

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico - CDTec
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Tese

Avaliação do Comportamento Eletroquímico do Concreto Auto Adensável
Exposto ao Ataque de Cloretos

Aline Tabarelli

Pelotas, 2020

Aline Tabarelli

**Avaliação do Comportamento Eletroquímico do Concreto Auto Adensável
Exposto ao Ataque de Cloretos**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: César O. Avellaneda

Co-Orientadora: Estela Oliari Garcez

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

T112a Tabarelli, Aline

Avaliação do comportamento eletroquímico do concreto auto adensável exposto ao ataque de cloretos / Aline Tabarelli ; César Oropesa Avellaneda, orientador ; Estela Oliari Garcez, coorientadora. — Pelotas, 2020.

262 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Espectroscopia de impedância eletroquímica. 2. Concreto auto adensável. 3. Cloretos. I. Avellaneda, César Oropesa, orient. II. Garcez, Estela Oliari, coorient. III. Título.

CDD : 620.11063

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figas Machado CRB: 10/1612

Aline Tabarelli

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 09/10/2020

Banca examinadora:

Prof. Dr. César Oropesa Avellaneda (Orientador)
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Estela Oliari Garcez (Corientadora)
Doutora em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Silvia Margonei Mesquita Tamborim
Doutora em Ciências dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Ariela da Silva Torres
Doutora em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Ângela Azevedo de Azevedo
Doutora em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dra. Camila Monteiro Cholang
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

Profa. Dra. Aline Ribeiro Paliga (suplente)
Doutora em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Herbet Luis Rossetto (suplente)
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo

“Ó profundidade das riquezas, da sabedoria e do conhecimento de Deus! Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis, os seus caminhos! Pois, quem conheceu a mente do Senhor? Ou quem foi o seu conselheiro? Ou quem lhe deu primeiro, para que lhe seja recompensado? Porque dele, e por ele, e para ele, são todas as coisas; a ele seja a glória para sempre!” (Rm 11.33 -36).

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter me sustentado em todos os momentos.

A minha família por compreender e me fortalecer nesta jornada. Amo vocês.

Aos meus pais, Irineu e Zuleica pelo imenso incentivo e cooperação.

A minhas filhas amadas, Isabella e Mirella por toda a abnegação em todo o tempo que não me fiz presente.

Ao meu prezado marido pelas inúmeras noites ao meu lado para que este trabalho se concretizasse. Você foi essencial todos os dias.

Aos meus colegas do PPGCEM pelo apoio e ajuda, a equipe é 10.

Ao Laboratório de Filmes Finos e Novos Materiais (LAFFIMAT) e ao Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas (LabMat) da Universidade Federal de Pelotas pelas análises e ensaios técnicos para o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu orientador prof. Dr. César Avellaneda e a minha coorientadora prof Dra. Estela Garcez pela enorme paciência. Professora Estela, mesmo de longe foste muito presente. Obrigada.

A Universidade Federal de Pelotas, a qual faço parte como docente, pela oportunidade e grande ganho profissional.

A instituições como UNIPAMPA, FURG, UFPR, UFRGS e Deakin University que em todo o caminho colaboraram com a minha formação e caracterizações dos materiais.

Aos amigos e colegas que estiveram comigo durante o desenvolvimento deste estudo. Não conseguiria enumerar a todos que em sua maneira especial deixaram marcas e amizades para toda a vida. Obrigada aos técnicos dos laboratórios, aos colegas da civil, aos colegas da materiais e aos colegas da química que direta ou indiretamente colaboraram com a realização desta tese. Em muitos erros e acertos aprendi que sem uma equipe dedicada e responsável não teria chegado até aqui.

A todos, o meu muito obrigado!

Resumo

TABARELLI, Aline. **Avaliação do Comportamento Eletroquímico do Concreto Auto Adensável expostos ao Ataque de Cloretos**. Orientador: César Oropesa Avellaneda. Co-orientadora: Estela Oliari Garcez. 2020. 262 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

A escolha por determinado tipo de material de construção nos projetos requer conhecimento e responsabilidade. O Concreto Auto Adensável (CAA) é considerado uma inovação de sucesso na construção civil e é um concreto que dispensa o processo convencional de vibração ou adensamento por ter capacidade de fluir e preencher os espaços das formas apenas através de seu peso próprio, proporcionando um material mais compacto, com menos poros. O CAA vem sendo bastante utilizado no Japão e na Europa, mas no Brasil, sua utilização ainda é limitada devido a limitações no conhecimento. Há limitação ao acesso de normas e métodos de dosagem, além do conhecimento sobre o comportamento do material. O presente trabalho teve como objetivo investigar por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) os mecanismos de degradação do concreto auto adensável exposto ao ataque de cloretos, para melhor prescrever a influência dos CAA na durabilidade de estruturas em concreto armado. As variáveis do estudo foram influência do tempo de cura no controle do ingresso de íons cloreto nos corpos de prova, na intensidade de corrosão da armadura e o coeficiente de difusão de cloretos. Para a análise da penetração dos cloretos no material foram utilizados testes acelerados de ciclos de secagem/molhagem nas amostras ao longo do período total de dois anos. Os resultados comprovaram comportamentos diferentes em relação ao quesito durabilidade, onde os resultados do CAA apontaram uma maior durabilidade se comparado ao concreto convencional. Para o coeficiente de difusão de cloretos calculados na ordem de 10^{-12} os resultados do concreto convencional são superiores em relação ao CAA sendo reduzido a diferença com o tempo e com a idade de cura. Nas últimas idades, provavelmente relacionado ao aumento do tamanho dos poros e microfissuras causadas pela entrada do agente agressivo e o aumento do gradiente de concentração, houve um aumento no coeficiente de difusão em ambos os concretos.

Palavras-chave: Espectroscopia de impedância eletroquímica, concreto auto adensável, cloretos

Abstract

TABARELLI, Aline. **Evaluation of Electrochemical behaviour of Self Compacting Concrete exposed to the attack of chlorides.** Advisor: César O. Avellaneda. Co-advisor: Estela Oliari Garcez. 2020. 262 f. Thesis (PhD in Materials Science and Engineering) Graduate Program in Materials Science and Engineering, Technological Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

The selection of construction materials requires knowledge and responsibility. Self-compacting concrete is considered a successful innovation in the construction industry as it dispenses the conventional process of vibration or compactation due to its ability to flow and fulfill the spaces of the moulds only by its own weight, resulting in a more compact material, with less pores. Self-compacting concrete has been widely used in Japan and Europe. In Brazil, its use is still restricted, due to the limited availability of standards and mixing design methods, as well the limited professional knowledge regarding the material behaviour. The aim of the present work is to investigate mechanisms of degradation in self-compacting concrete exposed to chloride attack by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) the, in order to prescribe the influence of using self-compacting concrete on the durability of reinforced concrete structures. Also this study evaluated the influence of curing time on the transport of chloride in self-compacting concrete, the corrosion processes of the reinforcement and diffusion coefficient of chlorides in concrete. For the analysis of the penetration of chlorides in the material, the specimens were subjected to wet and dry cycles in an accelerated test for a period of two years. The results showed distinct patterns in relation to durability, where the self-compacting concrete showed greater durability compared to conventional concrete. The chloride diffusion coefficient was in the order of 10^{-12} , in general the diffusion coefficient of conventional concrete was superior in relation to self-compacting concrete, and the difference between both concretes reduced with exposure time and curing age. In the latest ages - around two years of exposure, there is an increase in the diffusion coefficient in both concretes probably related to the increase in the size of pores and microcracks caused by penetration of the chloride and by the increase in the concentration gradient.

Keywords: Electrochemical impedance spectroscopy, self-compacting concrete, chlorides

Lista de Figuras

Figura 1 - Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland.....	33
Figura 2 - Modelo de uma pasta de cimento Portland bem hidratada.	34
Figura 3 - Evolução das Fases hidratadas na pasta de cimento em função do tempo.	36
Figura 4 - Fatores que interferem na porosidade e no transporte de massa.	37
Figura 5 - Estrutura 3D do processo de hidratação aos 7 dias de cura. Distribuição dos poros na coloração A, B, C e D.	38
Figura 6 - Diagrama de Nyquist do espectro de impedância associado a zona de altas frequência interface aço-concreto e o circuito equivalente associado.	68
Figura 7 - Diagrama de Nyquist do espectro de impedância associado a uma reação eletroquímica do tipo Randles e o circuito equivalente associado.	69
Figura 9 - Difração de Raio X do Cimento CPV – ARI.....	76
Figura 10 - Curva granulométrica – agregado graúdo.....	77
Figura 11 - Curva granulométrica – agregado miúdo.	78
Figura 12 - Diagrama de Dosagem para uma família de concreto com mesmo abatimento e	82
Figura 13 - Metodologia Tutikian e Dal Molin	83
Figura 14 - Metodologia adaptada Tutikian e Dal Molin.	83
Figura 15 - Placa-base (a) perspectiva (b) execução do ensaio	85
Figura 16 - Funil V (a) vista em planta, (b) vista frontal, (c) vista lateral. Dimensões em centímetros	86
Figura 17 - Caixa L (a) Planta (b) Vista Lateral	86
Figura 18 - Anel J e vista em planta do molde e do anel J.....	87
Figura 19 - Ciclo de Molhagem na solução de 3,5% de NaCl por 2 dias a meia altura.	91
Figura 20 - Ciclo de Secagem em temperatura ambiente por 5 dias.	92
Figura 21 - Molde de madeira para os eletrodos de aço e grafite na moldagem dos corpos de prova (a). Molde de madeira com os eletrodos de aço e grafite durante a moldagem dos corpos de prova de concreto armado de CC e CAA (b).	93

Figura 22 - Amostras para a análise eletroquímica nos corpos de prova de concreto armado de CC e CAA.....	94
Figura 23 - Análise Espectroscopia de Impedância Eletroquímica com os adaptadores nos eletrodos.....	95
Figura 24 – Espectro EIE experimental para massa do concreto com as resistências da solução do poro (R) e resistência de polarização (Rp).....	96
Figura 25 - Ensaio Colorimétrico – Rompimento diametral da amostra.	99
Figura 26 - Ensaio Colorimétrico – Aspersão de Nitrato de Prata.	99
Figura 27 - Ensaio Colorimétrico – Região branca e Marrom.....	100
Figura 28 – Reações químicas envolvidas no processo colorimétrico.	100
Figura 29 - Ensaio de absorção capilar das amostras de concreto de 28 dias de cura	102
Figura 30 - Corpos de prova de concreto submetidos à fervura por 5 horas.....	103
Figura 31- Amostras sólidas dos tipos de concreto para o ensaio de B.E.T	104
Figura 32- Equipamento Analisador de Área Superficial Gemini VII 2390A – Micromeritics	105
Figura 33 - Portal de Microscopia contendo amostras sólidas de concreto.....	106
Figura 34- Microscópio Jeol, JSM-6610LV localizado no CEME-SUL	107
Figura 35- Amostras em pó de concreto e porta amostras do DRX	108
Figura 36 - Equipamento Bruker, D8 Advance localizado no CEME-Sul.....	108
Figura 37 - Diagrama de dosagem concreto convencional referência.	111
Figura 38 - Estudo Experimental do Espalhamento da Argamassa (a) medida de espalhamento seca; (b) medida de espalhamento intermediária; (c) medida de espalhamento final.	112
Figura 39- Estudo Experimental do Espalhamento do Concreto (a) com segregação (b) sem segregação	112
Figura 40 - Ensaio de Trabalhabilidade concreto convencional.	114
Figura 41 - Ensaio de Trabalhabilidade CAA.	114
Figura 42 - Ensaio Experimental CAA Cone Abrams.	115
Figura 43 - Ensaio Experimental CAA Caixa L.....	115
Figura 44- Ensaio Experimental CAA Funil V.....	116
Figura 45 - Ensaio Experimental CAA Anel J.....	116
Figura 46- Curva de Resistência à Compressão em função da idade e do tipo de concreto.	117

Figura 47– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado a 3 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).....	119
Figura 48 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado a 5 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).....	120
Figura 49– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado a 7 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).....	121
Figura 50 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado a 28 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).....	122
Figura 51– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 3 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).....	123
Figura 52 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 5 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).....	125
Figura 53 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 7 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).....	126
Figura 54 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 28 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).....	127
Figura 55 – Modelo de Circuito Equivalente Proposto para o ciclo inicial [R(RQ)(RQ)]	130

Figura 56 – Modelo de Circuito Equivalente Proposto para o ciclo Final [R(RQ)(R[QW])]	130
Figura 57 – Esquema das camadas de acordo com o circuito equivalente proposto. As camadas representadas são I (Aço), II (concreto) e III (solução porosa)	131
Figura 58– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional para 3,5, 7 e 28 dias de cura no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem) e respectivo fitting	133
Figura 59 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável para 3, 5, 7 e 28 dias de cura no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo de aceleração acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem) e respectivo fitting	134
Figura 60 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 3 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos)	141
Figura 61 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 3 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos)	141
Figura 62 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 3 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos)	143
Figura 63 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 3 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos)	143
Figura 64 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 5 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos)	145
Figura 65– Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 5 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos)	146
Figura 66 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 7 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos)	147

Figura 67 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 7 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).....	148
Figura 68– Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 28 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).	148
Figura 69– Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 28 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).	149
Figura 70 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 5 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).....	150
Figura 71 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 5 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).	151
Figura 72 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 7 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).	151
Figura 73 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 7 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).	152
Figura 74 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 28 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).	152
Figura 75 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 28 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).	153
Figura 76 - Corpos de Prova de CAA (CA) (a) e CC (b) exposto a 1 ano de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral para Grupo 1. a) antes e b) depois da aspersão da solução colorimétrica.....	155
Figura 77 - Corpos de Prova de CAA (CA) (a) e CC (b) exposto a 1 anos de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral para Grupo 2. a) antes e b) depois da aspersão da solução colorimétrica.....	156

Figura 78 - Corpos de Prova de CAA (CA) (a) e CC (b) exposto a 1 anos de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral para Grupo 3. a) antes e b) depois da aspersão da solução colorimétrica.....	157
Figura 79 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 3 dias de cura exposto após 425 dias de ciclo do processo acelerado.	158
Figura 80 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 5 dias de cura exposto após 425 dias de ciclo do processo acelerado.	158
Figura 81 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 7 dias de cura exposto após 425 dias de ciclo do processo acelerado.	159
Figura 82 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 28 dias de cura exposto após 425 dias de ciclo do processo acelerado.	159
Figura 83 - Corpos de Prova de CAA (CA) e CC exposto a 2 anos de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral.....	160
Figura 84 - Corpos de Prova de CAA (CA) e CC exposto a 2 anos de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral e aspersão da solução colorimétrica.....	161
Figura 85 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 3 dias de cura exposto após 665 dias de ciclo	162
Figura 86 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 5 dias de cura exposto após 665 dias de ciclo do processo acelerado.	162
Figura 87 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 7 dias de cura exposto após 665 dias de ciclo do processo acelerado.	163
Figura 88 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 28 dias de cura exposto após 665 dias de ciclo do processo acelerado.	163
Figura 89 - Média de Resistência de Polarização para o CC aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura ao longo dos ciclo do processo acelerado.	166
Figura 90 - Média de Resistência de Polarização para o CAA aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura ao longo dos ciclo do processo acelerado.	166
Figura 91 - Coeficiente de Difusão de íons cloreto para o concreto convencional aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura ao longo dos ciclo do processo acelerado.	170
Figura 92 - Coeficiente de Difusão de íons cloreto para o concreto auto adensável aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura ao longo dos ciclo do processo acelerado.	171

Figura 93 - Curva de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.	180
Figura 94 - Difratoograma de Raio X comparativo dos concretos CAA (CA) e CC 3 dias de Cura 2 anos de Ciclos.	185
Figura 95 - Difratoograma de raio X comparativo dos concretos CAA (CA) e CC 5 dias de Cura 2 anos de Ciclos.	185
Figura 96 - Difratoograma de raio X comparativo dos concretos CAA (CA) e CC 7 dias de Cura 2 anos de Ciclos.	186
Figura 97 - Difratoograma de raio X comparativo dos concretos CAA (CA) e CC 28 dias de Cura 2 anos de Ciclos.	186
Figura 98 - Composição Química do CC aos 3 dias de Cura 2 anos de Ciclos	189
Figura 99 - Composição Química do CAA aos 3 dias de Cura 2 anos de ciclos.	190
Figura 100 - Composição Química do CC aos 5 dias de Cura 2 anos de ciclos.	190
Figura 101 - Composição Química do CAA aos 5 dias de Cura 2 anos de ciclos. ...	191
Figura 102 - Composição Química do CC aos 7 dias de Cura 2 anos de ciclos.	191
Figura 103 - Composição Química do CAA aos 7 dias de Cura 2 anos de ciclos. ...	192
Figura 104 - Composição Química do CC aos 28 dias de Cura 2 anos de ciclos. ...	192
Figura 105 - Composição Química do CAA aos 28 dias de Cura 2 anos de Ciclos	193
Figura 106 - Micrografia do CC aos 28 dias de Cura Idade Inicial.	195
Figura 107 - EDS correspondente a Micrografia do CC aos 28 dias de Cura Idade Inicial.	195
Figura 108 - Micrografia do CAA aos 28 dias de Cura Idade Inicial.	196
Figura 109 - EDS correspondente a Micrografia do CAA aos 28 dias de Cura Idade Inicial.	196
Figura 110 - Micrografia do CC aos 3 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).	198
Figura 111 - Micrografia do CC aos 5 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).	199
Figura 112 - Micrografia do CC aos 7 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).	200
Figura 113 - Micrografia do CC aos 28 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).	200
Figura 114 - Micrografia do CAA aos 3 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).	201

Figura 115 - Micrografia do CAA aos 5 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).	201
Figura 116 - Micrografia do CAA aos 7 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).	202
Figura 117 - Micrografia do CAA aos 28 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).	202

