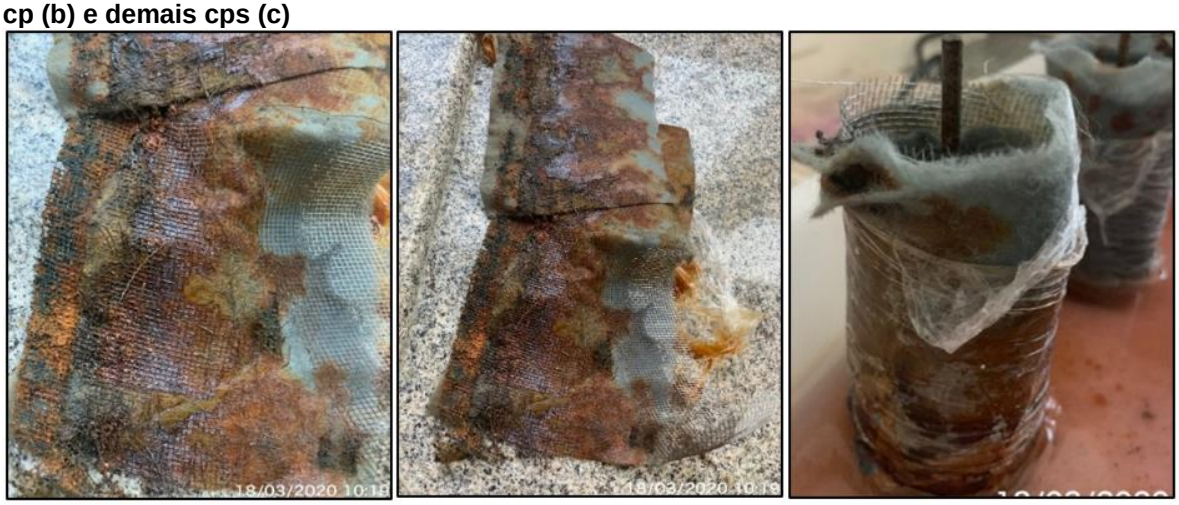
Figura 34 - Corrosão da malha de aço galvanizado

Fonte: A autora (2020).

No processo com a malha de aço galvanizado foi observado que a solução alcalina apresentou coloração rosada, podendo ser ocasionada por uma reação entre a solução e os componentes metálicos desta malha. Esse fato somente foi observado nesta malha.

Os resultados das malhas após o processo de realcalinização eletroquímica estão demonstrados nas Figuras 35 a, b e c.

Figura 35 - Malha de aço galvanizado após realcalinização eletroquímica primeiro cp (a), último cp (b) e demais cps (c)



Fonte: A autora (2020).

Analisando as malhas metálicas durante o processo podem-se verificar que a malha de aço galvanizado apresentou grande corrosão. Isso foi visível em todos os corpos de prova, onde a oxidação da malha foi manchou o feltro, que envolvia a malha, ficaram visíveis conforme Figura 35 a e b. Além disso, na solução eletrolítica também foi possível verificar a mudança de coloração devido a corrosão da malha de aço galvanizado.

A corrosão da malha fez com que sua resistência fosse fragilizada e com isso pode-se verificar que boa parte da malha apresentou quebra após a finalização dos 7 dias de aplicação da corrente. Essa quebra e fragilidade foi observada em todos os corpos de prova, em especial ao primeiro da montagem do sistema.

Apesar de uma das principais características do aço galvanizado ser a resistência a corrosão devido ao banho de zinco fundido, no caso da realcalinização eletroquímica a condição de aplicação da corrente contínua juntamente com a solução alcalina fez com que esta malha apresentasse corrosão e fragilidade após o processo, conforme Figuras 35 a, b e c.

Após o processo foi realizada a aspersão da fenolftaleína a fim de verificar o pH da amostra de acordo com a Figura 36.

Figura 36 – Corpo de prova após realcalinização eletroquímica com ânodo de aço galvanizado

Fonte: A autora (2020).

Além da deterioração da malha, em análise ao resultado da realcalinização eletroquímica pode-se verificar que alguns corpos de prova não obtiveram o aumento do pH esperado no processo. Isso foi verificado a partir do ensaio com aspersão de fenolftaleína onde foi possível analisar alguns pontos carbonatados (incolor), próximo a superfície dos corpos de prova, conforme Figura 36.

Ainda, em verificação a Figura 36 é possível observar nas laterais da amostra houve um pequeno aumento de pH, com alguns pontos incolor, isso se deve ao contato direto com o geotêxtil saturado de solução alcalina. Na parte superior do corpo de prova não foi possível verificar a realcalinização apresentando apenas a coloração incolor, sendo pH ácido.

O não aumento do pH na parte superior da amostra também pode ser resultado da corrente aplicada de 0,02 A/m², essa foi a máxima corrente permitida pelo equipamento para esta malha, sendo esta corrente relacionada com a condutividade elétrica deste metal. Comparado com as outras malhas, de acordo com o Quadro 24 essa foi a menor corrente aplicada.

Logo, a malha de aço galvanizado não trouxe os resultados esperados para aumento do pH da amostra durante os 7 dias de aplicação máxima de corrente permitida pelo equipamento.

4.3.1.3 Malha de aço inoxidável

O sistema montado com a malha de aço inox pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 - Coloração amarelada na montagem do sistema

Fonte: A autora (2020).

Em análise a malha de aço inoxidável no processo aplicado com as mesmas condições das malhas anteriores, pode-se observar que esta malha foi a que apresentou menor deterioração comparado as malhas de alumínio e aço galvanizado.

No sistema montado com malha de aço inoxidável notou-se uma coloração amarelada na solução alcalina (Figura 37), apesar desta coloração (indicando possivelmente corrosão) as malhas foram parcialmente consumidas e tiveram pouca deterioração durante o processo.

Outro fato analisado na utilização da malha de aço inox é que no último corpo de prova do sistema foi observado a presença de um produto de deposição de sais brancos, conforme Figura 38.

Figura 38 - Deposição de sais realcalinização eletroquímica com ânodo de aço inox

Fonte: A autora (2020).

Acredita-se que esse produto é resultado de uma reação do cromo presente na malha de aço inox, juntamente com a solução eletrolítica de carbonato de sódio e a corrente contínua aplicada, pois foi observado somente na utilização da malha de aço inox.

Outro fato observado foi que na utilização da malha de aço inoxidável no sistema obteve-se um maior valor de corrente, de acordo com a capacidade do equipamento, comparado aos valores de corrente obtidos nos sistemas com as malhas de alumínio e de aço galvanizado. Esses valores são justificados pela condutividade elétrica dos metais, valores esses demonstrado nos Quadros 23 e 24.

As malhas após o processo de realcalinização eletroquímica apresentaram o aspecto conforme as Figuras 39 a, b e c.

Figura 39 - Malha de aço iox após realcalinização eletroquímica primeiro cp (a), último cp (b) e demais cps (c)

Fonte: A autora (2020).