Lista de abreviaturas, símbolos e siglas

CC	Concreto Convencional
CAA	Concreto Auto Adensável
C ₂ S	Silicato de dicálcio
C ₃ S	Silicato tricálcio
C ₃ A	Aluminato tricálcio
C ₄ AF	Ferroaluminato de cálcio
EIE	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
DRX	Difratometria de Raio X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
CaO	Cal
SiO ₂	Sílica
Al ₂ O ₃	Alumina
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
SO ₃	Anidrido Sulfúrico
Na ₂ O	Óxido de Sódio
K ₂ O	Óxido de Potássio
TiO ₂	Óxido de Titânio
C-S-H	Cálcio-Silicato-Hidratado
f_c	Resistência à Compressão
a/c	Relação água/cimento ou água/aglomerante
NaCl	Cloreto de Sódio
Ca ⁺²	Íon Cálcio
OH	Hidroxila
Cl ⁻	Íon Cloro
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
q_m	Fluxo de massa
ψ	Potencial
D	Coefficiente de Difusão
μ	Viscosidade do Fluido
ΔH	Gradiente de Pressão
A	Área da Superfície
L	Espessura do Sólido

J	Taxa de transporte de massa
pH	Potencial Hidrogeniônico
R	Resistência Elétrica do Material
P	Resistividade Elétrica do Material
Z	Impedância
Z'	Impedância Real
Z''	Impedância Imaginária
Rp	Resistência de Polarização
Cdl	Capacitância
Rc	Resistência Eletrolítica do Concreto
AgNO ₃	Nitrato de Prata
Fs	Sal de Friedel

Sumário

1	Introdução	22
1.1	Hipótese da pesquisa	25
2	Objetivos.....	26
2.1	Objetivo Geral.....	26
2.2	Objetivo Específicos	26
3	Revisão Bibliográfica.....	27
3.1	Concreto.....	27
3.2	Concreto de Cimento Portland.....	29
3.3	Processo de Hidratação do Cimento Portland	30
3.4	Porosidade.....	35
3.5	Concretos Especiais	40
3.5.1	Concreto Auto Adensável.....	41
3.6	Durabilidade do Concreto	43
3.7	Transporte de Fluidos no Concreto.....	46
3.8	Permeabilidade	48
3.9	Difusão	49
3.9.1	Difusão de cloretos.....	51
3.9.2	Coeficiente de Difusão de cloretos.....	54
3.10	Resistividade e condutividade.....	57
3.10.1	Resistividade	57
3.10.2	Coeficiente de Difusão de cloretos – Equação de Warburg	62
3.11	Técnicas Eletroquímicas.....	65
3.11.1	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica.....	66
3.12	Processo Acelerado.....	70
4	Materiais e Métodos.....	72

4.1	Materiais Empregados	73
4.1.1	Cimento	74
4.1.2	Agregado Graúdo	76
4.1.3	Agregado Miúdo	77
4.1.4	Aditivos Químicos.....	78
4.2	Programa Experimental – Etapa 1	79
4.2.1	Definição do traço do Concreto Convencional.....	80
4.2.2	Definição do traço Concreto Auto Adensável (CAA).....	82
4.2.3	Análise do Traço de CC – Estado Fresco.....	84
4.2.4	Análise do Traço CAA – Estado Fresco	85
4.2.5	Análise do Traço CC e CAA – Estado Endurecido	89
4.3	Comportamento em Relação ao Transporte de Cloretos – Etapa 2	90
4.3.1	Ciclos de Secagem e Molhagem	90
4.3.2	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE).....	92
4.3.3	Resistividade Elétrica	95
4.3.4	Difusividade dos íons de Cloreto	97
4.3.5	Método Colorimétrico.....	98
4.3.6	Medida de Avanço da Penetração de íons Cloreto	101
4.3.7	Determinação da Porosidade do Concreto.....	101
4.3.8	Determinação da Porosidade do Concreto – B.E.T.....	103
4.3.9	Análise Morfológica e Química	105
4.3.10	Análise Mineralógica.....	107
5	 Resultados e Discussões.....	109
5.1	Etapa 1 - Traço Concreto Convencional e Traço Concreto Auto Adensável ..	109
5.1.1	Traço Concreto Convencional (CC).....	109
5.1.2	Traço Concreto Auto Adensável (CAA)	111
5.1.3	Análise do Estado Fresco do CC e CAA	113
5.1.4	Análise do Estado Endurecido do CC e CAA	117
5.2	Etapa 2 – Comportamento em relação ao transporte de cloretos.....	118
5.2.1	Análise do comportamento eletroquímico – Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)	118
5.2.2	Análise do comportamento eletroquímico – Diagrama de Bode.....	140

5.2.3	Medida de Penetração de Íons Cloreto	154
5.2.4	Determinação da Resistência de Polarização (R_p)	165
5.2.5	Determinação da Intensidade de Corrosão (I_{corr}).....	168
5.2.6	Difusão	169
5.2.7	Difusividade dos íons de Cloreto	169
5.2.8	Caracterização da porosidade.....	179
5.2.9	Caracterização do Caráter Cristalino.....	184
5.2.10	Análise Química e Morfológica	189
6	Conclusão.....	204
	Referências Bibliográficas	207
	Anexos	252
	Anexo A - Diagramas de Nyquist	253
	Anexo B - Gráficos de Barra médias de Resistência de Polarização	258

1 Introdução

O concreto é o material de construção mais utilizado em todo o mundo, principalmente porque apresenta excelentes propriedades mecânicas e de construtibilidade (REMESAR et al., 2017; CHAN et al., 2020). Dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento publicados em 2019 apontam uma produção mensal total em torno de 60 milhões de toneladas de cimento nos últimos anos no Brasil, confirmando um aumento em relação aos últimos anos (SNIC, 2019).

Os materiais compósitos, como o concreto, são materiais de construção antigos e com reputação de ser um material com alta durabilidade. Ao longo dos séculos, entretanto, as composições de cimentos evoluíram com a invenção do cimento Portland em 1824, que foi responsável pela popularização dos materiais cimentícios gerando a revolução na indústria da construção civil (VÁZQUEZ-ROWE et al., 2019).

Devido ao vasto uso do concreto como material de construção, a sua utilização imputa ao meio técnico uma preocupação em relação à qualidade do material, aos seus requisitos de desempenho e também a sua segurança estrutural. Esta preocupação está relacionada a um elevado número de fatores que podem interferir em sua qualidade e conseqüentemente em suas propriedades. O comportamento do concreto está diretamente associado ao tipo de material utilizado, a sua dosagem e ao seu processo de produção (RIBEIRO et al., 2016).

Sendo o concreto o material compósito de maior utilização na indústria civil é necessário conhecer os aspectos que influenciam diretamente na relação custo-benefício, seus tipos de misturas e a sua utilização em infraestruturas e nas construções de edificações. Desta forma torna-se importante salientar que se pode melhorar e acelerar o processo de produção do concreto conhecendo o seu comportamento e propriedades (YOUNGA et al., 2019).

Nas últimas décadas, as questões que inferem sobre a durabilidade dos materiais têm chamado atenção da comunidade científica e, em especial, as formas de deterioração e modelagem de vida útil de estruturas de concreto armado. Onde se argumenta que uma abordagem baseada no desempenho do material é a ferramenta de Engenharia mais adequada para esta análise. As condições de exposição e os vários agentes agressivos ao longo de sua vida útil da estrutura precisam ser estudados. Em essência, o projeto de durabilidade envolve a seleção

de uma combinação apropriada de materiais e detalhes estruturais (ALEXANDER E BEUSHAUSEN, 2019).

Atualmente as especificações são amplamente prescritivas, estabelecendo métodos, materiais, processos e procedimentos, assim como a limitação de valores para o conteúdo do ligante, relação água / cimento, resistência à compressão, quantidade de ar incorporado, entre outros. Alguns parâmetros na durabilidade, como a presença de agentes agressivos, também são apontados no estudo da vida útil do material (BALESTRA et al., 2019).

Em 1988 o Japão enfrentava problemas de durabilidade de estruturas de concreto e como forma de resolução deste problema desenvolveu o concreto auto adensável (CAA). Este material era empregado em produtos pré-fabricados para eliminar o ruído de vibração, melhorar as condições do ambiente de trabalho, e também estender a vida útil dos moldes (OKAMURA, 2003).

O CAA foi considerado uma inovação de sucesso na construção civil, com uso rotineiro em mercados de construção competitivos (DE SCHUTTER et al., 2008). É uma tecnologia que fornece muitas soluções para as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido e é definido como concreto auto compactante, autonivelante, super trabalhável e não vibratório (BUSARI et al., 2018).

As propriedades e comportamentos do CAA vêm sendo estudados na busca de aplicações dos mesmos e, quando aplicada corretamente, a técnica proporciona excelentes resultados e novas oportunidades (LI e XU et al., 2019; ARABI et al., 2019; JAIN et al., 2019; ALBERTI et al., 2019; GUPTA et al., 2019; SANDHU et al., 2019; TANG et al., 2019; YU et al., 2019; ABDALHMID et al., 2019; BENYAMINA et al., 2019; BOUKHELKHAL et al., 2019; GARCEZ et al., 2019; NILI et al., 2019; REVILLA-CUESTA et al., 2020; SASANIPOUR et al., 2020).

O processo de degradação do concreto é notoriamente um processo complexo, que depende de vários fatores, tais como a composição do material utilizado, o ambiente em que está inserido e ações em que está submetido, bem como o intemperismo e a ação humana (SERRALHEIRO et al., 2017). Além disso, durante sua fase de produção, não é possível eliminar todas as fontes de variabilidade nas propriedades dos materiais constituintes da mistura. Nesse sentido, a adoção de controles oportunos sobre as matérias-primas ou sobre os processos produtivos permite conter essa variabilidade dentro de limites pré-estabelecidos (BERTOLINI, 2016).

Apesar de melhorias em sua microestrutura os concretos auto adensáveis ainda apresentam questões a serem esclarecidas no campo da durabilidade, que é apontado como não totalmente compreendido, particularmente em termos de propriedades físico-químicas. Para isso é necessário estudar indicadores de durabilidade (porosidade, difusão de cloretos, permeabilidade ao oxigênio) e propriedades adicionais necessárias para uma melhor compreensão da sua microestrutura (ASSIE et al., 2007; BEUSHAUSEN et al., 2019). Ainda no Brasil, são poucos os estudos existentes frente ao comportamento do CAA referente a melhorias principalmente no quesito durabilidade (VIEIRA et al., 2018; CALMON et al., 2013; SERRA et al., 2020).

A corrosão do aço ainda é o principal fator que causa a redução da capacidade de carga. (ZHANG et al., 2017; JIANG et al., 2018; STEFANONI et al., 2018; TIAN et al., 2019; BOURENANE et al., 2019; BALONIS et al., 2019; LI et al., 2019; SHI et al., 2019). Os principais iniciadores de corrosão no concreto são a carbonatação, reação entre o dióxido de carbono presente na atmosfera e os produtos de hidratação do cimento, e a presença de íons de cloreto (GARTNER, 2020). A concentração desses elementos, incluindo o oxigênio dissolvido, a temperatura, a salinidades, pH, e íons presentes são variáveis onde o processo de corrosão é mais rápido em ambientes mais agressivos (CAI et al, 2020).

A difusividade do cloreto no concreto é, no entanto, a propriedade essencial para o estudo dos parâmetros de durabilidade e seus valores de projeto que são convertidos em valores de controle de qualidade. Em relação ao controle de qualidade realizado no concreto, a resistência à compressão e difusividade dos cloretos são os principais parâmetros de controle (LI et al., 2019).

O período de início de corrosão é afetado diretamente pela concentração crítica de cloreto e pela cobertura de concreto, ao mesmo tempo em que a porosidade da pasta de cimento influencia diretamente na difusividade do concreto (LUPING E GULIKERS, 2007; ZHANG et al., 2018).

Fatores como a distribuição, constrição dos poros, conexão dos poros e tortuosidade dos poros são importantes e técnicas com o monitoramento das propriedades elétricas de materiais cimentícios ganhou um interesse crescente por ser não destrutivo e tecnicamente simples de executar onde as a energia de ativação de materiais cimentícios, as mudanças de fases, o fator de formação, o grau de dano microestrutural, a conectividade da rede de poros capilares, com a

condutividade podem ser estudadas (KIM et al., 2019). Medições elétricas são amplamente utilizadas para caracterizar as propriedades do concreto e a técnica de Espectroscopia de impedância baseada no uso de corrente alternada sensível a umidade do concreto e distribuição de cloretos pode ser usada (KARHUNEN et al., 2010; SMYL, 2020).

Em compostos cimentícios o progresso de hidratação está em constante atividade. Com isso a idade de cura e o processo de hidratação do mesmo são considerados variáveis que influenciam a penetração dos fluidos.

No concreto armado, as fases metálicas (barras e fibras de reforço), fissuras e vazios no ar, gradientes de umidade e distribuição do cloreto na matriz contrastam com relação à condutividade. Desta forma viabilizando a utilização da técnica de impedância eletroquímica, que é uma medida de resistência onde se observam os fenômenos que ocorrem na interface eletrodo/solução utilizando elementos elétricos e conceitos físico-químicos (SINGH et al, 2019), possibilitando a verificação da penetração de cloretos em estruturas metálicas inseridas no concreto.

A técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica e a modelagem de circuitos equivalente possibilita extrair características microestruturais do concreto e estudos sobre o transporte de espécies iônicas presentes nas soluções dos poros do material (NEITHALATH AND JAIN, 2010; SOHAIL et al., 2020).

Neste contexto, o presente trabalho possui a proposta de avaliar o comportamento do concreto auto adensável quando exposto ao ataque de cloretos por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), comparado os resultados ao comportamento do concreto convencional.

1.1 Hipotese da pesquisa

A delimitação da temática a ser abordada do presente trabalho é baseada na hipótese que o CAA possui baixa permeabilidade, e conseqüentemente alta qualidade (MELCHERS 2020), em relação ao CC, onde o foco não será a matriz de concreto e sim os parâmetros de projeto que indicam esta qualidade, isto é, consumo de cimento, resistência mecânica e cobrimento da armadura.

As respostas em relação aos mecanismos de deterioração serão consideradas nas condições de campo, com alterações da temperatura e umidade conforme o ambiente, para ambos os concretos.

2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram subdivididos em: objetivos gerais e específicos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) a influência do tempo de cura e a taxa de difusão de cloretos submetidos a ciclos de molhagem e secagem ao longo de um período de 665 dias (2 anos).

Para efeitos de comparação, o trabalho também utiliza concreto convencional (CC) para os mesmos tempos de cura e condições de exposição.

2.2 Objetivo Específicos

- Analisar os resultados de EIE no monitorando dos fenômenos de transferência de massa e carga e dos parâmetros elétricos (resistência, capacitância) na análise do sistema aço/concreto e o grau de proteção/corrosão das armaduras de aço.
- Analisar o comportamento do CC e CAA após dois anos de exposição ao meio agressivo em relação a taxa de corrosão e penetração de cloretos.
- Analisar por técnicas de difração de raio-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) a estrutura e a morfologia do material após dois anos de exposição ao meio agressivo.
- Comparar os resultados do coeficiente de difusão do CC e CAA.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Concreto

O concreto é um dos materiais compósitos mais importantes na indústria da construção. É apontado como indispensável para a sociedade humana porque possui capacidade de ser moldado em qualquer forma e ainda possui grande adaptabilidade, é também um material apontado como flexível em relação as suas propriedades (GHOSH E DAS, 2019). O concreto armado é amplamente utilizado em vários tipos de estruturas. Desta forma tornando-se um material competitivo que possui, muitas vantagens, quando bem projetado e executado, entre elas uma alta resistência à compressão e resistência ao fogo, baixo custo de manutenção e ainda pode ser utilizado em estruturas pré-moldadas por assumir a forma necessária do projeto (HASSOUN, 2012).

O concreto (mistura de agregados) com água e cimento é ainda onipresente e sem nenhum sinal de desaceleração em relação a qualquer outro material sintético produzido na terra. Este material pode ser considerado como um dos pilares da sociedade em desenvolvimento, igualando-se ao silício, petróleo e também ao gás, onde o seu crescimento duradouro consiste nas necessidades do mundo de atender as necessidades humanas básicas enfrentando desafios infraestruturais (DAMME, 2018).

De forma geral, o concreto maciço é propenso a fissuras e a sua durabilidade é reduzida em função das condições de mistura, temperatura e processo, que deve ser continuamente estudado para compreender e quantificar os efeitos e desafios de cada método empregado (HAN, 2020).

O fenômeno da cura da pasta cimentícia e as condições de umidade produzem alterações nas propriedades do concreto, definindo o tempo necessário para a pega e endurecimento do concreto. Estes são um dos principais fatores que influenciam em cronogramas de obras, nas questões de segurança da estrutura, falhas e durabilidade sendo fundamentais estudos para sua melhor compreensão e comportamento (LIM et al., 2020).

O concreto é um material não uniforme e com alta complexidade, onde os defeitos estruturais que surgem no mesmo acontecem principalmente nas interfaces concreto-reforço e que na literatura são discutidos por serem lacunas presentes e

amplamente observáveis durante o lançamento e assentamento do concreto fresco, afetando sua microestrutura e porosidade (YU et al., 2020).

De maneira sucinta, pode-se afirmar que o concreto é um material que depois de endurecido possui resistência similar às das rochas naturais desatacando-se por sua resistência à água – diferentemente do aço e da madeira, razão de sua utilização em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água (PEDROSO, 2009).

Damme (2018) relata que a ciência do concreto é uma ciência relativamente recente e Younis (2018) afirma que alterações na resistência mecânica, condições de fissuração e permeabilidade principalmente na presença de íons de cloreto no concreto apontam a necessidade de maiores estudos na engenharia civil devido aos requisitos de durabilidade do material.

A seleção de um material construtivo para uma aplicação específica precisa levar em consideração sua capacidade de suportar carga e esta capacidade deve ser comprovada no campo de provas (PAHL et al., 2005). O concreto se comporta de modo aproximadamente elástico quando a carga é aplicada na primeira vez. Entretanto sob cargas de longa duração ou constante o concreto apresenta outras propriedades como a fluência, ou seja, a deformação aumenta com o tempo (NEVILLE, 2016).

As estruturas de concreto precisam desempenhar suas funções e manter sua resistência de projeto durante toda a vida útil prevista, ou seja, suportando o período de deterioração a qual está sendo submetido. Deste modo, a estrutura/material deve resistir a diversas agressões ou solicitações (físicas, mecânicas, químicas) ao longo do tempo, isto é, as cargas as quais está submetida e as ações diversas como vento, chuva, frio, calor ou variações no meio e os requisitos dos usuários ao longo do tempo. Para tanto, os objetivos dos requisitos da durabilidade do concreto e suas características são normatizados e adotados em função das condições de agressividade do meio a qual se encontra as estruturas (ROUGEAU E GUIRAUD, 2014).

Isaia (2005) aponta em seu livro limitações no material como o comportamento marcadamente frágil, com baixa capacidade de deformação antes da ruptura e a reduzida resistência à tração.

Apesar do seu uso em larga escala e de ser considerado um material de simples produção, as condições de durabilidade e os mecanismos de formação do

material e comportamento possuem dificuldades de compreensão. Ainda o conhecimento de defeitos estruturais no concreto, possui lacunas, uma vez que o concreto possui uma microestrutura altamente complexa, devido, principalmente, a uma distribuição heterogênea dos componentes sólidos, presença de vazios e defeitos.

3.2 Concreto de Cimento Portland

Nas definições de termos técnicos da norma ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015) o concreto de cimento Portland é o material formado pela mistura homogênea de cimento, agregado miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos e adições). Ele desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água). A norma ABNT NBR 12655 separa o concreto fresco, completamente misturado que encontra-se em estado plástico e capaz de ser adensado, do concreto endurecido, onde o concreto no estado sólido desenvolveu resistência mecânica.

Cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos ao se misturarem com a água hidratam-se produzindo o endurecimento da massa que, então, oferece elevada resistência mecânica ao concreto. O produto obtido pela pulverização de clinker constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, pode conter eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego. Os seus constituintes fundamentais são a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3) que é adicionado após a calcinação. Ainda apresenta em menores quantidades de óxidos como os óxido de sódio (Na_2O), óxidos de potássio (K_2O) e óxido de titânio (TiO_2) (PETRUCCI, 1998).

Na mistura do concreto, o Cimento Portland juntamente com a água, forma uma pasta que pode ser mais ou menos fluida, dependendo do percentual de água adicionado. Essa pasta envolve as partículas de agregados com diferentes dimensões para produzir um material, que, nas primeiras horas, apresenta-se em um estado fluido e com o tempo, a mistura endurece pela reação irreversível da água com o cimento, adquirindo resistência mecânica, com excelente desempenho estrutural (HELENE E ANDRADE, 2010). O processo de secagem inicial produz uma

alteração irreversível dos hidratos de cimento gerados na estrutura porosa que é composta de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) estruturas fibrosas amorfas, hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a portlandita, grandes placas hexagonais superpostas, e as agulhas de etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) que são responsáveis pela resistência inicial. Os hidratos de cimento possuem um papel significativo na propriedade do cimento quando endurecido, também em sua microestrutura e na durabilidade do concreto (METHA E MONTEIRO, 2017).

Um fator primário que afeta a durabilidade do concreto e sua microestrutura é a sua composição. Na pasta de cimento, a composição representa o principal componente de mudança microestrutural e governa também o mecanismo das propriedades de transporte de íons no concreto, que dependem fortemente da complexa microestrutura e rede de poros da pasta quando hidratada (PLANK et al., 2015). As alterações são processadas de forma lenta e com grandes modificações onde o espaçamento entre as monocamadas de C-S-H são diferentes de acordo com as condições de umidade do material devido ao processo de secagem, (MARUYAMA et al., 2017). Durante a hidratação, a microestrutura evolui com o tempo devido à formação de produtos de hidratação e o desenvolvimento da rede de poros, onde os hidratos se formam após definir fases sólidas cada vez mais percolada, o que aumenta a resistência e rigidez do material e diminui a conectividade dos espaços dos poros afetando a taxa de penetração de íons ao meio (ACHOUR et al., 2020).

3.3 Processo de Hidratação do Cimento Portland

A formação de uma estrutura interna de materiais à base de cimento é um processo complexo e intrigante. A reação química do cimento com a água gera produtos com características de pega e endurecimento, transformando compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis chama-se hidratação (PETRUCCI, 1975; TRTNIK e GAMS, 2020).

Em diferentes tipos de concreto, a pasta de cimento hidratada que representa o principal material de ligação, há uma modificação da estrutura desta pasta nos diferentes estágios de cura e esta é uma etapa complicada, possuindo vários estágios e reações químicas ativas (ABZAEV et al., 2019).

A pasta de cimento hidratado é uma união heterogênea de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados entre si por uma massa porosa contendo,

no seu estado nativo, espaços com soluções e poros (PAULON, 2005; HAN et al., 2019).

As suas propriedades e desempenho de compósitos cimentícios dependem intimamente de sua composição e fabricação / processamento, bem como de estruturas onde a pasta de cimento endurecido contém uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e fissuras em imediatamente após o contato do cimento com a água, inicia-se uma troca de espécies iônicas entre os sólidos e a fase líquida (BEAUDOIN, 2019).

Os compósitos cimentícios endurecidos contêm fases sólida, líquida e gasosa. Sua estrutura final abrange um grande número de microestruturas com variação de tamanhos, que podem variar de nanômetros (por exemplo, produto de hidratação) a micrômetros (por exemplo, aglutinante) e, em seguida, de milímetros (por exemplo, argamassa e concreto) a dezenas de metros (estruturas finais). Além disso, os compósitos cimentícios apresentam características que são dependentes do tempo, porque a hidratação do cimento é uma evolução produtos de progresso e são instáveis termodinamicamente (KURDOWSKI, 2014).

Na literatura dois mecanismos de hidratação foram propostos: o primeiro o processo de hidratação ocorre por dissolução-precipitação, que envolve a dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, formação de hidratos na solução e a eventual precipitação dos hidratos gerando uma supersaturação na solução, devido à baixa solubilidade. O segundo mecanismo é o processo topoquímico, ou hidratação no estado sólido do cimento que ocorre através da solução (água / cimento) que prevê uma completa reorganização do constituinte dos compostos originais durante a hidratação do cimento (METHA E MONTEIRO, 2014).

Os principais componentes do cimento Portland são silicatos de cálcio (C_3S) e (C_2S), aluminato (C_3A) e ferrita (C_4AF), que de modo geral os seus parâmetros de síntese, grau de pureza e menor número de polimorfos resultam na estrutura cristalina do clínquer. Estrutura essa que produz diferentes dados relativos as propriedades e compreensão dos fenômenos envolvidos no estado fresco e endurecido do concreto, pasta ou argamassa (BARBOSA E PORTELLA, 2019).

O mecanismo de dissolução-precipitação é dominante nos estágios iniciais da hidratação do cimento. Em idades posteriores, quando a mobilidade iônica na solução fica restrita, a hidratação das partículas residuais de cimento pode ocorrer por reações em estado sólido (HAN et al., 2019).

Os quatro estágios na hidratação da pasta de cimento (durante as 24 horas iniciais) podem ser resumidos como: (I) um período inicial de atividade química rápida e saturação da água com aumento da concentração de íons Ca^{+2} e de OH^- e outros íons menores lixiviados dos grãos de cimento, como predominantemente, o silicato tricálcio (C_3S) e o aluminato tricálcio (C_3A); (II) período de indução ou dormente, período de aparente inatividade química e redução da taxa de reação; (III) um período de atividade química renovada, principalmente na fase C_3S , que resulta um aumento na temperatura interna da pasta; (IV) o início do período de endurecimento, que é caracterizada por taxas de reações muito mais lentas (McCARTER E AFSHAR, 1988).

A Alita (C_3S) é um silicato tricálcio que representa o constituinte mais importante do clínquer que no contato com a água hidrata, reagindo rapidamente e dá origem aos silicatos de cálcio hidratados de composição variável (C-S-H), com baixa teor cristalino, mas sendo o principal responsável pela resistência nas primeiras idades. Já a Belita (C_2S) é um silicato dicálcico, outra fase constituinte do clínquer, porém em menor quantidade, é importante nas idades mais avançadas e possui uma célula unitária da fase $\beta\text{-C}_2\text{S}$ formado por tetraedros de SiO_4 ligados a dois tipos de íons de Cálcio, com coordenação irregular (CASCUDO et al, 2010).

A Celita (C_3A) e a Ferrita (C_4AF) são compostos em menor quantidade, onde a primeira fase constitui de cristais uniformes, pequenos e que podem variar de retangular até xenomórficos, enquanto na segunda fase, os cristais de ferrita do clínquer, são intersticiais e com certa uniformidade na velocidade de reação com a água (CASCUDO et al, 2010).

O cimento Portland hidratado sobre condições normais permite o desenvolvimento das fases C-S-H, gel de silicato de cálcio hidratado; de hidróxido de cálcio; de etringita na fase AFt; de monosulfoaluminato de cálcio hidratado – fase AFm e pequenas outras fases, onde o C-S-H constitui a maior proporção (ISAIA, 2005).

A Figura 1, (a) representa um grão anidro de cimento Portland em contato com a água que começa a se dissolver. Após 10 minutos (Figura 1 (b)) forma-se o gel amorfo e pequenas agulhas de AFt em sua borda. Após 10 horas (Figura 1 (c)) há a formação de C-S-H sobre a malha de agulhas de AFt, com distâncias de $1\mu\text{m}$ entre a superfície do grão e a concha hidratada. Após 18 horas (Figura 1 (d)) há a hidratação secundária produzindo agulhas lanças de AFt. Em 1 a 3 dias, há a

formação de discos hexagonais de AFm. A contínua formação de produtos reduz a separação entre os grãos anidros e a concha hidratada. Em 14 dias (f) tem-se suficiente C-S-H para preencher o espaço entre o grão e a concha (ISAIA, 2005).

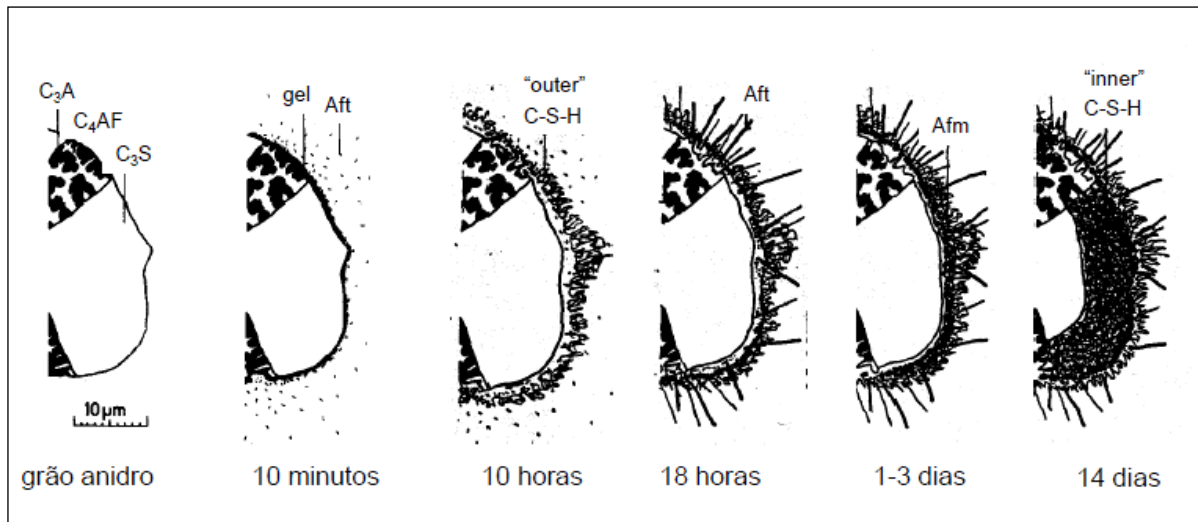


Figura 1 - Desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland.
Fonte: BENTUR e MONTEIRO, 1990.

A hidratação do cimento Portland evolui com o tempo, tendo aos 28 dias de cura cerca de 70-80% de grau de hidratação e praticamente se completando aos 365 dias (TAYLOR, 1997). Mas o processo de hidratação depende de vários fatores, entre eles, o tipo e a finura do cimento, a relação entre água e cimento, a temperatura e o processo de cura, e ainda a presença de aditivos químicos e minerais. Uma maior hidratação nas primeiras idades deixa para trás uma microestrutura mais homogênea com poros mais grossos (resultando o efeito cross-over) e o aumento da finura granulometria dos compostos fornece uma maior resistência nas primeiras idades (KORDE et al., 2019).

A quantidade de aditivos minerais quimicamente inertes ou não, modificam a cinética de hidratação do cimento através de efeitos de preenchimento opostos, são eles: o efeito de diluição, onde acontece substituição do cimento por aditivos minerais que reduz a formação de hidratos de cimento para uma mesma relação água/cimento, ou leva a melhoraria da hidratação do cimento com uma nucleação heterogênea (DEBOUCHA et al., 2017).

Para caracterizar as propriedades do concreto, principalmente as interfaciais são necessárias identificar as diferentes fases, incluindo os poros e produtos de

reação. Sabe-se que à medida que a reação prossegue aos 28 dias, o tamanho do poro em ITZ fica menor e há redistribuição de produtos de reação através da migração de íons no material. Deste modo o ITZ pode não ser o elo mais fraco, fornecendo um caminho para espécies agressivas passarem pelos materiais na matriz com o desenvolvimento do tamanho dos poros na matriz. Sabe-se que esta modificação de microestrutura pode ser dividida em três etapas: nas primeiras horas, nas primeiras idades e na reorganização dos produtos de hidratação (<12 h; 12 h – 7 dias, 7 a 28 dias, respectivamente) (FANG e ZHANG, 2020).

A Figura 2 mostra um modelo de uma pasta de cimento Portland hidratada.

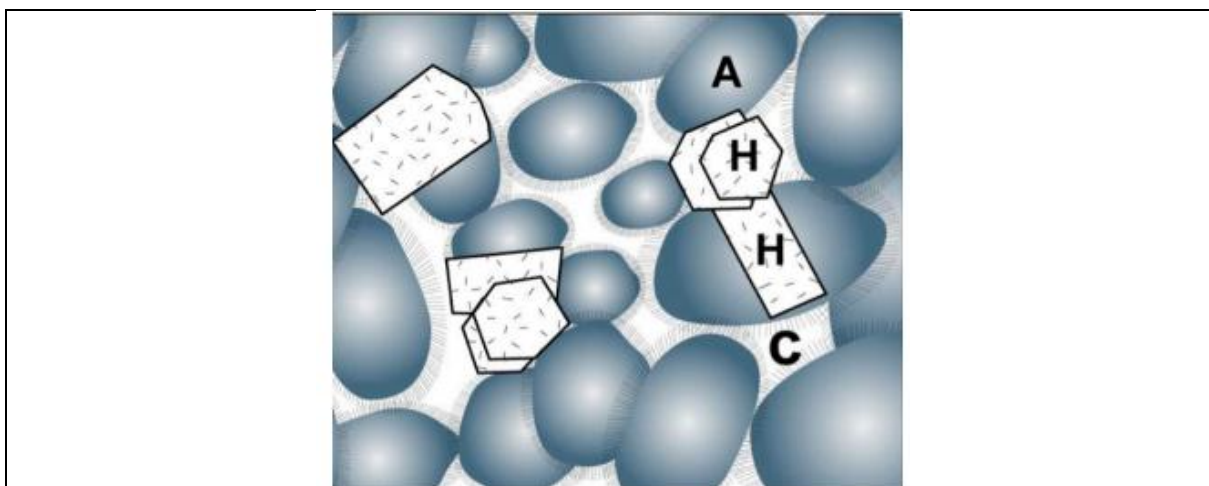


Figura 2 - Modelo de uma pasta de cimento Portland bem hidratada.
Fonte: METHA E MONTEIRO, 2014.

Na figura a letra “A” representa agregação de partículas de C-S-H que tem, ao menos, uma dimensão coloidal (1 a 100 nm). O espaçamento interlamelar em uma agregação é de 0,5 a 3,0 nm (em média 1,5 nm). A letra “H” representa produtos cristalinos hexagonais como $\text{CH}=\text{C}_4\text{AH}_{19}=\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{18}$. Estes produtos representam grandes cristais, com largura característica de $1\mu\text{m}$. A letra “C” representa as cavidades capilares ou vazias que existem, quando os espaços originalmente ocupados com água, não estão completamente preenchidos com produtos de hidratação do cimento.

Quando a relação água/cimento decresce, a absorção de água nos vazios capilares diminui, resultando em um aumento na resistência elétrica e sendo claramente influenciada pelo processo de cura. Ao analisar a microestrutura do concreto, é possível concluir que a redução da quantidade de C-S-H, presença de poros, partículas não hidratadas, etringita tardia em forma de estrela ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) e

trincas profundas são as principais causas da perda da resistência em várias condições (NEMATOLLAHZADE et al., 2020).

Em materiais como o concreto, onde há uma complexa estrutura de poros é difícil analisar o processo de transporte no material, considerando as condições de conectividade e tortuosidade. Além disso, há influencia no processo de transporte de íons significativamente onde pode ocorrer uma ligação química, como por exemplo, com o cloreto, com os produtos de hidratação do cimento e, sendo, um fator na avaliação da vida útil de estruturas de concreto armado (YANG et al., 2020).

3.4 Porosidade

O concreto é um material polifásico composto de três fases: sólida, líquida e gasosa, sendo a fase sólida composta pelos agregados, pelos compostos hidratados e pelas partes não hidratadas dos ligantes (fases anidras do cimento). A fase líquida é a solução intersticial e a fase gasosa é uma mistura de ar e vapor.

Porosidade é a medida da proporção do volume total ocupado por poros e normalmente expressa em porcentagem. Caso a porosidade seja elevada e os poros se intercomunique, eles contribuem para o transporte de fluidos através do concreto (NEVILLE, 2016).

A combinação da relação água/cimento e o grau de hidratação determinam a porosidade da pasta de cimento. A porosidade e o inverso da porosidade (relação sólido/espaco) estão relacionados exponencialmente tanto à resistência como à permeabilidade do material. A porosidade diminui com o passar do tempo devido o preenchimento dos espaços vazios por compostos hidratados (GARCIA, 2015).