Apenas as malhas do primeiro e do último corpo de prova do sistema que apresentaram deterioração, conforme Figuras 39 a e 39 b, estando as demais intactas (Figura 39 c), podendo ser reutilizadas em outros sistemas, pois não foram consumidas durante o processo.

Além de apresentarem menor deterioração comparada com as malhas de alumínio e galvanizada, o método da realcalinização eletroquímica com ânodo de malha aço inox apresentou um aumento do pH do corpo de prova, sendo possível verificar esse aumento no ensaio realizado com fenolftaleína, conforme Figura 40.

Figura 40 - Aumento do pH após realcalinização eletroquímica com malha de aço inox

Fonte: A autora (2020).

Foram observados nos resultados dos processos realizados com os três tipos de malhas, que o aço localizado nos corpos de prova apresentou aspecto brilhoso onde tinha contato com a argamassa e também no local onde se localizava o conector da fonte durante a realcalinização eletroquímica, conforme Figuras 41 a, b e c.

Figura 41 - Aço após o processo de realcalinização (a), (b) e (c)

Fonte: A autora (2020)

Isso evidenciou a repassivação da armadura ocasionada a partir da troca dos íons hidroxila ocasionados pela eletrólise da água juntamente com a eletro-osmose da solução eletrolítica, conforme demonstrado nas Figuras 41 a, b e c.

Juntamente com a análise das malhas também foram realizados ensaios de absorção a fim de verificar a porosidade dos corpos de prova depois da realcalinização eletroquímica.

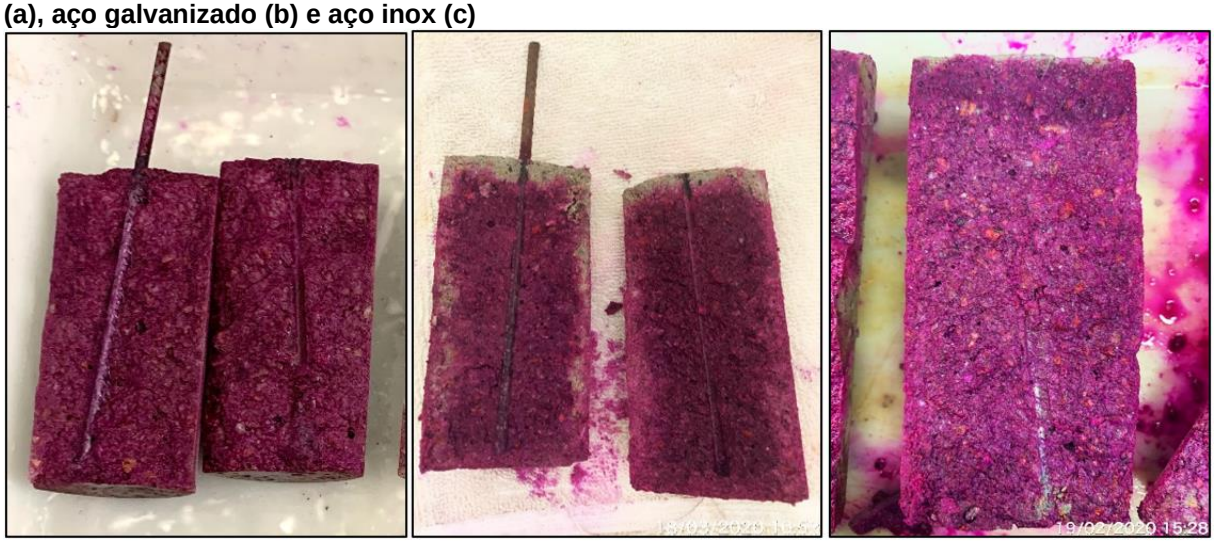
4.3.2 Caracterização dos tons violeta

Para verificar a profundidade de carbonatação foi utilizado indicado de pH de fenolftaleína diluída em 1% da solução com água destilada e álcool. A medição ocorre a partir da liberação dos íons H^+ e OH^- da solução e presente na argamassa.

No entanto pode-se observar que após o processo de realcalinização o aumento do pH foi verificado com o ensaio com diferenças de tonalidades.

Na Figura 42 é possível observar as amostras após a realcalinização eletroquímica com a aspersão da fenolftaleína sendo o processo realizado com malha de alumínio em (a), aço galvanizado em (b) e aço inox (c).

Figura 42 - Tons de violeta aspersão de fenolftaleína na realcalinização feita com malha alumínio (a), aço galvanizado (b) e aço inox (c)



Fonte: A autora (2020)

Para analisar os resultados observados na Figura 42 é apresentado na Figura 43 um indicador de coloração dos tons da timolftaleína e da fenolftaleína.

Figura 43 - Classificação dos tons da timolftaleína e fenolftaleína

	Valores de pH													
Timolftaleína														
Fenoftaleína														
	⇐14	⇐13	⇐12	⇐11	⇐10	⇐9	⇐8	⇐7	⇐6	⇐5	⇐4	⇐3	⇐2	⇐1

Fonte: (GRANATO, 2002).

Dessa forma analisando a escala de tons da Figura 43 e os resultados obtidos na aspersão da fenolftaleína da Figura 42 pode-se observar que a amostra em (a) utilizada malha de alumínio apresentou coloração mais escura do que do aço galvanizado em (b) e a de aço inox em (c).

Visualmente pode-se constatar que a amostra da Figura 42 (c) apresenta uma coloração viva, porém mais clara indicando um pH menor do que as outras amostras.

Sendo assim na análise visual contata-se que a amostra que apresentou maior aumento do pH foi a realcalinizada com a malha metálica de alumínio.

4.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

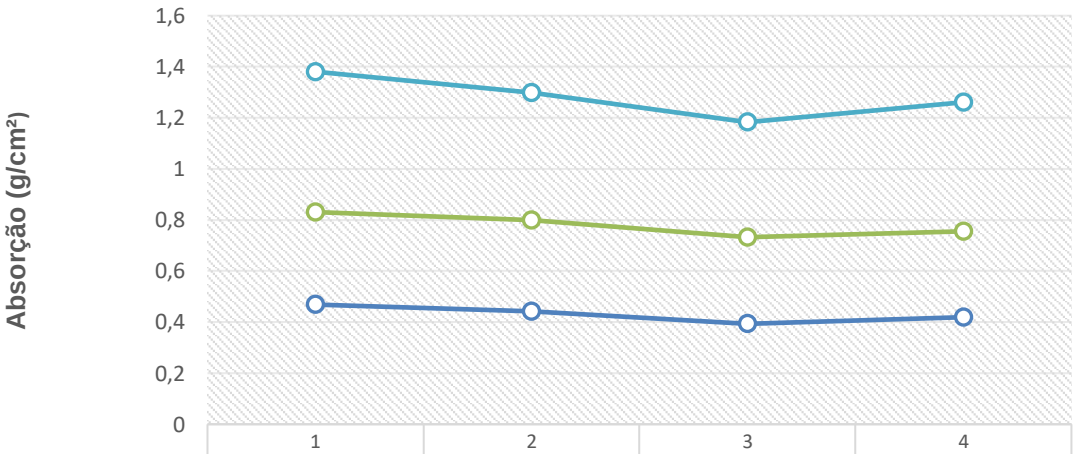
4.4.1 Argamassa autoadensável

A porosidade é uma das propriedades mais importantes no processo de carbonatação e realcalinização eletroquímica e serve como um indicativo a fim de verificar a funcionalidade do sistema.