Além disso, o fator de conectividade dos poros foi linearmente relacionado a permeabilidade rápida do íon cloreto e o coeficiente de difusão onde a conectividade porosa é uma importante característica microestrutural na entrada e transferência de cloreto. Geralmente, uma redução na porosidade resulta em uma redução na conectividade dos poros que afeta o parâmetro de transporte (NEITHALATH et al., 2010).

A Figura 3 mostra a evolução das fases hidratadas em função do tempo de hidratação.

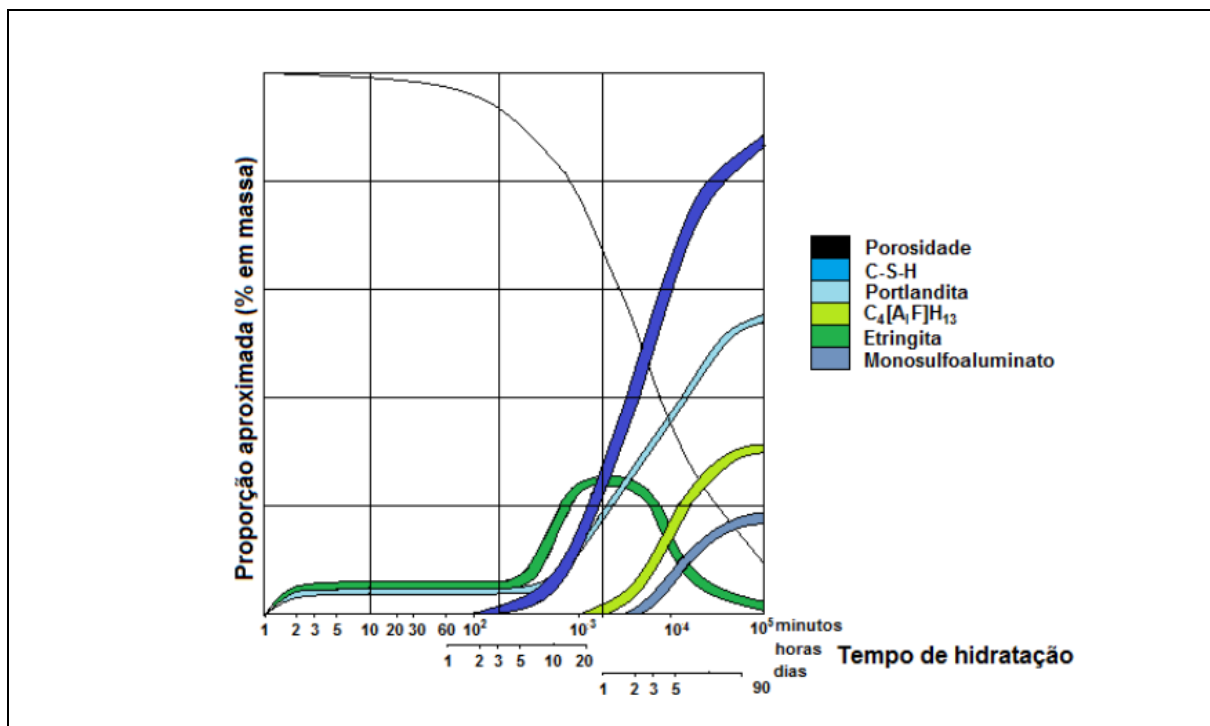


Figura 3 - Evolução das Fases hidratadas na pasta de cimento em função do tempo.
Fonte: Adaptada ZAMPIERE, 1989.

A interconectividade entre sistemas de poros de tamanhos diferentes permite que os poros se ramifiquem surgindo uma porosidade hierárquica, ou seja, um aumento ou diminuição gradual e contínuo das dimensões ao longo das direções, gerando resistências ao transporte de massas.

Nos concretos curados ao ar, observou-se que a porosidade varia com a distância em relação à superfície exposta, isto porque existem alterações no grau de hidratação, conseqüentes ao gradiente de umidade existente nesta região em função do transporte de umidade que ocorre entre o material e o meio externo. Pode haver ainda alteração na porosidade em decorrência de reações químicas entre as substâncias presentes no meio ambiente e no concreto, ocasionando a diminuição da porosidade. Vale ressaltar que o teor de umidade do concreto endurecido controla o acesso dos agentes agressivos para o seu interior, e também do oxigênio, elemento necessário para a ocorrência das reações de corrosão. O teor de umidade influi também na resistividade elétrica do concreto. A Figura 4 apresenta os fatores já citados que interferem na porosidade e no transporte de massa no concreto (SATO, 1998).

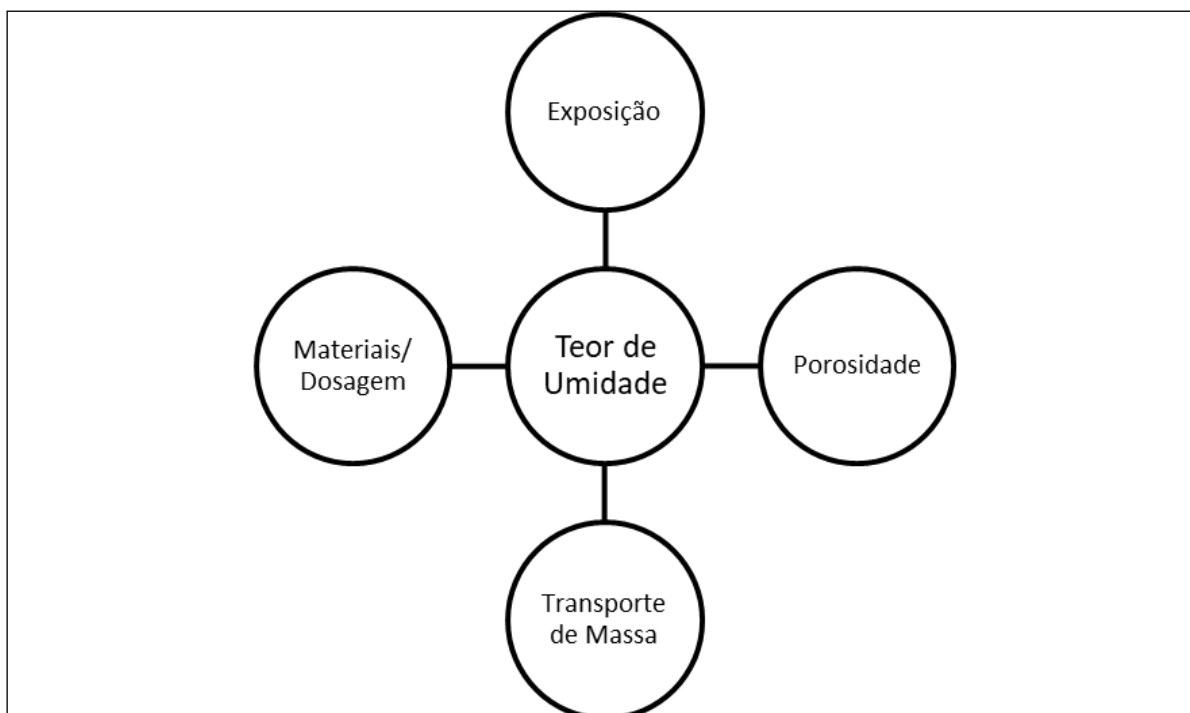


Figura 4 - Fatores que interferem na porosidade e no transporte de massa.
Fonte: Adaptado SATO, 1998.

Em processos de hidratação rápidos, onde o hidrato principal é a etringita, contribuem para uma estrutura densa com melhores resistências mecânicas quando adotado materiais mais finos gerando grande impulso nas resistências das primeiras idades (KORDE et al, 2019).

Enquanto a porosidade total é um parâmetro influente na resistência à compressão, a porosidade efetiva é usada para correlacionar com a condutividade hidráulica. Porosidade efetiva é definida pela razão entre o volume de poros conectados e o volume total do material considerando toda a estrutura do sistema de poros, tais como tamanho dos poros, suas distribuições e a sua conectividade (ZHONG e WILLE, 2015).

A resistência mecânica do concreto também está intimamente associada a porosidade e resultados na zona de transição na interface agregado e pasta de cimento (ITZ) do concreto que indicam que a hidratação do cimento tardia, altera as características dos poros e aumenta especialmente o seu volume com maior tamanho o que modifica e altera o desempenho do material. Em geral os poros nas pastas de cimento endurecido são divididos em micro poros, mesoporos, poro capilares médio e grande. Onde os pequenos poros podem se fundir aos maiores fornecendo um volume maior que estão relacionados a performance do material reduzindo sua resistência (YANG et al., 2020).

No entanto sabe-se que concretos de auto desempenho como o concreto CAA, são mais susceptíveis a microfissuração na sua zona de transição, devido ao elevado consumo de cimento e as incompatibilidade dos módulos de elasticidade entre a pasta e o agregado graúdo (NEVILLE, 2016).

Além do grande volume de vazios capilares e de cristais orientados, outro importante fator responsável pela baixa resistência da zona de transição no concreto é a presença de microfissuras. A quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, que incluem a distribuição granulométrica e tamanho do agregado, teor de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto fresco, condições de cura, umidade ambiente, e história térmica do concreto (VASKE, 2012, LUNA MOLINA, 2018).

Atualmente a análise da porosidade pode ser visualizada com auxílio de modelos de hidratação desenvolvidos numericamente, como o mostrado na Figura 5 (LI E YI, 2019).

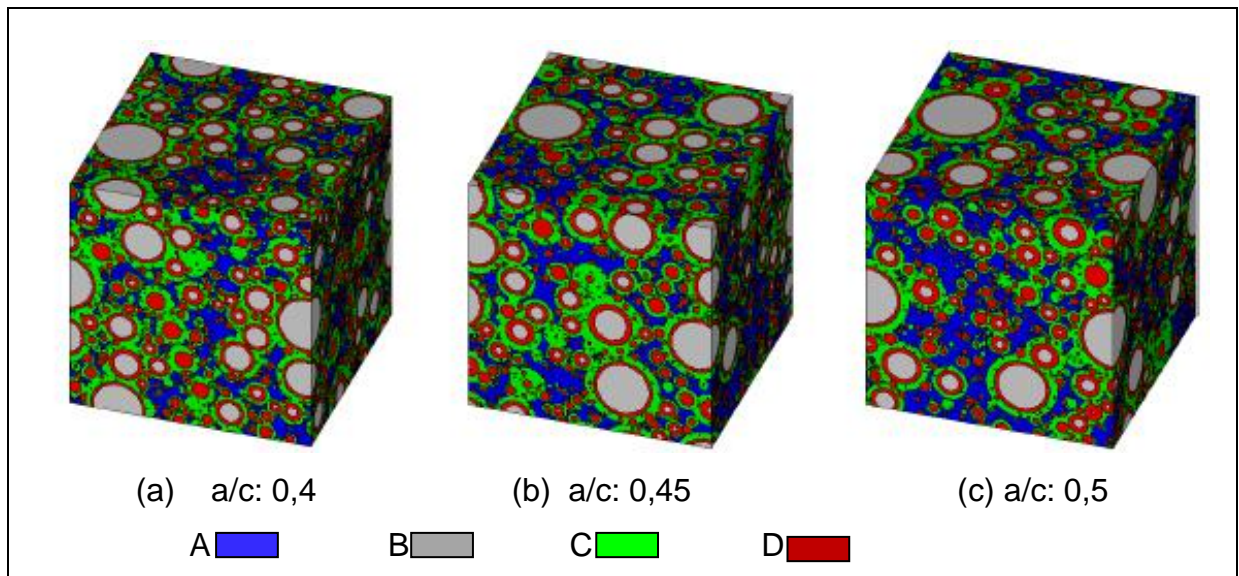


Figura 5 - Estrutura 3D do processo de hidratação aos 7 dias de cura. Distribuição dos poros na coloração A, B, C e D.

Fonte: LI E YI, 2019.

A Figura 5 mostra o processo de hidratação em perfis de amostras com diferentes relações água/cimento aos 7 dias de cura para os principais constituintes do cimento Portland. A distribuição de estrutura dos poros é complicada e irregular. Na imagem a coloração A mostra os poros capilares que apresentam em maior número na relação a/c 0,5. A coloração B mostra os locais do cimento não hidratado

que nas primeiras duas imagens são mais representativos. Por fim a coloração C e D representam o produto externo (C-S-H com baixa densidade) e interno (C-S-H com alta densidade) respectivamente. Em concretos expostos em ambientes agressivos (ambientes com cloretos e gelo/degelo) há um aumento na porosidade do material e do número de microfissuras, onde a resistência a compressão do material reduz aproximadamente 41% em relação ao valor original. Nestas condições os danos na estrutura de concreto acontecem por fatores simultâneos com influência significativa da estrutura dos poros, e as microfissuras geradas promovendo uma maior penetração de soluções (WANG et al. 2017).

Assim, os resultados da estrutura porosa do concreto ou de estrutura melhor refinada dependem principalmente da redução da relação água/cimento, de presença de adições que promovem uma maior resistência a difusão de íons no meio, e principalmente íons cloretos em concretos saturados (ZHANG et al., 2020).

Para verificar os aspectos de durabilidade, coeficientes de difusão de cloretos e resistividade elétrica a análise da porosidade da matriz cimentícia e absorção de água capilar da amostra são indicativas e relacionadas a difusão no estado transitório e estacionário porque estão claramente relacionados ao fluxo de íons e ao intervalo de tempo (JÚNIOR et al, 2019).

A estrutura dos poros é um fator chave na explicação da umidade e fenômeno de transporte iônico no concreto (SUGIYAMA E RITTICHAUY, 2008). Sabe-se que o mecanismo de falha no material começa por penetração de fluidos nos microporos do concreto e que a durabilidade é influenciada por processos nos quais partículas como íons penetram por poros. A porosidade total dos materiais a base cimento é a mais empregada para determinar as especificações físicas e geométricas dos poros e a maneira pela qual a solução pode se mover e preencher os espaços vazios (GHODDOUSI e SAADABADI, 2018).

No concreto auto adensável a ausência de vibração reduz o volume de água e leva a uma menor porosidade e permeabilidade. Existem também diferenças substanciais no coeficiente de migração de cloretos e a porosidade na zona de transição interfacial (ITZ), no topo dos agregados mais baixo quando comparado com a lateral e também ao fundo dos agregados com diferenças significativas se comparadas com outras misturas cimentícias (LEEMANN et al, 2010).

A concepção e preparação de misturas autocompactáveis com um grande volume de agregados finos e redução da taxa de água garantem a trabalhabilidade

do concreto e suas principais propriedades. Em observações de microscopia eletrônica, a porosidade da matriz é reduzida em relação ao concreto convencional, onde o tamanho do poro é em torno de 200 nm ou ligeiramente superior devido à limitada quantidade de água utilizada na preparação, condições de misturas, métodos de preparação e características de seus componentes (SANTAMARÍA et al, 2017).

Uma redução de porosidade é importante para análise de resistência a cloretos onde em CAA é atribuído ao preenchimento dos poros e compactação da microestrutura (OULDKHAOUA et al, 2020).

Sabendo que a porosidade das misturas de CAA diminui com o aumento do tempo de cura, devido à taxa adicional ou aumentada de hidratação e / ou reações pozolânicas, o aumento da densidade do concreto (CHOPRA e KUNAL, 2015) em que os estudos de porosidade inicial foram realizados apenas para os 28 dias de cura de ambos os tipos de concreto conforme as normas adotadas, sem considerar as primeiras idades, para considerar a melhor condição do estudo.

O estudo da absorção capilar é importante para aplicação de materiais de fins estruturais, vida útil do concreto e concreto em ambientes marinhos (JÚNIOR et al, 2019).

3.5 Concretos Especiais

Concretos especiais são aqueles que apresentam características específicas para atender às necessidades das obras onde os concretos convencionais não podem ser empregados. Eles possuem como objetivo melhorar as deficiências encontradas no concreto convencional ou incorporam propriedades não usuais ao material correntemente utilizado. Os principais concretos especiais são: o concreto de alta resistência, o de alto desempenho, o auto adensável, os de massa, rolado, leve, pesado, com resíduos reciclados, projetado, com polímeros, fibras, colorido, branco, graute, com aditivos e adições especiais, e os concretos do futuro, tais como: com cura interna, condutivos eletricamente, com retração reduzida ou nula, concreto auto limpante, concreto fotogravado, concreto translúcido e outros (HELENE E TUTIKIAN, 2011).

3.5.1 Concreto Auto Adensável

Um dos tipos de concreto especial são os CAA que surgiram no Japão em 1988, com seu primeiro protótipo desenvolvido para garantir estruturas mais duráveis. Este concreto foi definido em três estágios: no estado fresco um concreto auto compactável para os estágios iniciais evitando defeitos estruturais; e no estágio endurecido provê proteção contra fatores externos. Este material foi desenvolvido com uma metodologia de limitação do tamanho dos agregados, baixa taxa de água na mistura com o cimento e o uso de aditivos superplastificantes (OKAMURA, 1999).

O concreto auto adensável é uma mistura que expelle o ar aprisionado sem vibração e flui por obstáculos, como a armadura no concreto armado, para preencher as formas. Além disso, o CAA supera a dificuldade de acesso próximo às cordoalhas e ancoragens e tem a vantagem de redução do nível de ruído e danos à saúde dos funcionários que manuseiam os vibradores portáteis. O CAA é muito útil para componentes de elevada taxa de armadura com obstáculos de qualquer forma, tanto em concreto pré-moldado, quanto para concreto moldado in situ e ainda para produção de esculturas de concreto (NEVILLE E BROOKS, 2013).

Em comparação com o concreto convencional, o CAA pode ser considerado material de alto desempenho pelo fato de não necessitar ser vibrado, em função de suas propriedades reológicas. As propriedades do concreto fresco são ajustadas em uma combinação de abordagens de dosagem, proporção da mistura e trabalhabilidade (KHAYAT E SCHUTTER, 2014).

Mesmo considerando que as misturas de CAA contenham os mesmos componentes que os concretos convencionais, existem diferenças verificadas no comportamento reológico do CAA com relação ao CC, e em suas propriedades no estado fresco, que garantem a sua alta resistência à segregação e deformabilidade.