Sendo assim, conforme descrito no método experimental, foram realizados ensaios de absorção por capilaridade com quatro corpos de prova em 3 situações para as amostras de argamassa autoadensável. Os ensaios de absorção por capilaridade compararam as situações de referência aos 60 dias, os corpos de prova carbonatados que estavam na câmara de carbonatação (após o período de 1 ano e 4 meses de exposição) e os realcalinizados testados após a finalização do processo.

Os procedimentos para obtenção da absorção em g/cm² foram realizados conforme as diretrizes da norma NBR 9779 (ABNT, 2012). Dessa forma os resultados das três situações foram compilados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Ensaio de absorção por capilaridade em corpos de prova de argamassa autoadensável



	1	2	3	4
Realcalinizado	0,549668874	0,499235863	0,450331126	0,504330107
Carbonatado	0,362200713	0,35710647	0,339276617	0,335710647
60 dias	0,468670402	0,442180336	0,393275599	0,420275089

Fonte: A autora (2020).

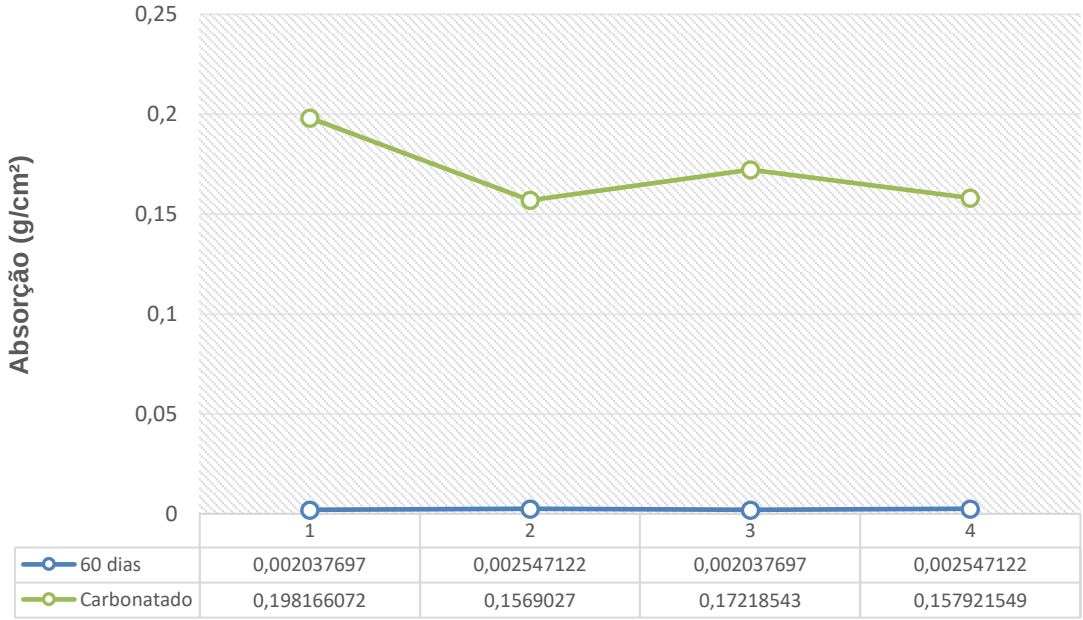
A diminuição da porosidade nos corpos de prova carbonatados pode ser verificada no Gráfico 5, onde esses corpos de prova ensaiados apresentaram os menores valores de absorção comparado com os de referência e os realcalinizados.

Em relação aos corpos de prova realcalinizados, a tendência do processo é que o valor da porosidade aumente após a aplicação da técnica (DYER, 2015 e GOYAL et al. 2018), fato esse pode ser observado no Gráfico 5 onde os valores apresentados de absorção nos corpos de prova realcalinizados foram maiores quando comparados com os demais.

4.4.2 Argamassa de alto desempenho

Apesar dos corpos de prova de alto desempenho não apresentarem carbonatação para a realização do método de realcalinização eletroquímica, foram realizados os ensaios de absorção a fim de verificar a porosidade dessas amostras nas situações de referência aos 60 dias e carbonatados, conforme verificado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Absorção por capilaridade – argamassa de alta resistência



Fonte: A autora (2020).

Foi possível verificar que os corpos de prova de argamassa de alto desempenho que estavam na câmara de carbonatação apresentaram um aumento na porosidade em relação aos corpos de prova de referência aos 60 dias. Mesmo observando esse a aumento de porosidade não foi observada carbonatação nessas amostras.

Comparando os resultados obtidos com absorção por capilaridade das argamassas de alto desempenho e autoadensável pode-se verificar que a porosidade nos corpos de prova de alto desempenho é inferior, podendo ser comparado os valores do ensaio de absorção entre os gráficos 5 e 6.

4.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO POR INTRUSÃO

Foram realizados ensaios de absorção por intrusão de mercúrio objetivando a verificação da porcentagem de porosidade nas amostras de argamassa autoadensável e de alto desempenho.

4.5.1 Argamassa autoadensável

Foram retiradas pequenas amostras dos corpos de prova de argamassa autoadensável para realização do ensaio de absorção por intrusão de mercúrio.

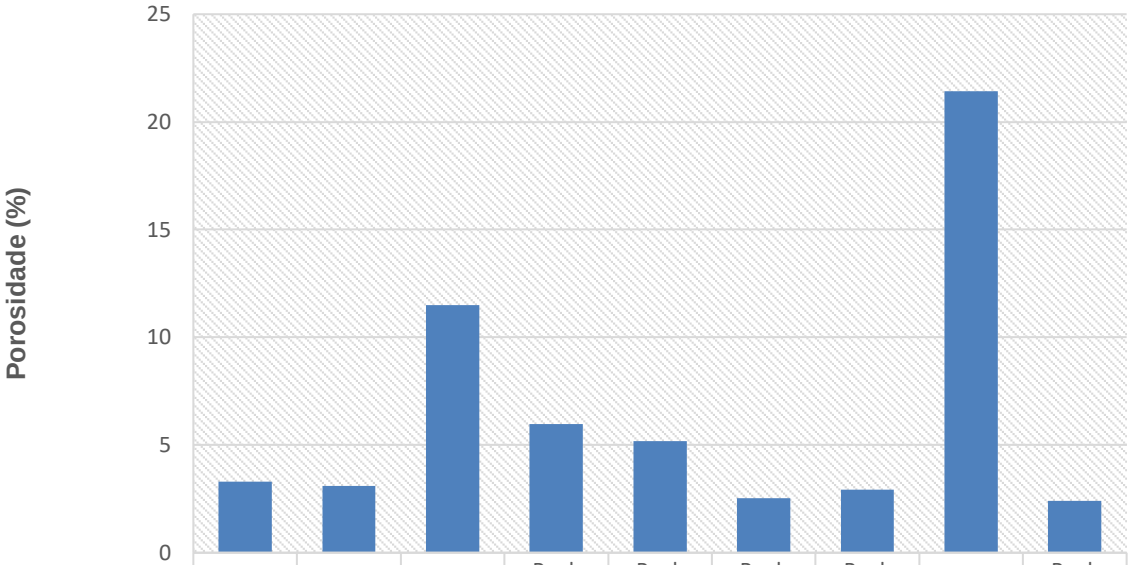
O ensaio foi realizado nas amostras de referência aos 60 dias, carbonatado e realcalinizado. Foram retiradas pequenas amostras próximas da superfície do corpo de prova e também do meio em contato com a armadura.

Os corpos de prova carbonatados, realcalinizados e que estavam na cura úmida estavam com idade de 1 ano e 4 meses.

Nos corpos de prova realcalinizados foram realizados ensaios de intrusão com amostras retiradas do meio, em contato com a armadura e da superfície, em contato com o ânodo.

Os resultados obtidos desta análise foram compilados no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Porosidade total - Intrusão de mercúrio (argamassa autoadensável)



	60 Dias	Carbona. Meio	Cura	Real. Sup. Alumínio	Real. Meio Alumínio	Real. Sup. Galva.	Real. Meio Galva.	Real.Sup. Inox	Real. Meio Inox
Porosidade (%)	3,29	3,106	11,5	5,98	5,18	2,53	2,92	21,42	2,41

Fonte: A autora (2020)

Observou-se que a porcentagem da porosidade aos 60 dias foi pequena e que a porcentagem da amostra carbonatada foi menor 5,6% que a referência aos 60 dias. Isso comprova a carbonatação na amostra, visto que esse fenômeno faz com que a porosidade da amostra seja menor Cincotto et al. (2010) e Dyer (2015).

Ainda, observou-se um aumento na porosidade na amostra que estava na cura úmida, isso se justifica pelo grau de hidratação do cimento durante o processo de cura.

Em relação as porcentagens identificadas nos corpos de prova realcalinizados pode-se verificar no Gráfico 7 que na malha de alumínio a amostra retirada da superfície apresentou um aumento de 13,7% na porosidade comparada com a porcentagem da amostra que estava no meio.

No ensaio com as amostras utilizando a malha de aço galvanizada no processo observou-se que a amostra do meio em contato com a armadura apresentou porcentagem de porosidade 13,4% maior do que na superfície, fato este que corrobora com as observações do não aumento do pH nas amostras utilizando este tipo de malha.

Analisando as amostras que foram utilizadas como ânodo a malha de aço inox é notório o aumento da porcentagem de porosidade na superfície, representando 888,8% a mais do que a porosidade da amostra localizada no meio do corpo de prova, em contato com a armadura.

O fato de a porcentagem de porosidade ser maior na superfície e menor no centro junto a armadura também foi observado por Castellote et. al (2006), e a diminuição próximo a armadura ocorre devido as reações da portlandita e da calcita.

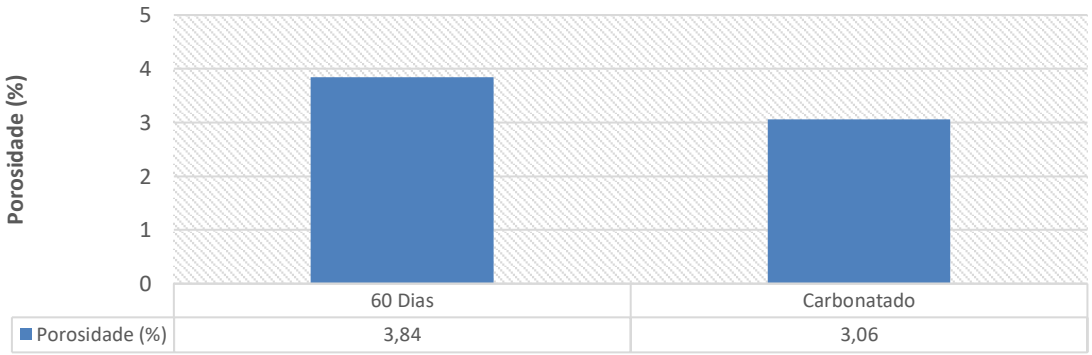
No processo com o polo positivo conectado a malha metálica o campo elétrico faz com que calcita da carbonatação seja dissolvida liberando assim os íons Ca+ conduzidos pelo campo elétrico em direção ao eletrodo negativo. Com isso quando o pH aumenta ocorre a precipitação da portlandita iniciando pela armadura e se espalhando para toda a amostra.

Dessa forma ocorre o aumento da porosidade durante o processo de realcalinização eletroquímica principalmente nas amostras localizadas próximo a superfície que estavam em contato com o polo positivo e a diminuição dos poros capilares próximo a armadura onde estava conectado o polo negativo devido a precipitação das novas fases da portlandita e calcita ocasionada pela ação do campo elétrico juntamente com a solução alcalina.

4.5.2 Argamassa de alta resistência

Nas quatro amostras de argamassa de alta resistência foi verificada uma pequena diminuição na porosidade dos corpos de prova carbonatados, comparado aos demais, conforme previsto na literatura. Essa análise pode ser visualizada no Gráfico 8, a seguir.

Gráfico 8 - Porosidade total - ensaio intrusão de mercúrio (argamassa de alto desempenho)



Fonte: A autora (2020).

Apesar da porosidade ter diminuído nos corpos de prova carbonatados, não foi observada nenhuma profundidade de carbonatação nos corpos de prova com a realização do ensaio de aspersão da fenolftaleína.

Em comparação aos Gráficos 7 e 8 foi possível verificar que a argamassa de alto desempenho apresentou uma porcentagem de porosidade de 14,3% a mais do que a argamassa autoadensável aos 60 dias, essa diferença está relacionada com os fatores a/c e adição de sílica ativa na mistura da argamassa de alto desempenho.

5 CONCLUSÕES

Foram confeccionados 108 corpos de prova sendo 54 de argamassa autoadensável e 54 de argamassa de alta resistência. A maioria deles foram submetidos a câmara de carbonatação acelerada, 12 amostras foram levadas até o tanque de cura úmida e outros foram utilizados para ensaios de resistência a compressão aos 28 dias. O objetivo da câmara de carbonatação acelerada era que os corpos de prova fossem submetidos a uma alta quantidade gás carbônico para que carbonatassem e então fosse possível a realização do processo de realcalinização eletroquímica com o objetivo de repassivar a armadura aumentando o pH da amostra.