No entanto, é importante constatar que essas características são alcançadas pelo uso de aditivos, minerais e químicos, diferentemente dos concretos convencionais. A presença de aditivos é indispensável na produção do CAA (CAVALCANTI, 2006; ALBERTI et al., 2019).

Dentre as vantagens do CAA pode-se ressaltar alguns aspectos tecnológicos, ambientais e econômicos de sua utilização. Em termos de aspectos tecnológicos pode-se destacar como principal, o aumento da durabilidade das estruturas, visto que, a não necessidade de adensamento, elimina as bolhas de ar decorrentes da má vibração do concreto, grandes responsáveis pela redução da resistência, e

consequente, redução da durabilidade da estrutura. Permite-se assim, a concretagem de elementos de seções reduzidas, lembrando-se que é cada vez mais freqüente a opção pela execução de peças esbeltas, as quais apresentam por consequência grande densidade de armadura, sendo, portanto, muito susceptíveis a defeitos (RAZERA, 2012).

As características de uma microestrutura mais uniforme e uma zona de transição menos porosa podem ser obtidas com o uso de agregados mais finos, menores que 600 μ m, viscosidade apropriada obtida por um agente controlador; relação água/cimento aproximadamente de 0,4, uso de superplastificante; menos agregado graúdo que o usual (50% do volume de todos os sólidos) e agregado de boa forma e textura (NEVILLE E BROOKS, 2013).

A principal diferença entre o CC e o CAA são as características reológicas superiores do último. Um CAA típico é um concreto fluido, com um valor de abatimento acima de 200 mm e um valor de espalhamento acima de 600 mm (diâmetro da amostra de concreto após a remoção do cone de abatimento, de alta coesão, e pode ser lançado e adensado sem a ajuda de vibradores) (METHA E MONTEIRO, 2014). A norma brasileira ABNT NBR 15823 (2017) classifica o CAA a partir de uma série de requisitos técnicos dentre eles o espalhamento, variando entre 550 a 850 mm em função de sua aplicação.

O concreto auto adensável é mais sensível que o concreto convencional para o desenvolvimento do traço e para suas propriedades, e os resultados do desempenho estrutural e durabilidade dependem do projeto, da sequência, do tempo e do procedimento da mistura (ASGHARI et al., 2016).

Problemas em vista da sensibilidade do CAA em relação á permeabilidade da água e a cinética de sua absorção, principalmente para evitar a segregação do material no estado fresco, predizem a necessidade do uso de agregados mais refinados do que no convencional, onde o comportamento do fluxo e as propriedades de endurecimento do material promovem um melhor desempenho em relação às propriedades mecânicas gerais, com alterações no processo de hidratação do cimento (BEHERA et al., 2019).

O concreto auto adensável apresenta tamanho de poros e ITZ mais reduzidos em relação ao concreto convencional onde o efeito da difusividade dos íons de cloreto não parece ser tão significativo em concretos com mesma resistência mecânica e relação água/cimento (ZHU, 2020).

3.6 Durabilidade do Concreto

A expressão “durabilidade do concreto” é usualmente empregada para caracterizar, em termos gerais, a resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos físicos e químicos. A natureza, a intensidade e os mecanismos implicados em cada um desses diversos ataques podem variar consideravelmente, e essa é a razão pela qual a expressão durabilidade do concreto é entendida como muito vaga (AÏTCIN, 2000).

A norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) que trata sobre projeto de estruturas de concreto descreve o tempo de vida útil como o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto sem exigir medidas extras de manutenção e reparo. É após esse período que começa a efetiva deterioração da estrutura, com o aparecimento de sinais visíveis como: produtos de corrosão da armadura, desagregação do concreto, fissuras entre outros. A norma pressupõe uma vida útil de no mínimo 50 anos. O uso de ensaios tecnológicos pode fornecer informações valiosas para os engenheiros na avaliação da integridade estrutural e na manutenção de uma estrutura existente.

De acordo Metha e Monteiro (2014), o ACI (Concrete Terminology) define a durabilidade do concreto de cimento Portland como a sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão, e outras condições de serviço. Em outras palavras, um concreto durável preservará sua forma, qualidade e capacidade de uso originais quando exposto ao ambiente para o qual foi projetado.

Vale salientar que o uso de concreto “durável” não confere necessariamente durabilidade á estrutura. Além do intemperismo, ataque químico e abrasão, o fator tempo é uma variável importantíssima já que o concreto deve ter um desempenho mínimo ao longo de toda a vida útil da estrutura. O desempenho de um material é entendido como seu comportamento relacionado ao uso, que pode ser: desempenho mecânico, acústico, estético, químico entre outros (ANDRADE, 2005; DYER, 2014).

A norma de desempenho ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013) que trata sobre Edificações habitacionais – Desempenho, estabelece parâmetros, objetivos e quantitativos que podem ser medidos, com foco, não apenas nos materiais, mas na capacidade do uso e operação. Dessa forma, buscam-se o disciplinamento das relações entre os elos da cadeia econômica e a diminuição das incertezas dos critérios subjetivos (CBIC, 2013).

Esta norma verifica o comportamento em serviço da edificação, de forma que os estados limites de serviço, por sua ocorrência, repetição ou duração, não causem efeitos estruturais que impeçam o uso normal ou que levem ao comprometimento da durabilidade da estrutura (CORDOVIL, 2013).

No caso do concreto estrutural, o principal desempenho, mas não o único, está relacionado à resistência à compressão, salvo em alguns mecanismos de deterioração. Essa resistência é crescente, tendendo a um valor limite, devido à hidratação gradual do cimento, contribuindo para o incremento do desempenho mecânico da estrutura. Entretanto este concreto está sujeito à ação de intempéries como, por exemplo, ao dióxido de carbono (CO_2) existente no ambiente, que reduzirá com o tempo a sua alcalinidade, ou seja, seu desempenho químico provocando despassivação na armadura abrindo o caminho ao processo de corrosão da armadura, que contribuirá para a perda do desempenho mecânico da estrutura (ANDRADE, 2005).

A durabilidade no contexto europeu, entre as quais a norma NF EM 197-1, para cimentos, as normas NF EM 12620 e XP P 18-545 para agregados, a norma NF EM 934-2 para aditivos, NF EM 206-1 para concreto e FD P 18-011 com recomendações para reação álcali-agregado, gelo/degelo e reações com sulfatos, define os objetivos e a escolha, com precisão, das características do concreto em função da agressividade do meio no qual se encontra a estrutura, de forma a aperfeiçoar suas propriedades à fim de adaptá-las à duração de uso desejada. As especificações são concernentes ao tipo e à dosagem mínima de cimento, à compactação mínima, ao valor máximo da relação água/cimento, ao cobrimento mínimo das armaduras e ao teor máximo de cloretos no concreto. A norma NF EN 206-1 define os teores máximo de íons cloreto no concreto em função de seu tipo de utilização (OLLIVIER E VICHOT, 2014).

Os códigos e normas precisam se adaptar à realidade se atentando para as questões de durabilidade e vida útil das estruturas, onde as abordagens precisam considerar a experiência local e nos materiais os requisitos de resistência a compressão e desempenho que aos 28 dias não necessariamente se relacionam ao desempenho da durabilidade.

A degradação do concreto como relatado depende de vários fatores incluindo os materiais constituintes usados em sua produção, as proporções da mistura, sua fundição e cura, ações na estrutura, projeto estrutural e seu detalhamento,

exposição ambiental, intervenções ao longo dos anos e manutenção da estrutura ao longo da sua vida. Ao contrário da pedra, o concreto é monolítico e apresenta diferentes desafios para sua conservação. O ACI 364.1R apresenta um guia para a avaliação de estruturas de concreto antes à reabilitação (ACI 364.1R, 1999) e requer uma compreensão clara da estrutura e de seu ambiente. O campo emergente de conservação do concreto apresenta novos desafios para a comunidade científica e há experiência limitada em estudos de caso e nenhuma regra fixa pode ser amplamente aplicada (BORG, 2020).

Um teste amplamente utilizado para estudar a durabilidade do concreto é o de permeabilidade ao cloreto, onde a permeabilidade do ligante/concreto é um dos principais fatores que determina a sua durabilidade. A corrosão da armadura geralmente reduz a integridade estrutural do concreto principalmente quando afetados pelo ingresso de cloretos presentes em fontes como à água do mar ou sais de degelo e que conseqüentemente reduzem a alcalinidade do sistema de poros do concreto causando a despassivação do reforço (ADESINA e AWOYERA, 2019; AWOYERA, 2020).

Condições severas combinadas e a diferença na resistência a penetração de fluidos no concreto e seus limites para taxas máximas de penetração são instrumentos de desempenho e de durabilidade (HOOTON, 2019).

Em geral, são estudados efeitos combinados dos processos que podem gerar degradação no material tais como os relacionados a corrosão, ciclos de secagem e molhagem e tensão de operação na estrutura, que podem ser estudados quanto a índices de durabilidade como a profundidade de carbonatação, corrosão do reforço analisando modelos teóricos (YONG, 2020).

Recentemente, diferentes projetos de pesquisa incluindo suplementos de finos (micro e nano) em materiais cimentícios são usados para reduzir o impacto da degradação do meio do concreto quando adicionados a mistura melhoram as propriedades: resistência à compressão, reduzem a segregação, reduzem o calor de hidratação que evolui da reação água-cimento (processo exotérmico), reduzem a permeabilidade, aumentam a resistência à corrosão, melhoram a ligação aço-concreto necessária para a produzir a integridade estrutural que conseqüentemente aumentam sua durabilidade (AKHNOUKH, 2020).

Deste modo, verifica-se que o estudo do transporte dos fluidos no concreto e sua permeabilidade estão relacionados com a durabilidade e degradação.

3.7 Transporte de Fluidos no Concreto

O transporte de fluidos no concreto foi apontado por Neville (2016) como um fator muito importante para a questão de durabilidade, onde a mesma depende muito da facilidade com que os fluidos, sejam líquidos ou gases, podem penetrar e se movimentar no interior do concreto – característica esta que é normalmente denominada permeabilidade do concreto. À rigor, a permeabilidade se refere ao fluxo através de um meio poroso. O movimento dos diversos fluidos através do concreto por meio dos sistemas porosos ocorre por três mecanismos: permeabilidade, difusão e sorção. A permeabilidade se refere ao fluxo sob um diferencial de pressão. A difusão é o processo de movimentação de fluidos que decorre por um diferencial de concentração e sorção é caracterizada pelo resultado do movimento capilar nos poros do concreto abertos ao meio (NEVILLE, 2016).

O interesse das condições de durabilidade é a penetrabilidade do concreto em função da permeabilidade e difusão de íons agressivos ao material.

As substâncias agressivas, tanto para o concreto como para as armaduras, penetram através da rede de poros da microestrutura do concreto; dentre as diversas substâncias (fluidos) que se destaca a água, pura ou com íons dissolvidos, especialmente os íons cloretos e os íons sulfato, o gás carbônico e o oxigênio (PAN et al., 2017; NAMOULNIARA et al., 2019; SAETTA et al., 1993; SHAHEEN et al., 2015; XU et al., 2018).

As modificações da porosidade, que incluem a estrutura dos poros e conectividade dos mesmos podem ter impactos significativos na melhoria no transporte de fluidos no material (permeabilidade). E esta permeabilidade eventualmente leva a materiais mais duráveis onde as características microestruturais dos materiais afetam a eficiência do transporte de fluidos no concreto (AZARSA et al., 2020).

O teor de umidade do concreto controla o acesso dos agentes agressivos para o interior do concreto, e também do oxigênio, elemento necessário para a ocorrência das reações de corrosão. O teor de umidade influi ainda na resistência a passagem de corrente elétrica no concreto (SATO, 1998).

As forças impulsoras do transporte destes fluidos no concreto podem ser: a diferença de concentração, de pressão, de temperatura, de densidade, de potencial elétrico e a sucção capilar (NEPOMUCENO, 2005).

Pesquisas sobre o transporte direcional de fluido através de materiais porosos relatam que o fluido pode penetrar através da macroestrutura de um lado para o outro, mas seu transporte está bloqueado em a direção reversa. O transporte é conduzido por pressão mecânica, tensão superficial ou forças químicas que os materiais porosos finos apresentam diferentes pressões/forças/tensões, dependendo do lado em que o líquido é alimentado e a diferença resulta no direcional do transporte de fluidos, que acaba por dificultar a observação experimental do transporte de líquidos (ZHAO et al., 2020).

Devido a complexidade da microestrutura do concreto as pesquisas teóricas e experimentais sobre as propriedades do concreto tornam-se um desafio (YIO et al., 2019). A complexidade da investigação dos mecanismos de transporte aumenta com o uso de adições ou aditivos que alteram de maneira diferente as principais propriedades de transporte (BULLARD et al., 2011; BOGAS E REAL, 2019).

O ingresso de fluidos, seja líquidos e/ou gases no concreto e de íons agressivos no material, como o cloreto, ocorre por meio de fenômenos como a permeabilidade (ingresso através da existência de uma pressão externa), a difusão (ingresso por um gradiente de concentração), a absorção capilar (ingresso gerado sob a presença de uma pressão interna) e a migração (proveniente do efeito de um campo elétrico) (MAGALHÃES, 2019).

Os diferentes mecanismos de transporte de massa no concreto podem ocorrer de forma individual ou em conjunto (permeabilidade, difusão ou sorção – sucção capilar). Quando ocorrem em conjunto, simultaneamente algum dos mecanismos ou todos os mecanismos que prevalece sobre os outros é o que é geralmente analisado de modo a simplificar o entendimento do processo de transporte e intervir no mesmo para aumentar a durabilidade do material (MEDEIROS, 2008).

A maioria dos mecanismos de transporte em um material poroso é tratada como sendo dependente de um potencial que gera um tipo de fluxo de massa. Nilsson e Tang (1996) que propõem uma expressão geral que representa o fenômeno de transporte em materiais porosos, que dependem do gradiente de potencial ψ e das propriedades κ_ψ do material em uma profundidade x .

O fluxo de massa q_m pode ser expresso de acordo com a equação 1:

$$q_m = -\kappa \psi \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1)$$

Este gradiente pode ser água sob pressão, a diferença de concentração quando o fenômeno for à difusão, a diferença de pressão no caso de penetração de gases, ou ainda a diferença de potencial elétrico quando o mecanismo atuante é a migração (NEPOMUCENO, 2005).

Os transportes de íons em corpos de prova parcialmente submersos acontecem por absorção capilar e quando o corpo de prova atinge a saturação máxima ocorre o mecanismo de difusão (TROIAN, 2010).

3.8 Permeabilidade

Define-se permeabilidade como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso. Para fluxo contínuo, o coeficiente de permeabilidade (K) é calculado pela expressão de Darcy (Equação 2):

$$\frac{dq}{dt} = k \frac{\Delta H A}{L \mu} \quad (2)$$

Onde $\frac{dq}{dt}$: taxa de fluxo do fluido

μ : viscosidade do fluido

ΔH : gradiente de pressão

A : área da superfície

L : espessura do sólido

A expressão de Darcy define a permeabilidade do concreto com água pura, devido às suas interações com a pasta de cimento (METHA E MONTEIRO, 2014).

A lei de Darcy afirma que a taxa de fluxo no estado estacionário é diretamente proporcional ao gradiente da pressão hidráulica. A permeabilidade intrínseca, que utiliza as dimensões de área, é o conceito mais racional de permeabilidade, pois depende puramente das características dos poros médios e independente das

características que governam o fluxo, ou seja, a viscosidade que expressa a resistência ao cisalhamento do fluido (BASHEER et al, 2001).

A permeabilidade do concreto é determinada pelas características da matriz, pelos agregados e também a zona de transição agregada à matriz. Um material permeável não é necessariamente o mais poroso, um material pode ser altamente poroso e ainda exibir baixa permeabilidade ou o contrário. O requisito essencial para a permeabilidade é a conectividade dos poros (BOGAS E REAL, 2019).

O fluxo de água em meios porosos de baixa permeabilidade se desvia da lei linear e exibe uma relação do tipo não-linear entre fluxo de água e o gradiente hidráulico, referindo-se ao fluxo não-darciano (LEI et al., 2018; WANG et al., 2020).

3.9 Difusão

A difusão pode ser caracterizada como o processo de transporte de um constituinte em determinado meio, sob efeito de sua agitação aleatória em uma escala molecular. Se existe uma diferença de concentração entre dois pontos, esse fenômeno produz um transporte global do constituinte considerado, desde a zona mais concentrada até a zona menos concentrada (nesse sentido), até que haja equilíbrio das concentrações (OLLIVIER E VICHOT, 2014).

Este processo é o mecanismo de transporte predominante na análise do ingresso dos íons cloreto no concreto. O deslocamento do cloreto na fase líquida no concreto é determinada pela estrutura da pasta de cimento hidratada e suas interfaces com os agregados, pelas suas características químicas e físicas, pela concentração superficial das substâncias agressivas e pelas condições ambientais (NEVILLE, 2015).

O fenômeno de difusão é um processo que equilibra concentrações diferentes, em que o potencial ψ da equação 1, é igual a concentração C , e κ_ψ é o coeficiente de difusão.

A teoria da difusão é baseada em modelos matemáticos e o fenômeno pode ser expresso de maneira geral pela equação 3 abaixo, em que x é a profundidade onde se mede a quantidade de massa que penetrou.

$$q_m = D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

A primeira Lei de Fick trata da difusão com o fluxo unidimensional, e o coeficiente de difusão D depende, entre outros fatores, das características microestruturais do material e das substâncias presentes no fluido que preenche os poros. A constante C é constante que independe do tempo. E que parte do balanço de massa em sua forma mais geral e considerando que a concentração é dependente do tempo e varia de acordo com a posição x no interior do material (ZHAO, 2017).

A equação de difusão (1ª lei de Fick) aplicável ao vapor de água ou ao ar pode ser também expressa pela equação 4 (NEVILLE, 2016):

$$J = -D \frac{dc}{dL} \quad (4)$$

Onde, dc/dL : gradiente de concentração (kg/m^4 ou moles/m^4)

D : coeficiente de difusão (m^2/s)

J : Taxa de transporte de massa ($\text{kg/m}^2.\text{s}$ ou $\text{moles/m}^2.\text{s}$)

L : espessura do corpo de prova (m)

Mesmo que a difusão ocorra somente através dos poros, os valores de J e de D se referem à seção transversal do corpo de prova de concreto (OLLIVIER E VICHOT, 2014).