Após um período de 1 ano e 4 meses de exposição na câmara de carbonatação acelerada os corpos de prova foram rompidos diametralmente para verificação da profundidade de carbonatação com aspersão de fenolftaleína. Foram constatados que apenas os corpos de prova de argamassa autoadensável carbonataram o suficiente para a realização do método da realcalinização eletroquímica, então se deu início aos processos.

A fim de verificar a profundidade de carbonatação das amostras foram realizadas duas análises matemáticas com os modelos Clássico e Duracrete. Nesta análise foi verificado que para os corpos de prova de alta resistência atingirem uma carbonatação de 25 mm (sendo o meio da amostra em contato com a armadura) seriam necessários 831 anos de exposição ao CO_2.

Sabendo que os corpos de prova de argamassa autoadensável atingiram uma média de 3,14 mm de profundidade de carbonatação para que os corpos de prova de alta resistência atingissem essa mesma profundidade seriam necessários pelo menos 13 anos de exposição.

A profundidade média de carbonatação dos corpos de prova de argamassa autoadensável foi obtida na medição das amostras rompidas diametralmente, com aspersão de fenolftaleína após 1 ano e 4 meses de exposição com concentração de 8,29% de CO_2 na câmara de carbonatação acelerada. A partir da observação desta profundidade e quantificação da profundidade de carbonatação foram iniciados os processos de realcalinização eletroquímica nessas amostras.

No processo de realcalinização eletroquímica foi analisado a eficiência do método com as três malhas utilizadas através da aspersão de indicador de pH e ensaios de absorção e porosimetria.

Analisando as malhas metálicas foi verificado que as mais deterioradas estavam localizadas no primeiro e no último corpo de prova do sistema, isso devido a aplicação da corrente em série. Foram montados três sistemas em série (sendo um para cada malha metálica), com seis corpos de prova em cada um, com aplicação de corrente máxima pela fonte e duração de 7 dias de processo.

Após o processo pode-se verificar que a realcalinização eletroquímica utilizando o alumínio como ânodo apresentou um aumento do pH da amostra, comprovado com o teste de fenolftaleína, isso pois o alumínio é um material durável e resistente a corrosão.

No sistema montado com a malha de aço galvanizado foi verificado que os resultados observados foram os piores comparando com as outras duas malhas, pois na realização do teste de pH com a fenolftaleína foi possível verificar a presença de carbonatação nas amostras (não aumentando o pH). Além disso, a malha de aço galvanizado apresentou grande degradação após a aplicação da técnica.

A malha de aço inox apresentou pouca deterioração no primeiro e no último corpo de prova do sistema, e nos demais a malha manteve-se intacta podendo ser reutilizada. Além disso, foi observado com a fenolftaleína que os corpos de prova tiveram um aumento do pH, obtendo a repassivação da armadura.

No ensaio por intrusão de mercúrio observou-se a porcentagem da porosidade nas amostras retiradas na superfície do corpo de prova e no meio em contato com a armadura. Dessa forma foi constatado que nas amostras com malha de alumínio houve um pequeno aumento na porosidade superficial de 13,7% comparado com a amostra do meio do corpo de prova, a malha de aço galvanizado apresentou maior porosidade no meio do que na amostra superficial e a de aço inox apresentou um aumento de 888,8% de aumento na amostra superficial comparado com a amostra do meio.

Assim, avaliando os dados do ensaio de porosimetria juntamente com a caracterização de tons da fenolftaleína pode-se observar que a malha de alumínio apresentou um tom mais escuro na aplicação da fenolftaleína, indicando um grande

aumento de pH, porém no ensaio de porosimetria foi identificado um aumento de 13,7% na porosidade superficial em comparação com o meio da amostra.

Os tons observados na amostra da realcalinização eletroquímica da malha de aço inox foram mais claros, indicando um pH próximo de 9, em contrapartida no ensaio de porosimetria observou-se um aumento de 888,8% na amostra superficial, estando em conformidade com a literatura onde demonstra que a porosidade após a realcalinização eletroquímica é maior quando comparadas as amostras carbonatadas.

Dessa forma, nos sistemas montados com malhas de alumínio e inox pode-se verificar que houve aumento do pH dos corpos de prova. Sabendo que esses materiais apresentam uma grande diferença de valor, sendo a malha de aço inox quase o dobro do valor da de alumínio é necessário analisar o problema para definir o que melhor se aplica em cada situação, sendo a de inox mais durável quando comparada com a de alumínio.

Apesar da malha de aço galvanizado não apresentar aumento no pH das amostras dos experimentos realizados neste trabalho a mesma já foi utilizada por outros pesquisadores e pode ser eficaz em outras situações, devendo sua utilização ser testada com variações nos itens do processo (como testes na corrente, duração do método e outros).

Por fim, é válido salientar que a técnica da realcalinização eletroquímica pode ser aplicada como forma preventiva nas estruturas, não devendo ser aplicada em casos onde a corrosão está agravada. Além disso é recomendável que após a aplicação da técnica na estrutura seja realizada a proteção com pintura de proteção ou impermeabilização, o atrasaria um novo processo de carbonatação.

Também é recomendado que seja realizada manutenção preventiva nesta proteção, observar a possível presença de manifestações patológicas e realizar as devidas manutenções a fim de garantir a vida útil dos resultados da técnica.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise do processo de realcalinização eletroquímica utilizando as malhas de aço inox, alumínio e galvanizada variando a quantidade de dias de duração da técnica (sugestão 3, 7, 10 e 15 dias).

- Análise do processo de realcalinização eletroquímica variando diversos traços de concreto.
- Análise do processo de realcalinização eletroquímica variando a corrente aplicada realizando o teste com 1, 3 e 6 corpos de prova para verificar a eficiência do aumento do pH.
- Análise do processo de realcalinização eletroquímica utilizando a montagem do sistema em paralelo.
- Realização do processo de realcalinização eletroquímica testando as variáveis água/cimento da amostra, tipo de malha, tipo de circuito (em série e paralelo) e análise de medidor de pH nas amostras a fim de observar o tamanho dos poros e os elementos químicos da amostra.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, A. M. et al. Study of a repair technique in carbonated blended mortars: Electrochemical re-alkalization. **Dyna**, v. 83, n. 196, p.93-99, 20 abr. 2016. Universidad Nacional de Colombia. DOI: http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n196.49249.

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, dez. 2018. Elsevier BV. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.195.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000.

ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; CÁNOVAS, M.F. Composicion y dosificación de hormigones de alta resistencia. **Cemento y Bormigon**, n. 709, p. 971-990, ago. 1992.

ALBUQUERQUE, R. T. O.; LIMA, N. L. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida**, Rio de Janeiro, p.57-64, dez. 2014.

ALBUQUERQUE, D. Á. M. **O USO ANORMAL DA PROPRIEDADE PRIVADA IMÓVEL NO MUNICÍPIO DE FORTALEZA**. 2019. 70 f. Monografia (Especialização) - Curso de Direito, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Trad. e adaptação de Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, PINI, 1992, 104p.