A primeira lei de Fick estabelece a interconexão entre a quantidade de substância difundida no tempo t na direção x sobre a superfície de uma única área, ou seja, o gradiente de concentração dc / dx e o tempo t estabelecendo o coeficiente de difusão, onde esta relação pode ser aplicada diretamente apenas no caso de difusão em estado estacionário, quando a concentração em diferentes pontos do sistema não muda com o tempo (DYADICHEV et al., 2019).

Partindo-se do balanço de massa de uma forma mais geral e considerando-se que a concentração varia em função do tempo e da posição no interior do material, é mais apropriada a utilização da 2ª Lei de Fick da difusão (Equação 5):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

Onde, C é a concentração, x a distância e t o tempo. Neste sentido, são definidos dois estágios distintos do fluxo por difusão: o estágio estacionário (primeira lei de Fick), caracterizado pelo fluxo constante das substâncias em difusão, e o estágio não estacionário (segunda lei de Fick) no qual o fluxo é dependente do tempo e da profundidade de penetração (SANTOS, 2006).

No caso da difusão de cloretos no concreto, o estado não estacionário da difusão representa o período em que o transporte dos íons através do concreto ocorre de forma combinada com a sua fixação às fases do cimento, enquanto que o estágio estacionário se refere ao período em que a fixação não ocorre mais e o fluxo dos íons cloreto se dá em uma taxa constante (CASTELLOTE et al., 2001; SPIESZ et al., 2012; HAN et al., 2019).

No que diz respeito ao tempo, a solução tende assintoticamente (sem variação ao longo do tempo) a uma concentração de cloretos em estado estacionário ao longo do domínio, ou seja, à medida que o tempo aumenta, onde uma constante de tempo ou tempo característico representa o tempo necessário para a difusão de cloreto atingir uma porcentagem fixa do total.

Com relação ao tempo característico o mesmo está associado à duração média do processo de penetração de cloretos no concreto ao longo do tempo que possui um domínio finito e definido. A característica de tempo não possui definição precisa e depende do valor da concentração, a variável tempo característico é um parâmetro típico de cenários da engenharia, principalmente aqueles regidos pela difusão onde o processo quase se aproxima da solução de estado estacionário (SANCHEZ-PEREZ E ALHAMA, 2020),

Por fim, o coeficiente de difusão não é só influenciado pelo tempo e concentração de íons, mas também pela finura, fração volumétrica e morfologia dos agregados. Para o coeficiente de difusão, os agregados com características irregulares podem diminuir a difusividade geral do concreto por aumentar a tortuosidade da matriz onde diminuem ou eliminam o efeito da finura do agregado (LIU et al., 2018).

3.9.1 Difusão de cloretos

A literatura observa que em muitos casos as irregularidades visuais no concreto e a presença de vazios nem sempre é encontrada em casos de corrosão. É

sugerido que as limitações do transporte difusional podem produzir mais facilmente um anólito (transporte da matéria aumentando a concentração dos íons, principalmente íons cloreto) suficientemente agressivo causando o crescimento local da degradação (ANGST et al., 2019).

À rigor, para que haja a corrosão, é determinante a despassivação da armadura, que ocorre devido à presença de uma quantidade suficiente e cloretos, à queda do pH causada pela carbonatação ou à uma combinação de ambos os fatores. Entretanto, a despassivação somente deixa a armadura vulnerável à corrosão (SHIMONUKAY, 2011).

A corrosão das barras de aço nas estruturas de concreto é um problema sério, principalmente em áreas costeiras e também responsável por vários problemas prematuros nas estruturas. A passividade conferida pela alcalinidade do cimento à superfície do aço de reforço é ineficaz quando a concentração de cloreto na superfície do aço excede um valor limite crítico (SURIYAPRABHA et al., 2017).

A difusão de cloretos é um dos principais mecanismos de transporte que afeta a durabilidade das estruturas de concreto armado devido a corrosão que acarretam. A determinação do coeficiente de difusão dos cloretos é um dos maiores desafios para o meio técnico, porque dele depende a previsão de vida útil das estruturas em ambientes contaminados. O fenômeno da difusão dos cloretos no concreto é complexo, pois existem várias possibilidades de combinações dos diversos fatores que o influenciam, tais como: a variação da concentração superficial de cloreto com o tempo, variação da temperatura, variação do coeficiente em função do íon combinado, capacidade de combinação que varia de acordo com o tipo de cimento, fluxo tridimensional, modificação da microestrutura ao longo do tempo e outros fatores que afetam o material (NEPUMURENO, 2005).

Os íons cloreto são encontrados no interior do concreto de três formas. A primeira quimicamente combinada com os produtos de hidratação do cimento, formando os cloroaluminatos, outra fisicamente retida por adsorção física à superfície dos poros capilares e uma terceira parte, denominada de cloretos livres, dissolvidos na solução dos poros e disponíveis para a reagir com a armadura (FIGUEIREDO, 2005; NEVILLE, 2016).

A equação 6 considera o coeficiente de difusão e a concentração de cloretos na superfície, onde C_c é a concentração de cloretos combinados e C é a concentração de cloretos livres em função de uma profundidade x e um tempo t .

$$\frac{\partial C}{\partial t} = d \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C_c}{\partial t} \quad (6)$$

Esta equação combina os mecanismos de concentração dos cloretos através do mecanismo de difusão. Estudos relatados na bibliografia confirmaram que uma maior concentração de cloreto externo resulta em uma concentração de cloreto maior na solução de poros (HANSSON e SØRENSEN, 1990; ANN E SONG, 2007; OGIRIGBO E BLACK, 2017)

Os fatores que influenciam na penetração de cloretos no concreto são: a relação água/cimento, tipo de cimento, idade do concreto, diâmetro do agregado, temperatura, grau de saturação do concreto, presença de fissuras, carbonatação e tipos de sal (VITALI, 2013).

A equação 7 a 10 abaixo é uma expressão do coeficiente de difusão do cloreto dependente do tempo e profundidade da armadura (GJΦRV, 2015).

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_c}{2\sqrt{D(t)t}} \right) \right] \quad (7)$$

Onde,

$C(x, t)$: concentração do cloreto na profundidade x_c (% por massa do aglomerante)

C_s : concentração do cloreto na superfície (%)

x_c : profundidade após tempo t (m)

D : Coeficiente de difusão do cloreto (m^2/s)

t : tempo (s)

Para o cálculo do coeficiente de difusão do cloreto no concreto e erf (função matemática de erro ou curva de Gauss) a equação 7 após o tempo de referência t_0 e t' na idade do concreto de exposição ao cloreto é ajustada para a equação 8 e 9 onde exp é a função exponencial.

$$D(t) = \frac{D_0}{1-\alpha} \left[\left(1 + \frac{t'}{t} \right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t} \right)^{1-\alpha} \right] \frac{t_0^\alpha}{t} \kappa_e \quad (8)$$

$$\kappa_e = \exp \left[\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+\tau} \right) \right] \quad (9)$$

$$C(x) = C_{CR} \quad (10)$$

Onde, D_0 : coeficiente de difusão após tempo t_0

α : influência da idade no coeficiente de difusão

κ_e : parâmetro do efeito da temperatura

E_A : ativação de energia para a difusão do cloreto

R: constante universal dos gases

T: temperatura

A equação (10) representa o critério de corrosão do aço, onde, a concentração crítica do concreto C_{CR} necessária para a despassivação e início da mesma se iguala ao valor de $C(x)$ na profundidade x .

O coeficiente de difusão de cloreto relaciona-se tanto com as proporções de mistura do concreto com as idades de cura. Devido à hidratação contínua dos ligantes, a porosidade capilar do concreto diminui e o coeficiente de difusão de cloreto também diminui ao longo do tempo, mas os estudos não têm detalhado a dependência da difusividade do cloreto sobre a hidratação do ligante e as idades de cura do compósito.

3.9.2 Coeficiente de Difusão de cloretos

A taxa de difusão do íon cloreto é controlada pelo coeficiente de difusão, D , onde, os mecanismos de deterioração do concreto são impulsionados pelas propriedades de transporte (PARK et al., 2012). Modelos matemáticos são propostos na literatura para quantificar o coeficiente de difusão de cloretos e avaliar o ingresso do mesmo em estruturas de concreto e caracterizar esta propriedade (SHAFIKHANI et al., 2019).

O ensaio da difusividade dos cloretos baseia-se no método da rápida migração de cloretos (NT Build 492 Concrete, NORDTEST, 1999). Alguns métodos são aplicáveis para o controle de qualidade do concreto, entre eles o método da rápida migração do cloreto (RCM) que é um método não estacionário que combina a

resistividade elétrica do concreto para o estudo da difusividade do cloreto (GJΦRV, 2003).

Alguns modelos foram desenvolvidos para quantificar o coeficiente de difusão de cloreto, empregando métodos de teste padrão, como o método da rápida migração de cloretos (NT Build 492 Concrete). Na literatura, é apontado outros métodos, como: teste de difusão em massa com imersão salina - NT BUILD 443 Concrete (NORDTEST, 1995) e o método multi-regime, pela leitura da condutividade - UNE 83987 (UNE 83987, 2014) (GALAN e GLASSAER, 2015, GUIGNONE et al., 2019, MAO et al., 2020, MEDEIROS-JUNIOR et al., 2020).

A difusividade do cloreto aos 28 dias é um índice relativo que reflete a densidade, porosidade e mobilidade geral dos íons no sistema poro do concreto e indica a resistência a penetração do cloreto (GJΦRV, 2015).

A Tabela 1 mostra alguns valores gerais como parâmetro para uma avaliação abrangente da resistência à penetração do cloreto em vários tipos de concreto, com base na difusividade RCM (Método da Rápida Migração do cloreto – Método de migração non-steady-state) aos 28 dias.

Tabela 1- Resistência à penetração do cloreto de vários tipos de concreto, com base na difusividade RCM aos 28 dias.

Difusividade do cloreto $D_{28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Resistência à penetração do cloreto
> 15	Baixa
10-15	Moderada
5-10	Alta
2,5-5	Muito Alta
<2,5	Extremamente alta

Fonte: NILSSON et al., 1998.

Sabe-se que o coeficiente de difusão de cloreto é ajustado pela solução em função de erro e baseado na segunda lei de difusão de Fick, que é representada pelo coeficiente de difusão de cloreto aparente (D_a) no concreto.

Analisando e extrapolando tendências de ingresso de cloreto no concreto resulta em um modelo baseado na dependência do tempo e leva em consideração o fator idade do concreto (LUPING E GULIKERS, 2007).

Assim, o D_a é dado pela equação 11:

$$D_a = D_o \cdot \frac{f'(t_{ex})}{1-n} \cdot \left(\frac{t_o}{t}\right)^n \quad (11)$$

Onde t'_{ex} é a idade do concreto no início da exposição à cloretos e t é a duração da exposição. Um par de difusão conhecida, coeficiente e idade são representados por D_o e t_o . As constantes a e n são normalmente referidas ao fator idade do concreto.

Logo, o coeficiente de difusão de cloreto no concreto é uma média durante o período de tempo de exposição sabendo-se que, o concreto exposto ao ambiente carregado de cloretos e submetido um gradiente de concentração, possui uma diferença na superfície com alta concentração para o interior com baixa concentração (ZHANG et al., 2018).

Sabe-se também que o coeficiente de difusão está constantemente em alteração já que os novos produtos da hidratação do cimento (o processo de hidratação é contínua) e a distribuição do tamanho dos poros estão em constante mudança. Alguns pesquisadores se referem ao coeficiente de difusão de cloreto em um ponto no tempo como difusão instantânea considerando também a influência do tempo e os efeitos de estresse (tração e compressão) que representam alterações nos níveis do D (WANG et al. 2020).

Dados experimentais em concreto demonstram que a difusão diminui gradualmente com a profundidade e a concentração de íons cloreto aumentam com o tempo. Os resultados apontam que a difusão de íons cloreto no concreto são influenciados pelo diâmetro dos agregados e adições e sua fração volumétrica (LIU et al., 2019).

Logo, a difusão dos íons no concreto endurecido predominantemente é controlada pela composição e microestrutura do concreto que varia com o tempo. A determinação da concentração de por um método volumétrico (não apenas em uma direção) não destrutivo em tempo real em estruturas de concreto pode ser feita através da resistividade do concreto (VEDALAKSHMI et al., 2008).

3.10 Resistividade e condutividade

3.10.1 Resistividade

A resistividade elétrica é uma importante propriedade do concreto que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. Esta propriedade é fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do material (ZHU, 2020), e é um parâmetro importante na corrosão de estruturas de concreto armado.

O concreto de alta resistividade tem pouca possibilidade de desenvolver corrosão na armadura. A resistividade elétrica pode ser determinada com a aplicação de um potencial na superfície do concreto causada por uma pequena corrente na superfície (METHA E MONTEIRO, 2014).

Na estrutura porosa, a solução intersticial é responsável por grande parte do transporte da corrente. No caso de um concreto úmido, com mais poros, a medida de sua resistividade é mais baixa, independente da sua tortuosidade (LAGE, 2018). O concreto, quando saturado em água, comporta-se como um semicondutor, com valores de resistividade elétrica da ordem de $10^2 \Omega.m$. Enquanto seco, pode ser considerado isolante elétrico, com resistividade da ordem de $10^6 \Omega.m$ (HELENE, 1993).

Tortuosidade é uma propriedade intrínseca de meios porosos, usada para caracterizar a estrutura e estimar a condutividade elétrica e hidráulica, e também para estudar o tempo de transporte do fluido. No entanto a tortuosidade possui diferentes tipos - tais como a geométrica, hidráulica, elétrica e difusiva. (GHANBARIAN et al., 2013).

Para uma umidade relativa constante e em condições estacionárias, a resistividade aumenta para uma menor relação água cimento, e evolui com o tempo, devido as reações de hidratação ou pela adição de minerais reativos, como as escórias de alto forno e cinzas volantes. O mesmo efeito ocorre com a porosidade, onde quanto menor a porosidade maior é a resistividade da matriz. A alteração dos dois fatores influencia na resistividade do sistema das pastas de cimento (DONG et al., 2016).

A equação 12 que correlaciona a corrente (i) e o potencial (V) é dada pela lei de Ohm, onde R é a resistividade. A equação 13 apresenta a relação entre densidade de corrente elétrica (J) no material e campo elétrico (E). Esta equação é

utilizada quando estamos interessados em estudar os fenômenos elétricos que estão localizados em um ponto específico da amostra, sendo ρ é a resistividade elétrica, que é uma grandeza intrínseca do material analisado (GIROTTO E SANTOS, 2002).

$$i = \frac{V}{R} \quad (12)$$

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad (13)$$

A resistividade elétrica e difusividade de íons são diferentes formas de testar a permeabilidade do cloreto e a sua capacidade de penetrar no concreto. Testes acelerados são técnicas de resistividade muito utilizadas para a avaliação desta capacidade de penetração dos cloretos no concreto, por exemplo o teste RCM (Método de migração non-steady-state) (NAITO et al., 2020).

Os íons cloreto podem migrar através do concreto como resultado de um gradiente de concentração ou pressão que causa um fluxo de soluções com cloreto através dos poros ou capilares. Entre as opções de transporte no material, a difusão é a mais prejudicial em um ambiente marinho sendo as fissuras dependentes da natureza da porosidade. A baixa taxa de difusão é alcançada quando a fração volumétrica total da porosidade é baixa e a tortuosidade é alta. O concreto não é um material inerte, sendo que no processo de difusão parte dos íons podem reagir (física ou quimicamente) com a matriz cimentícia reduzindo o seu coeficiente (HORNAKOVA et al., 2020).

Para misturas de cimento Portland comum (CP), o principal mecanismo de fixação de cloretos é a formação da fase de sal de Friedel (Fs) onde o composto anidro do CP, aluminato tricálcico (C_3A), reage quimicamente com os cloretos. O produto dessa reação é conhecido como sal de Friedel (Fs) e possui fórmula química: $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ e variáveis (TALERO et al., 2011).

A conversão da fase hidratada do cimento AFm (monossulfato) em sal de Friedel (Fs) também é observada pela fixação do íon cloreto. Pode-se observar algumas semelhanças estruturais em ambas as famílias de Fs, sendo que a conversão de hidróxi-AFm em sal de Friedel é dada pela troca iônica de cloreto com íons hidróxido em o monossulfato (JONES et al., 2003).

Logo, os íons cloretos são encontrados na matriz cimentícia de duas formas: livres (dissolvidos na água dos poros) ou combinados com o C_3A e C_4AF hidratados (produtos da hidratação do cimento) formando cloroalumintos (sal de Friedel) (REAL et al., 2015).

O fenômeno da ligação do cloreto no concreto é potencialmente prejudicial ao material em questão. O material é facilmente corroído pela penetração de íons cloreto afetando a segurança de estruturas e suas operações (LIU, 1996; ORELLAN et al., 2004; HAI-YAN et al., 2019).

A lei de Fick não faz distinção entre a difusão de íons. No entanto há a dissociação de produtos químicos como o NaCl (cloreto de sódio) em água para íons Na^+ e Cl^- . Devido à sua carga elétrica, os íons criam um campo elétrico ao seu redor e impedem ou aceleram o movimento de outros íons dentro de seu campo. E a natureza da interação dependerá do tipo de cargas envolvidas. O valor do coeficiente de difusão é diferente, dependendo do tipo de íons, para o mesmo material com a sua resistividade elétrica intrínseca (BANDARA E MELLANDER, 2011; ALSHEET, 2020).

A Tabela 2 apresenta a variação do coeficiente de difusão que depende do tipo íon em um estudo de caso de concreto.