ANDRADE, J. J. **Contribuição à previsão de vida útil de estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras**: iniciação por cloretos. 2001. 277 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

ANDRÉ, Ruben Filipe Contente. **Reparação de estruturas de betão armado afetado pela carbonatação do betão e corrosão das armaduras**. 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2013.

AMARAL FILHO, E. M. **Concreto de alta resistência (1ª parte)**. Revista IBRACON, ano II, n.4, p. 40-49, junho. 1992a.

AMARAL FILHO, E. M. **Concreto de alta resistência (2ª parte)**. Revista IBRACON, ano II, n.5, p. 52-59, setembro. 1992b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4404-10**. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore. Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion. Porosimetry. West Conshohocken: ASTM, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **15823**: Concreto Autoadensável. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável Parte 1 – Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8653**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BABU, G. K.; PRAKASH, P. V. S. Efficiency of silica fume in concrete. **Cement and Concrete Research,** V. 25, no. 6, p. 1273-1283, 1995.

BAUER, L.; DIAS, J. F. **Materiais de Construção 2.** 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009. 543 p.

BERGMANN, A. C.; SAVARIS, G.; BALESTRA, C. E. T.; BRESSIANI, L. CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS E CONVENCIONAIS: análise das propriedades em estado fresco e endurecido. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 167-178, 12 maio 2020. Universidade Federal de Goias. http://dx.doi.org/10.5216/reec.v15i2.50695.

BERTEQUINI, A. B. T. et al. ESTUDO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA. **Revista Engenharia em Ação Unitoledo**, Araçatuba, v. 4, n. 2, p. 18-31, dez. 2019.

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, n. 4, p.376-385, set. 2008. Elsevier BV. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.006.

BERTOLINI, L.; SPAGNOLO, S. L.; REDAELLI, E. Electrochemical Realkalization as a Conservation Technique for Reinforced Concrete. **International Journal of Architectural Heritage**, [s.l.], v. 6, n. 2, p.214-227, mar. 2012. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2010.528147.

BOSILJKOV, V. B. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research**, n. 33, p.1279-1286, 2003.

BRITISH STANDARD. **7543**: Guide to durability of buildings and building elements, products and componente. Londres: Bsi Standards Limited, 2015.

CALADO, C. et al. Self-Compacting Concrete and Conventional Concrete in the Arena Pernambuco: Comparative Study of Durability Indicators and Economic Feasibility. **Romanian Journal Of Materials.** Recife, p. 402-410. jan. 2015.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais:** Uma introdução. 5. ed. Salt Lake City: Ltc, 1999. 623 p.

CASCUDO, O. M. **O controle da corrosão de armaduras em concreto:** inspeções e técnicas eletroquímicas. 1 ed. Goiânia – GO: Pini, 1997. 237 p.

CASTELLOTE, M et al. In-situ monitoring the realkalinisation process by nêutron diffraction electroosmotic flux and portlandite formation, **Cement Concrete Research**, v. 36, n. 5, p. 791-800, may. 2006.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, [s.l.], v. 54, n. 331, p.309-318, set. 2008. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132008000300007.

CAVALCANTI, A. N.; CAVALCANTI, G. A. D. Inspeção técnica do píer de atracação de Tambaú. **Revista Concreto**, n. 57, pg. 45-57, 2010.

CEN - COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **14038-1**: Electrochemical realkalization and chloride extraction treatments for reinforced concrete -Part1: Realkalization. Dublin: Nsai Standards, 2016.

CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **14630.** Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. Brussels, Belgium, 2006.

CINCOTTO, M. A. et al. O efeito da carbonatação na porosidade de argamassas de cimento, cal e cimento:cal. In: **Congresso Português De Argamassas De Construção**, 3., 2010, Lisboa: Ipt, 2010. p. 1-11.

COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **192**: Diagnosis and Assessment of Concrete Structures. Lausanne, 1992.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Vol. I. ed. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 1997. 401 p.

COSTA, A. C. S. de S.; CABRAL, A. E. B. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 289-301, out./dez. 2019. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000400356

CUNHA, A.C.Q.; HELENE, P.R.L. Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação. **Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo** – BT/PCC/283. São Paulo, 2001.

CUPERTINO, D.; BRANDSTETTER, M. C. G. O. Proposição de ferramenta de gestão pós-obra a partir dos registros de solicitação de assistência técnica. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, p. 243-265, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000400049

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 Ed. São Paulo: abm, 2012.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microssílica**. São Paulo, 1995. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DAL MOLIN, D. C. C. et al. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 37-49, jun. 2005.

DALMOLIN, D. C. C. **Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1, cap. 08 pg. 233-260, São Paulo, 2011.

DAMAS, Alexandra Pinto. **Estudo de confiabilidade no projeto de pilares esbeltos de concreto de alta resistência.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DIAMOND, S. Methodologies of PSD Measurements in HCP: Postulates, Peculiarities, and Problems. **MRS Symposium Proceedings**, v. 137, p. 9-83, 1989.

DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. **Rem**: Revista Escola de Minas, [s.l.], v. 62, n. 3, p.399-408, set. 2009. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672009000300021.

DYER, T. **A durabilidade do concreto.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2015. 515 p.

EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete**. United Kingdom, 2005.

FIGUEIREDO, E.J.P. **Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura Contra a Corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas** – Contribuição ao Estudo de Reparo de Estruturas de Concreto Armado. 423 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

FURQUIM, P.R.V. **Estudo Estatístico de Produção de Concretos com Adições Minerais**. Universidade Federal de Santa Maria (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Materiais de Construção). Santa Maria, 2006.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural.** São Paulo: Pini, 2008. 184 p.

GARRABRANTS, A. C.; KOSSON, D. S. Modeling Moisture Transport from a Portland Cement-Based Material During Storage in Reactive and Inert Atmospheres. **Drying Technology**, [s.l.], v. 21, n. 5, p.775-805, 7 jan. 2003. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1081/drt-120021686.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e Científicos Editora S.A., 2011.

GOODIER, C. I. Development of self-compacting concrete. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. **Structures & Buildings**, 156, p. 405-414, 2003.

GONÇALVES, A.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. **Procedimientos de reparaciíon y protección de armaduras. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón**. São Paulo: Paulo Helene e Fernanda Pereira, 2003.p. 341-376.

GONZÁLEZ, F. et al. Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete: an Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion. **International Journal of Electrochemical Science.** p. 367-378. fev. 2011.

GONZÁLEZ, J.a. et al. On the effectiveness of realkalisation as a rehabilitation method for corroded reinforced concrete structures: Zur Wirksamkeit der Realkalisierung als Instandsetzungsmethode fuÈ r korrodierte Stahlbetonbauwerke. **Materials and Corrosion.** Weinheim, p. 97-103. jan. 2000.

GOYAL, A. et al. A Review of Corrosion and Protection of Steel in Concrete. **Arabian Journal for Science and Engineering.** Saudi Arabia, p. 5035-5055. maio 2018.

GRANATO, J. E. Patologia das Construções. 2002

HORNBOSTEL, K. et al. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 60-72, maio 2013. Elsevier BV. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019.

HELENE, P. R.; LEVY, S. **Boletim Técnico – Cura do Concreto**. Mérida, México: ALCONPAT, 2013. 12 p. Disponível em: <http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/B8-Cura-do-concreto.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2020.

HELENE, P. R. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, São Paulo, p. 905-944, jan. 2010. Semestral.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13823**: General principles on the design of structurefor durability. Geneva: Iso Copyright Office, 2008.

ISAIA, G. C. et al. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 2, p.233-252, jun. 2017. FapUNIFESP (SciELO). DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000200155.

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, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 19-30, 2004.

JASNIOK, M.; ZYBURA, A. MODELLING THE CARBONATED CONCRETE REALKALIZATION. **Journal of Civil Engineering and Management**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.159-168, 30 jun. 2009. Vilnius Gediminas Technical University. http://dx.doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.159-168.

KAZMIERCZAK, C.S., **Contribuição para análise de eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção**

contra a carbonatação. 1995. 168p. Tese (Doutorado) -CPGECC, Escola Politécnica de São Paulo – USP, São Paulo.

LACERDA, E. et al. Monitoring the carbonation front progress in a cementitious composite having its pore structure analyzed through μ-CT imaging. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.653-668, jun. 2017. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952017000300006.

LEEMANN, A.; MORO, F. Carbonation of concrete: the role of CO2 concentration, relative humidity and CO2 buffer capacity. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 50, n. 1, p.30-50, 10 ago. 2016. Springer Nature. http://dx.doi.org/10.1617/s11527-016-0917-2.

LENCIONI, J, W,; LIMA, M, G,. **Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto–Estado-da-Arte**.VI Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas. Córdoba, Argentina, 2010.

LOURENÇO, Z. Proteção catódica de estruturas de betão armado. **Revista Corrosão e Proteção de Materiais**, Vol. 26 N.º 3, p. 79-85, 2007.

LÜBECK, A.; **Resistividade Elétrica de Concretos de Cimento Portland Branco e Elevados Teores de Escória de Alto Forno**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TEIXEIRA, M. C. et al. Estudo da realcalinização eletroquímica em corpos de prova de concreto. In: Congresso Brasileiro Do Concreto, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais.** Foz do Iguaçu: Ibracon, 2018. p. 1 - 9.

MARTÍNEZ, I. et al. Advancements in non-destructive control of efficiency of electrochemical repair techniques. **Corrosion Engineering, Science And Technology**, [s.l.], v. 44, n. 2, p.108-118, abr. 2009. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1179/174327808x286266.

MAINIER, F. B.; SANDRES, G. C.; TAVARES, S. S. M. Corrosão por sulfeto de hidrogênio (H2S) e suas implicações no meio ambiente e na segurança industrial. In: Congresso Iberoamericano De Engenharia Mecanica, 8., 2007, Cusco. **Anais.** Cusco: Feibim, 2007. p. 15 - 37.

MALHOTRA, V. M. Fly ash, slag, sílica fume, and rice-hush ash in concrete: a review. **Concrete International,** V. 15, no. 4, p. 23-28, apr., 1993.

MENEGON, R. O.; NEVES JUNIOR, A. Estudo do Uso da Carbonatação Acelerada em Pastas de Cimento Portland Usando Resíduos de Diatomita Recuperados. **E&s - Engineering And Science**, Barra do Bugres, v. 1, n. 7, p. 15-29, out. 2018.

MANUEL, P. J. M. **Estudo da influência no teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis.** 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFGRS, Porto Alegre, 2005.

MEDEIROS, M. H. F. de. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. **Revista de Engenharia Civil**, São Paulo, p.55-64, dez. 2001.

MEDEIROS, M. H. F.; GROCHOSKI, M. Marquises: por que algumas caem? **Revista Concreto**, Manaus, v. 0, n. 0, p.95-103, jun. 2008.

MEDEIROS, M. H. F. *et al*. Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 864-885, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952017000400005.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** Microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MERAH, A.; KROBBA, B. Effect of the carbonatation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 148, p.874-886, set. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.098

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

MIETZ, I.J. Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures. **European Federation of Corrosion Publications**, n. 24, 1998.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 56, p.153-170, fev. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015.

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras.** 2002. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete.** 5th ed., 2011.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 466 p.

NUNES, S. et al. SCC and Conventional Concrete on Site: property assessment. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 2, n. 1, p. 25-36, mar. 2009.

NUNES, S. C. B. **Betão auto compactável:** Tecnologia e Propriedades. 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto Faculdade de Engenharia, Porto, 2001.

OKAMURA, H. Self-compacting High-performance concrete. **Concrete Internacional**, v.19, p. 50-54, julho, 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of advanced concrete technology**, v.1, n.1, p. 5-15, 2003.

PETRUCCI, E. G. R., **Concreto de cimento Portland**. São Paulo, 1998.

PIRES, P.F. **Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais**. 2016. 144 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia, 2016.

POCOCK, D. **Chloride extraction and realkalisation** — Six years on. Corrosion and Protection of Reinforced Concrete. Dubai, 1994.

PONIKIEWSKI, T.; GOIASZEWSKI, J. The influence of high-calcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high-performance selfcompacting concrete. **Journal of Cleaner Production.** Gliwice, p. 212-221. fev. 2014.

POPOV, B. N. **Corrosion Engineering:** Principles and Solved Problems. Columbia: Elsevier, 2015.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. DESEMPENHO, DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS EDIFICAÇÕES: ABORDAGEM GERAL. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Curitiba, p. 1-14, out. 2013. Quadrimestral.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. Tese de doutorado (Doutorado em engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

RAMACHANDRAN, V.S. et al. **Superplasticizers:** properties and applications in concrete. CANMET, Ottawa, 1998.

RAMPRADHEEP S. G.; SIVARAJA, M. Experimental Investigation on Self-Compacting Self-Curing Concrete Incorporated with the Light Weight Aggregates. **Brazilian Archives Of Biology And Technology**, [S.L.], v. 59, n. 2, p. 1-11, 2016. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2016161075.

REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Resistance to carbonation of concrete after re-alkalization by absorption of sodium carbonate solution. **Studies In Conservation**,

[s.l.], v. 61, n. 5, p.297-305, 4 abr. 2016. Maney Publishing. http://dx.doi.org/10.1179/2047058415y.0000000011.

REPETTE, W. L. **Concreto autoadensável**. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 2, p. 1769-1806.

REUS, G. C. et al. Aplicação de soluções alcalinas para realcalinização de concretos carbonatados: uma alternativa para pontes de concreto armado. In: **Anais** do 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária - ENACOR, Foz do Iguaçu, 2015.

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

RIBEIRO, P.H.L.C. et al. Electrochemical realkalisation of carbonated concretes – Influence of material characteristics and thickness of concrete reinforcement cover. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 40, p.280-290, mar. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.076.