Tabela 2- Propriedades do Concreto e composição da solução do poro em um estudo de caso

Propriedades		Propriedades	
Tipo de Cimento	CSA	Porosidade (%)	13,40
Fator água/cimento	0,65	Tortuosidade	0,0368
Consumo de cimento (kg/m ³)	280		
Composição do cimento		Coeficiente de Difusão	
CaO	62,10	OH^-	19,40
SiO_2	20,40	Na^+	4,90
Al_2O_3	4,30	K^+	7,20
SO_3	3,20	SO_4^{-2}	3,90
Fases de Hidratação Inicial		Ca^{+2}	2,90
Portlandita	35,10	$Al(OH)_4$	2,0
C-S-H	73,50	Cl^-	7,50
Etringita (AFt)	2,90		
Monossulfato (AFm)	25,20		

Fonte: ALSHEET (2020)

Os íons são carregados no material pela capacidade do concreto em resistir a sua transferencia e dependem da sua resistividade. Há uma grande relação entre a resistividade elétrica e a deterioração dos processos no concreto com o aumento da

permeabilidade, surgindo degradações do material como a corrosão do reforço (AZARSA e GUPTA, 2017).

De acordo com Monfore (1968), a condução da corrente elétrica através do concreto é de natureza essencialmente eletrolítica e ocorre por meio dos íons presentes na água evaporável das pastas de cimento. A resistividade do agregado é muito maior que a resistividade da pasta cimentícia, e as partículas do agregado causam a obstrução da passagem elétrica.

A resistividade é um parâmetro importante - a medida que esta aumenta reduz-se a taxa de probabilidade a corrosão, onde há a relação entre a resistividade elétrica e a difusividade de íons LU, 1997)

Para quaisquer materiais porosos, a equação 14 (Nernst-Einstein) expressa a seguinte relação geral entre a difusividade e a resistividade elétrica do material:

$$D_i = \frac{R.T}{Z^2 \cdot F^2} \cdot \frac{t_i}{\gamma_i \cdot C_i \cdot \rho} \quad (14)$$

Onde:

D_i : Difusividade para o íon (m^2/s)

R : constante universal dos gases (J/kmol)

T : temperatura absoluta (K)

Z : valência iônica (-)

F : constante de Faraday (C/mol)

t_i : número de transferência do íon (-)

γ : atividade coeficiente do íon (-)

C_i : concentração de ions i na água (C/mol)

ρ : resistividade elétrica ($\Omega.m$)

Onde, a equação 15 pode ser simplificada substituindo as constantes R, T, Z, F, t_i , γ e C_i por apenas uma constante k sendo novamente escrita por:

$$D = \kappa \frac{1}{\rho} \quad (15)$$

Onde, D é a difusividade do cloreto, k é a constante e ρ é a resistividade elétrica do concreto. Logo, a relação entre difusividade do cloreto e resistividade

elétrica do concreto pode ser estabelecida pela coleta de dados em vários corpos de prova do concreto (GJΦRV, 2015).

Para Poursaee (2016), quanto maior a atividade iônica do eletrólito, menor a resistividade elétrica do concreto, sendo que um aumento na relação água/aglomerante (na umidade relativa do ambiente) ou eventual presença de íons agressivos tais como Cl^- , SO_4^{2-} , H^+ e outros, reduzirá a resistividade. Teores de apenas 0,6% de cloreto já são suficientes para diminuir a resistividade de uma argamassa em cerca de 15 vezes (NEVILLE, 2016).

Também se pode definir condutividade elétrica, que representa o inverso da resistividade, pelas equações 16 e 17.

As grandezas apresentadas pelas equações, que são de grande interesse nas medidas elétricas apresentadas pelos símbolos V (voltagem), i (corrente elétrica) e A (área da seção transversal do condutor) (GIROTTO E SANTOS, 2002).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (16)$$

$$\sigma = \frac{i.l}{A.V} \quad (17)$$

Medidas de resistividade elétrica podem ser executadas de maneira não destrutiva: usando técnicas como o Teste Wenner de linha de quatro pontos e espectroscopia de impedância (EIE). Estes utilizam eletrodos posicionados em uma superfície da amostra ou volumetricamente com um disco de eletrodo ou matriz linear.(AZARSA e GUPTA, 2017; CHINAGLIA et al., 2008; DANİYAL e AKHTAR, 2020).

Jen et al. (2017) compara as normas NT BUILD 492 e NT BUILD 443 e conclui que apesar de serem métodos práticos, são métodos conservadores e podem não haver tempo de verificar a formação do sal de Friedel. Além disso, Sun (2020) afirma a complexidade de experimentos de difusão de cloretos em estruturas de concreto e a necessidade deste estudo ser associado à absorção capilar e a evaporação de água durante os ciclos seco-úmido.

Há uma boa correlação entre os coeficientes de migração rápida, métodos normalizados e os métodos baseados na resistividade elétrica por EIE, onde o

monitoramento a longo prazo conclui que os coeficientes são ligeiramente melhores (AZARSA E GUPTA, 2017; NGUYEN e BREITKOPF, 2018).

3.10.2 Coeficiente de Difusão de cloretos – Equação de Warburg

O coeficiente de difusão é uma propriedade de transporte dos materiais e a fórmula desenvolvida por Warburg vem servindo como modelo canônico há mais de um século em soluções difusas em uma interfase eletrodo-eletrólito (HUNG, 2018). A equação da segunda lei de Fick sob certas regras iniciais e condições de contorno vai ser reduzida para nosso propósito de determinação da difusão de cloreto sozinho. O coeficiente de impedância de Warburg (σ_{ω}) está relacionado aos coeficientes difusionais do sistema (D) onde σ_{ω} pode ser obtido a partir da interseção de uma linha reta no eixo real da curva de Nyquist ou através do circuito equivalente de Randles obtidas por EIE.

A fórmula desenvolvida por Warburg também é usada para o estudo da difusão de íons no plano semi-infinito em soluções difusas em uma interfase eletrodo-eletrólito (LU et al, 2017). A partir do coeficiente de impedância de Warburg o coeficiente de difusão pos ser calculado de forma simples e com reprodutividade (SHI et al., 1999). O coeficiente de difusão aparente pode fornecer informações como uma constante no tempo e no espaço e tem sido comprovado no processo difusional resultante da ligação de cloreto e refinamento da estrutura do poro. Ele é função a uma relação exponencial ao fator idade e fornece informações sobre o efeito em longo prazo do coeficiente de difusão do cloreto (LUPING et al, 2007).

A impedância de Warburg (W) é caracterizada na técnica não destrutiva de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) por impedância Faradaica sendo composto por uma resistência de transferência de carga em série (VEDALAKSHMI et al, 2009).

A técnica de impedância AC no estudo de reações eletroquímicas mede a resposta da frequência sobre o mecanismo de transferência de massa/carga em um plano complexo ($Z = Z' i + Z''$). No desenvolvimento dos modelos de EIE a resposta AC da célula eletroquímica é convencionalmente descrita por um circuito equivalente e por equações cinéticas que levam as funções de impedância (Figura 6).

É muito importante entender como a interface eletrodo/solução se comporta. A representação de uma interface eletrificada simples é uma combinação em

paralelo de um resistor R_{tc} e um capacitor C_{dc} , e sendo representada por um modelo de circuito equivalente (Figura 7). A R_{tc} representa a relação entre corrente e potencial associada com o processo de transferência de carga, a C_{dc} representa a capacitância associada com a dupla camada elétrica, sendo ambos parâmetros dependentes do potencial. O circuito de Randles engloba além dos processos descritos, a impedância de Warburg (Z_w).

As expressões analíticas (18) a (20) descrevem o processo onde Z_w representa a impedância difusional e σ_w é o coeficiente de Warburg.

$$Z = R_s + \frac{Z_F}{1+i\omega Z_F C_d} \quad (18)$$

$$Z_F = R_{ct} + Z_w \quad (19)$$

$$Z_w = \sigma_w \omega^{-\frac{1}{2}}(1 - i) \quad (20)$$

Onde ω é a frequência angular, R_s resistência da solução eletrolítica, Z_F é o composto pela resistência de transferência de carga R_{ct} em série com a chamada impedância de Warburg Z_w que descreve o comportamento difusional, C_d é a capacitância da interface eletrodo/eletrólito (SHI et al, 1999).

Na maioria dos processos corrosivos que envolvem uma dupla camada elétrica Z_F é a impedância Faradaica em que $\lim_{\omega \rightarrow 0} Z_F = R_p$, onde R_p é o valor da resistência de polarização proposto por Stern (1958) (Wolyneec, 2003). Para critérios de reversibilidade das reações o coeficiente de Warburg está relacionado com os coeficientes de difusão de íons de cloreto isolados e, desta forma podemos reescrever σ_w e reduzir a equação 21 para uma reação reversível $R_{ct} \rightarrow 0$ (HU et al, 2016).

$$\sigma_w = \frac{RT}{F^2 A \sqrt{2} D^{1/2} C} \quad (21)$$

Logo, o valor do coeficiente de difusão para cloretos é calculado através da fórmula apresentada na equação 22:

$$D_W = \left[\frac{RT}{\sqrt{2} AF^2 \sigma_\omega C} \right]^2 \quad (22)$$

Onde, D_w é o coeficiente de difusão do cloreto em $m^2 s^{-1}$, usando σ_ω , A é a área da seção transversal do material (m^2), σ_ω é o coeficiente de Warburg ($\Omega m^2 s^{-1/2}$), C , concentração de cloretos em $mol m^{-3}$, R , constante dos gases em $JK^{-1} mol^{-1}$, T , temperatura em K , F , constante de Faraday em $C mol^{-1}$ (VEDALAKSHMI et al, 2009).

A impedância de Warburg é um exemplo de um elemento de fase constante para o qual o ângulo de fase é uma constante de 45° e sendo o módulo da impedância de warburg dada por $|Z_w| = \sigma 2^{1/2} / \omega^{1/2}$ que é inversamente proporcional ao quadrado da freqüência ($1/\omega^{1/2}$) com um elemento de capacitância associada a dupla camada elétrica com um valor de n de 0,5 (ROSS, 2005).

Desta forma, o coeficiente σ_ω , também pode ser expresso em termos de admitância Y_0 (equação 23), ou seja, o inverso da impedância expresso em Siemens que equivale o inverso do Ohm (Ω) também conhecido por Mho (Ω^{-1}) (ROCHA, 2017).

$$\sigma_W = 1/(Y_0 \cdot 2^{1/2}) \quad (23)$$

e reescrito em termos da impedância Z_w (equação 24) expressa em $\Omega^{-1} s^{1/2}$.

$$|Z_W| = 1/Y_0 \omega^{1/2} \quad (24)$$

Assim, valores baixos de Y_0 implicam em alta impedância Z_w e alta condutividade de Warburg. Como σ_ω é inversamente proporcional ao coeficiente de difusão D , valores baixos são desejáveis para permitir maiores resistência a corrosão dos revestimentos (BAYÓN et al, 2015).

3.11 Técnicas Eletroquímicas

A eletroquímica ocupa-se da análise da relação de fenômenos químicos e fenômenos elétricos. Ela trata da conversão da energia elétrica em energia química e vice-versa. Os processos eletroquímicos envolvem a reação redox (oxidação/redução) onde, há uma transferência de elétrons de uma substância para outra. A perda de elétrons por um elemento durante a oxidação está associada a um aumento no número de oxidação desse elemento. Na redução, há um ganho de elétrons ao qual está associado uma diminuição no número de oxidação de um elemento na reação (CHANG, 2013).

Uma reação é considerada eletroquímica se ela estiver associada a uma passagem de corrente elétrica através de uma distância finita, maior do que a distância interatômica (REED et al., 2007). Esta passagem de corrente envolve o movimento de partículas carregadas: íons, elétrons, ou ambos. Dessa forma, na maioria das reações que se manifestam em presença de uma superfície metálica, ocorre a passagem de corrente, e a reação é eletroquímica em sua natureza. Como na corrosão de um metal a superfície metálica está sempre presente, as reações básicas responsáveis pela corrosão são eletroquímicas (WOLYNEC, 2013).

Todo material ou substância possuem um conjunto único de propriedades, sendo que as propriedades químicas, como a condutividade, que pela passagem de corrente elétrica através do meio indica o movimento das cargas elétricas livres no interior e o comportamento de isoladores e condutores elétricos (TRITT, 2005; Li et al, 2018).

A resistência que um condutor oferece a passagem da corrente elétrica é definida como a razão entre a diferença de potencial nele aplicado e a intensidade da corrente produzida. Para comparar as resistências de condutores de diferente natureza, comparam-se suas resistividades, que é a resistência apresentada por um condutor unitário e seção de área unitária. O inverso da resistividade é a condutividade (PILLA, 2010).

Os métodos eletroquímicos são constituídos por um conjunto de técnicas eletroanalíticas. Dentre estas técnicas, destaca-se a impedância eletroquímica, estudo quantitativo das reações na interface eletroquímica da interface eletrodosolução (DANIYAL et al. , 2020).

Os processos da reação são analisados em uma célula eletroquímica, que consiste de um arranjo constituído de uma solução eletrolítica e de dois eletrodos imersos onde se processa a reação de oxido-redução (PILLA, 2010).

3.11.1 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) é baseada na medida de uma corrente em resposta a uma perturbação do potencial aplicado na forma de uma onda senoidal. A corrente medida é linearmente proporcional ao potencial aplicado (lei de Ohm) onde no lugar da resistência (R) temos a impedância (Z), e a resposta depende da frequência na qual o potencial e a corrente oscilam quando o potencial alternado é aplicado (SHAIK, 2019). A resistividade responde a seguinte equação 25:

$$R = \rho \cdot l/A \quad (25)$$

Onde,

R: Resistência elétrica do material (Ω);

ρ : Resistividade elétrica do material ($\Omega \cdot m$);

l : Comprimento do material (m);

A: Área da seção transversal do material (m^2).

A técnica utiliza uma célula eletroquímica composta de um ou mais pares de eletrodos (ânodos e cátodos), que geram um campo elétrico. Os pares de eletrodos polarizados atuam nas reações de redução, que ocorrem na zona do cátodo, e nas reações de oxidação, as quais ocorrem na zona do ânodo (XAVIER, 2012).

Quando um metal é introduzido em um meio aquoso, uma diferença de potencial se desenvolve através da interface metal-solução. As moléculas de água são polares e por isso são atraídas pela superfície carregada e orientam-se ao longo da interface. Quando um potencial é aplicado a este sistema, um eletrodo reversível permite à corrente fluir através da interface até que restaure o equilíbrio e um eletrodo perfeitamente polarizável não permite que a corrente passe através da interface. A diferença no potencial químico entre as barras da armadura e o eletrólito

é a força condutora para que a transferência de carga ocorra (METHA E MONTEIRO, 2014).

As técnicas eletroquímicas permitem obter informações sobre os parâmetros termodinâmicos e cinéticos do processo corrosivo e podem ser associadas com outros métodos de avaliação. Dentre algumas técnicas podemos citar as de potenciais de corrosão, resistência de polarização (R_p) e impedância eletroquímica que obtém uma boa correlação em estudos relativos aos íons de cloreto (Wu, 2017).

A EIE é comprovadamente a técnica mais adequada para abordagem do desempenho de corrosão do reforço no concreto e a previsão de vida útil de estruturas em concreto armado SOHAIL et al., 2020).

No estudo da migração de íons cloreto em materiais cimentícios, a técnica de EIE pode medir também a profundidade da migração do íon cloreto, que é quantificado através de um parâmetro (R_{ct}) do modelo de circuito equivalente associado a curva eletroquímica (DONG et al., 2019).

O circuito elétrico equivalente mais simples e amplamente usado para representar o comportamento do concreto é através a resistência do concreto R_s (resistência eletrolítica do concreto) em série com uma capacitância (C) e uma resistência de transferência de carga R_p conforme a Figura 6 ou com o elemento de Warburg como na Figura 7 (METHA E MONTEIRO, 2014).

A lei de Ohm é um conceito simples de resistência que exclui a frequência e o tempo, onde a mudança de fase depende da corrente e tensão senoidal. Quando expressa em função do tempo (t) o potencial de excitação senoidal é expresso como $E_t = E_0 \sin(\omega t)$ com resposta de corrente $I_t = I_0 \sin(\omega t + \phi)$, onde E_0 e I_0 são as amplitudes de potencial e corrente respectivamente; ω é a velocidade angular em radianos / segundo ($= 2\pi f$, onde f é frequência em hertz) e ϕ é a diferença do ângulo de fase entre a corrente e o potencial. Deste modo, a impedância (Z) é expressa pela equação 26 apresentada abaixo, expressada por uma função complexa onde Z' e Z'' representam impedância real e impedância imaginária respectivamente (BROCK, 2017).

$$Z = \frac{E_t}{I_t} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \phi)} = Z_0(\cos \phi + j \sin \phi) = Z' + jZ'' \quad (26)$$

A representação gráfica dos resultados é dada pela curva de Nyquist permitindo a melhor visualização e análise dos resultados.

Nestas curvas são plotados para cada excitação os valores dos componentes: real (Z') e imaginário (Z''). A impedância é representada na forma de um semicírculo de raio (R_p) sendo R_s a resistência eletrolítica ou da solução dos poros do concreto conforme esquema apresentado na Figura 6.

O circuito equivalente a curva é representado pela resistência à polarização (R_p) e uma capacitância interfacial (C) em paralelo e representa a interface aço-concreto pode ser caracterizada em termos simples relacionado diretamente à taxa de corrosão do aço (GLASS et al, 1998). O arco semicírculo capacitivo cobre a maior parte da região de altas frequências, que é atribuído ao processo de transferência de carga que está relacionado ao estado da superfície (LI e ZHANG, 2017).

Invariavelmente, necessita-se requerer a determinação dos dados em baixas frequências do aço em concreto para estimar com maior precisão os valores de (R_p) e estudar o mecanismo relacionado à transferência de carga na dupla camada elétrica da interface de filme / eletrólito passivo do eletrodo (WANG et al, 2016).

A Figura 7 inclui, após o semicírculo capacitivo uma região de baixas frequências com a impedância faradaica Z_F , a capacitância da interface eletrodo / eletrólito (C_d) e o coeficiente de impedância de Warburg (σ).