RILEM. **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. TC56-CPC 18, 1988.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H. JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa – Cerâmicas** v. 54, p 456-461, 2008.

SAHAL, M. et al. Durability of Impressed Current Realkalization Treatment Applied on Reinforced Concrete Slabsafter 5 Years. In: **Anais** do XII INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY MATERIALS AND COMPONENTS. Porto: DBMC, 2011. p. 1-9.

SAVARIS, G. et al. **Análise experimental da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável**. Revista IBRACON, São Paulo, v. 12, n. 6, p. 1316-1326, 2019.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. atual. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida.** 2007. Tese (Doutorado). Universidade de São Carlos, São Carlos, 2007.

SINGH, N; SINGH, S P. Reviewing the Carbonation Resistance of Concrete. **Journal of Materials and Engineering Structures.** Tizi-ouzou, p. 35-57. mar. 2016.

SIQUEIRA, M. V. et al. Análise de carbonatação e corrosão por íons cloreto em uma passarela da zona oeste do recife. In: **Conferência Nacional De Patologia E Recuperação De Estrutura**, 1., 2017. Recife: CONPAR, 2017. p. 1 – 11.

SITTER, W. R. Costs for Service Life Optimization. The “law of fives”. In: **CEB-RILEM Durability of concrete structures**. Proceedings of the International Workshop held in Copenhagem on 18-20 May, 1984.

SOARES, A. P. F.; VASCONCELOS, L. T.; NASCIMENTO, F. B. C. CORROSÃO EM ARMADURAS DE CONCRETO. **Cadernos de Graduação**, Maceió, v. 3, n. 1, p.177-188, nov. 2015.

SONEBI, M. Medium strength self-compactingconcrete containing fly ash: Modelling using factorialexperimental plans. **Cement and concrete research**, 2004.

TAKADA, K. **Influence of admixtures and mixing efficiency on the properties of self compacting concrete: the birth of self compacting compacting concrete in Netherlands.** Delft, 2004. 220p. Tese (Doutorado) - Delft University of Technology, The Netherlands.

TONG, Y. et al. Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete — Part 1: Sacrificial anode process. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 42, n. 1, p.84-94, jan. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.008.

TOTTEN, E. G.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of Aluminum**. Volume 1: Physical Metallurgy and Processes. 2003.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2015.

TUTIKIAN, B. F. et al. Viabilidade Técnica e Econômica do Concreto Auto-Adensável em Empresas de Pré-Moldado. **Concreto & Construções**, v. 34, n. 43, p. 30-35, jun./ago. 2006.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, Florianópolis: IBRACON, 2011.Cap 12.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. **Concreto:** Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 36.

THOMAZ, E. **Requisitos técnicos e operacionais visando a qualidade na construção de edifícios**. 1999. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

VESIKARI, A. S. **Durability Design of Concrete Structures.** Espoo: Rilem, 2014.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonation in concretes with recycled concrete aggregates. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p.213-228, jun. 2011.

XAVIER, B. C. **Comparação do concreto autoadensável com adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito com o concreto autoadensável convencional.** Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de tecnologia - UNICAMP. Limeira. 2019.

XIONG, Y.; DENG, S.; WU, D. Experimental Study on Compressive Strength Recovery Effect of Fire-damaged High Strength Concrete after Realkalisation Treatment. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 135, p.476-481, 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.158.

YAZIGI, R. **Avaliação de Carbonatação em viadutos em Concreto Armado**. 2008. 185p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

YEIH, W.; CHANG, J.J. A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete. **Construction and Building Materials**. n. 19, p.516-524, 2005.

APÊNDICE A

Dosagem dos traços utilizados a partir do método ABCP

Para fck 25 MPa:

Consumo de areia: 1663,8 kg/m³
Fator a/c: 0,65
Consumo de cimento: 354 kg/m³

Traço: 1:4,7:0,65:0,08

Para fck 60 MPa:

Consumo de areia: 1625 kg/m³
Fator a/c: 0,4
Consumo de cimento: 438 kg/m³

Traço: 1:0,1:3,7:0,4:0,15

ANEXO I – DADOS SÍLICA ATIVA

Bettersize™

Bettersizer S3 Plus Particle Size Analysis Report

Range : 0.01um - 3500um

Sample Name:Sílica-Average	Sample number:	SampleOwner:Fernando
Operator:Felipe	Test Time:2019-12-04 17:19:06	MeasureDept:UTFPR
Test Method:Laser	Preparation:	Medium Name:Water
Dispersant:Nenhum	Ultrasound:2 mins	Stirring:1600 rpm
Optical:Mie	Analysis Mode:8.0 - Multipeak	Distribution:Volume
Particle RI:1.544-0i	Medium RI:1.333	Remark:

D[4,3]:8.777um	D[3,2]:5.067um	SSA:391.1m^2/kg	**Obscuration:20.12 %**
D[2,1]:2.917um	D[1,0]:1.921um	Span:2.24	Residual:1.092%

D03 = 1.538um	D06 = 1.918um	**D10 = 2.394um**	D16 = 3.097um	D25 = 4.095um
D75 = 11.68um	**D50 = 7.025um**	D84 = 14.88um	**D90 = 18.09um**	D97 = 24.82um

Diam um	Diff %	Cum %	Diam um	Diff%	Cum%	Diam um	Diff%	Cum%
0.010-0.013	0	0	0.704-0.919	0,18	0,19	49.66-64.79	0	100
0.013-0.017	0	0	0.919-1.199	0,8	0,99	64.79-84.53	0	100
0.017-0.022	0	0	1.199-1.565	2,19	3,18	84.53-110.2	0	100
0.022-0.028	0	0	1.565-2.041	3,84	7,02	110.2-143.8	0	100
0.028-0.037	0	0	2.041-2.663	5,25	12,27	143.8-187.7	0	100
0.037-0.049	0	0	2.663-3.475	7,07	19,34	187.7-244.9	0	100
0.049-0.064	0	0	3.475-4.534	9,68	29,02	244.9-319.5	0	100
0.064-0.083	0	0	4.534-5.916	12,17	41,19	319.5-416.9	0	100
0.083-0.109	0	0	5.916-7.718	13,91	55,1	416.9-543.9	0	100
0.109-0.142	0	0	7.718-10.07	13,48	68,58	543.9-709.6	0	100
0.142-0.186	0	0	10.07-13.13	11,03	79,61	709.6-925.8	0	100
0.186-0.243	0	0	13.13-17.14	8,93	88,54	925.8-1207	0	100
0.243-0.317	0	0	17.14-22.36	6,69	95,23	1207-1576	0	100
0.317-0.414	0	0	22.36-29.17	3,85	99,08	1576-2056	0	100
0.414-0.540	0	0	29.17-38.06	0,92	100	2056-2682	0	100
0.540-0.704	0,01	0,01	38.06-49.66	0	100	2682-3500	0	100