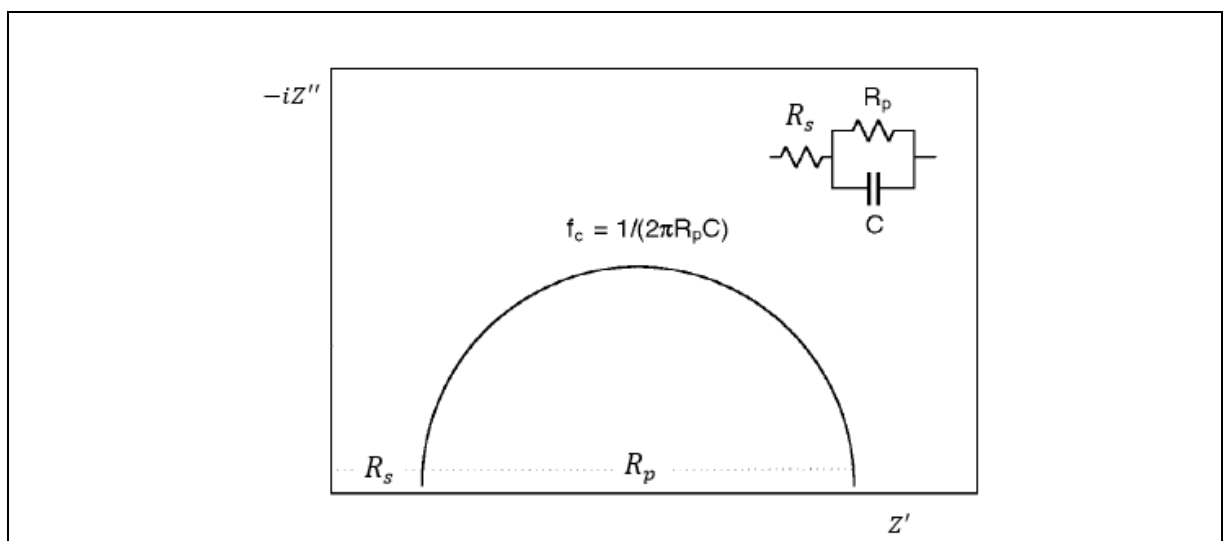


Figura 6 - Diagrama de Nyquist do espectro de impedância associado a zona de altas frequência interface aço-concreto e o circuito equivalente associado.

Fonte: Adaptado de Glass et al.(1998)

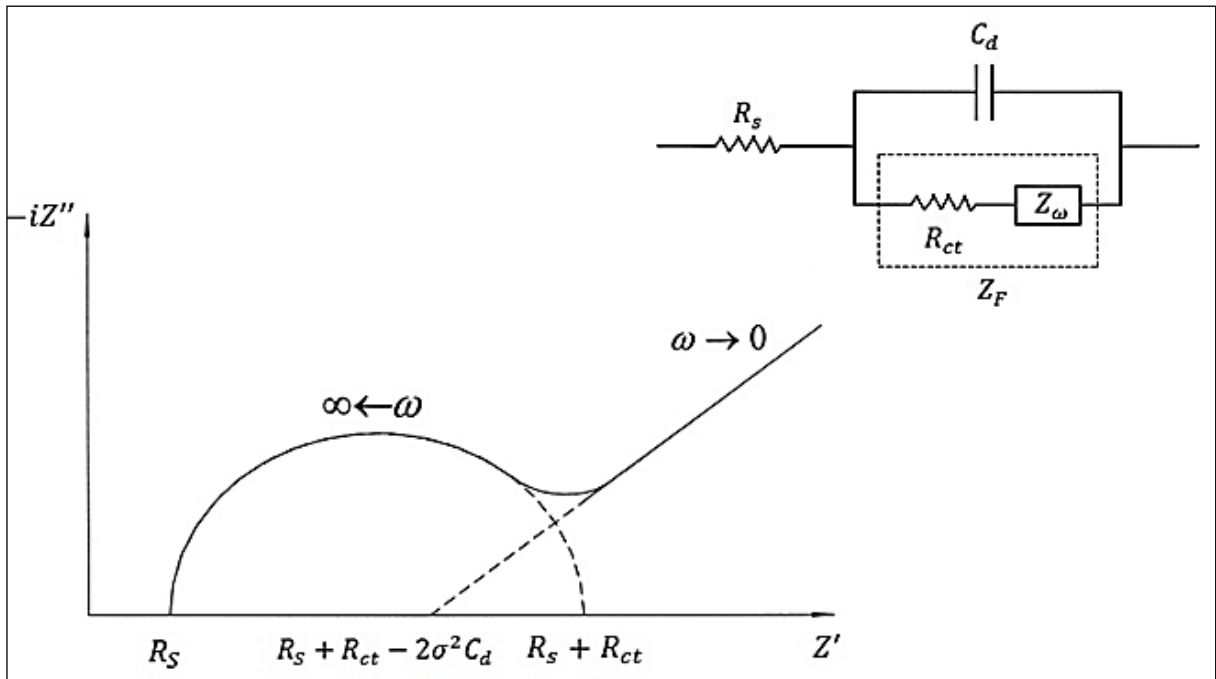


Figura 7 - Diagrama de Nyquist do espectro de impedância associado a uma reação eletroquímica do tipo Randles e o circuito equivalente associado.
Fonte: SHI et al. (1999).

A Z_F é o estudo da cinética da reação e do processo difusional de íons do processo composta pela resistência da transferência de carga R_{ct} em série com a impedância de Warburg Z_w .

Além dos componentes citados acima na modelagem do circuito equivalente, pode-se introduzir um elemento de fase constante (CPE) que é usado para a substituição de um capacitor ideal, que pode ser empregado para compensar a não homogeneidade do sistema, como no caso do concreto (SAGÜÉS et al, 1995).

Após a determinação das medidas eletroquímicas, construção do diagrama de Nyquist e da determinação do R_p , a intensidade de corrosão (I_{corr}) pode ser calculada pela equação de Stern e Geary (Equação 27) (MATTHEWS, 1975). Neste B representa a constante de Stern-Geary adotando o valor de 26 mV para armaduras em estado de corrosão e 52 mV para armaduras em estado passivo (JIN et al,2018).

A equação 28 é calculada pelo acréscimo da área de exposição da amadura (FAHIM et al, 2018).

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (27) \quad \text{e} \quad i_{corr} = \frac{B}{(A \cdot R_p)} \quad (28)$$

De acordo com os valores obtidos por i_{corr} , tem-se condições de classificar as condições de corrosão conforme a Tabela 3 de acordo com Song e Saraswathy (2007) expresso em $\mu A/m^2$ da barra de aço no concreto.

Tabela 3- Classificação da taxa de corrosão baseado na intensidade da corrente de corrosão

i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Classificação da Corrosão
< 0,2	Baixa expectativa de corrosão da barra
0,2 – 1,0	Possibilidade de corrosão em 10-15 anos
1,0 – 10	Expectativa de corrosão em 2-10 anos
> 10	Expectativa de corrosão em 2 anos ou menos

Fonte: Song e Saraswathy (2007)

Este ensaio permite a relação entre o cálculo de valores da corrente de corrosão e resistividade do concreto, que pode ser complementada por outros dados tais como diâmetro da barra, perfil do cloreto, carbonatação, porosidade, temperatura, espessura da cobertura, condições de exposição, padrão de fissura entre outros (TORRES-LUQUE et al., 2014).

A análise dos resultados de EIE em amostras de concreto armado é de alta complexidade, devido à sobreposição de arcos provenientes de fenômenos simultâneos e a ruídos da medida, associados, evidentemente, à heterogeneidade das amostras que dificultam a análise (RIBEIRO et al., 2015; Li et al., 2019).

Os resultados experimentais para concreto de cimento Portland sugerem que a resistividade do concreto é sensível à inclusão de agregados graúdos (HOU *et al.*, 2017).

Além disso a técnica de EIE pode ser usada para investigar a dinâmica de cargas que estão ligadas ou móveis sobre o volume de regiões de interface ou qualquer material líquido ou sólido, representando o comportamento do aço embutido no concreto (WU, 2017; RIBEIRO E ABRANTES, 2016).

3.12 Processo Acelerado

A condição dos ciclos de secagem e molhagem é sempre identificada como a condição ambiental mais desfavorável para a estrutura do concreto submetido a

processos de deterioração induzidos por cloreto (YE et al, 2012; JIN et al, 2018; CHENG et al, 2020).

Para prever o comportamento do concreto os ensaios de corrosão acelerada são utilizados pela comunidade científica com o intuito de obter resultados em um menor período de tempo, tendo em vista que o processo natural da corrosão geralmente leva anos para ocorrer (MONTEIRO et al, 2017). Para tanto, são necessárias altas concentrações de cloreto para iniciar a corrosão e a situação mais favorável com uma faixa de umidade relativa em torno de 90 a 95% e um concreto exposto a ciclos de secagem e molhagem (ANGST et al, 2009).

Devido à complexidade do concreto, o estudo dos danos no material ainda é uma tarefa desafiadora, devido principalmente, aos processos de transporte em concreto e os parâmetros que os controlam (OZBOLT, 2011; SHI, 2018).

Os ensaios de corrosão acelerada focados no transporte de cloretos ainda não possuem padronização no Brasil. No cenário internacional, apesar do número de documentos normativos, ainda não há avanço na padronização dos procedimentos (MEIRA E FERREIRA, 2019).

Um teste acelerado modifica as condições do ambiente natural, no entanto, testes acelerados podem ser ferramentas úteis e ajudam a identificar como as variações nos materiais que podem afetar seu comportamento e expressar efeitos a longo prazo em escalas mais curtas, permitindo, por exemplo, a avaliação de efeitos de degradação a longo prazo (GRAEFF E FILHO, 2008).

Segundo Angst et al. (2009) os teores de cloreto no concreto são interferidos pelos parâmetros: interface aço-concreto, concentração de íons, potencial eletroquímico, tipo de aglutinante, relação água/cimento, teor de umidade do concreto, disponibilidade de oxigênio na superfície do aço, resistividade elétrica, grau de hidratação, composição química do aço, temperatura, fonte do cloreto (misturada inicialmente ou penetrada no concreto endurecido), tipo de cátion que acompanha o íon cloreto, presença de outras espécies e substâncias inibidoras e pH da solução de poros no concreto.

Em ensaios de imersão e secagem ocorrem etapas que denotam movimentos iônicos onde, durante a molhagem os cloretos dissolvidos penetram por absorção capilar e difusão, e durante a secagem os íons que permanecem no interior dos poros, fixos por adsorção mantém o processo de difusão dos íons (YE, 2012).

4 Materiais e Métodos

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Filmes Finos e Novos Materiais (LAFFIMAT) e Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas (LabMat) na Universidade Federal de Pelotas.

Como o objetivo principal do trabalho foi investigar por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) os mecanismos de degradação em corpos de prova de CAA e CC as variáveis estudadas neste estudo foram:

Variáveis Independentes:

São as variáveis fixadas com o intuito de observar seu reflexo nas variáveis dependentes (variáveis de resposta). As variáveis independentes colocadas neste estudo são:

- Tempo de cura;
- Tipo de concreto (CC e CAA);

Variáveis Dependentes:

As variáveis influenciadas pelas variáveis independentes e que serviram de parâmetros para a análise do potencial de degradação e corrosão são:

- Penetração de íons cloreto,
- Intensidade de corrosão,
- Coeficiente de difusão de cloretos.

Foram realizada a análise de variância multifatorial (ANOVA) considerando os fatores cura em quatro categorias (3, 5, 7 e 28 dias) e tipo de concreto em duas (CC e CAA) nos resultados experimentais do coeficiente de difusão de cloretos (variável dependente) para as conclusões da resposta da penetração de ions cloreto nas amostras e condição de durabilidade.

A metodologia empregada no trabalho pode ser observada no fluxograma da Figuras 8.

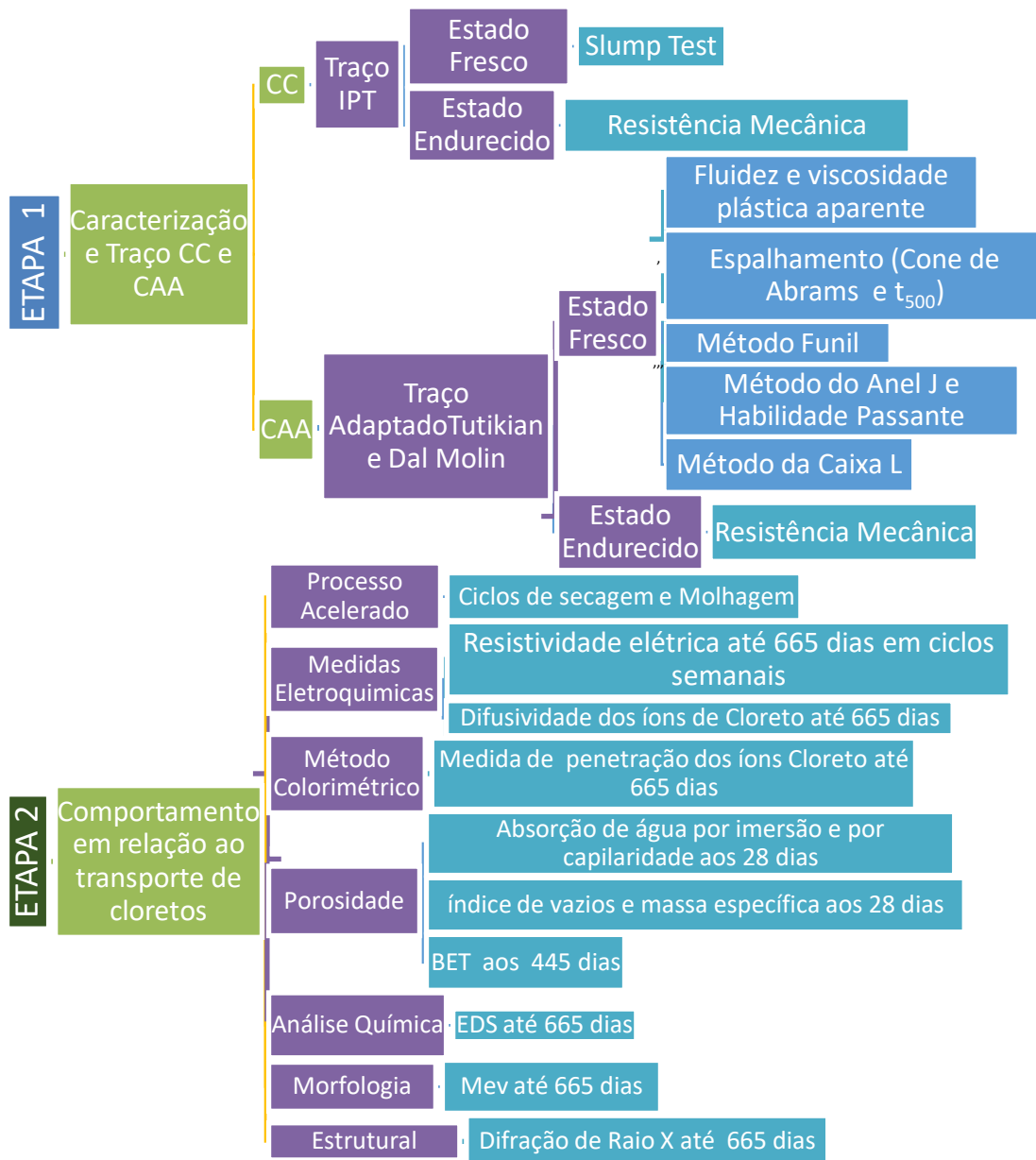


Figura 8 - Fluxograma do programa experimental- Etapas 1 e 2.

4.1 Materiais Empregados

Os materiais utilizados na produção das amostras nas Etapas 1 e 2 do trabalho são apresentados a seguir.

Os materiais utilizados para a elaboração dos traços do CC e CAA são os mesmos, porém com maior quantidade de finos e de aditivos superplastificantes no

CAA. Foi definido o tipo do cimento dependendo de três variáveis principais: disponibilidade do produto na região, características climáticas e mais empregados nas obras com CAA. Com relação aos agregados, tanto graúdo quanto miúdo, foram inertes, ou seja, não são suscetíveis a alterações de sua composição química, e com uma granulometria tão menor quanto possível obtendo curvas granulométricas contínuas. A dimensão característica máxima do agregado foi limitada a menor seção pela qual o CAA irá fluir, sendo esta uma recomendação da NBR NM 248 (ABNT, 2003b).

4.1.1 Cimento

Foi empregado cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) em conformidade com a ABNT 16697 (ABNT, 2018) da marca SUPREMO de massa específica $3,21 \text{ g/cm}^3$, segundo a norma brasileira ABNT 16605 (ABNT, 2017). Como os tipos de cimento tem efeito significativo sobre a resistividade, o cimento adotado possui menos adições e deste modo, menores variáveis no estudo (MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016). As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os dados do laudo técnico do referêcia do cimento.

O cimento CP V – ARI foi avaliado e qualificado como em conformidade com as normas técnicas da Associação Brasileira de Cimento Portland, possuindo alto grau de finura e resistência mínima à compressão aos 7 dias de 34 MPa.

Tabela 4 - Ensaio Mecânicos

Idade (dias)	Resistencia a Compressão (MPa)	Limites da NBR 16697
1	26,8	≥ 14
3	37,96	≥ 24
7	43,77	≥ 34
28	50,25	-

Fonte: Fornecedor.

Tabela 5 - Ensaio Físicos

			Limites da NBR 16697
Massa Específica (g/cm ³)		3,14	
Finura Resíduo de Peneiração (%)	75 µm	0,00	≤ 6,0
	45 µm	0,45	
	32 µm	4,31	
Tempo de Pega (min)	Início	203	≥ 60
	Fim	254	≤ 600
Expansibilidade (mm)		0,30	≤ 5,0

Fonte: Fornecedor.

Tabela 6 – Análise Mineralógica

		XRD	Bogue
Silicato Tricálcio	C ₃ S	59,73	61,58
Silicato Bicálcio (%)	C ₂ S	9,87	5,29
Aluminato Tricálcio (%)	C ₃ A	3,25	6,87
Ferro-aluminato Tetracálcico (%)	C ₄ AF	9,64	8,29

Fonte: Fornecedor.

Tabela 7 – Análise Química

			Limites da NBR 16697
Perda de Fogo (%)	-	3,23	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel (%)	-	0,91	≤ 1,0
Óxido de Silício (%)	SiO ₂	18,06	
Óxido de Alumínio (%)	Al ₂ O ₃	4,33	
Óxido de Ferro (%)	Fe ₂ O ₃	2,73	
Óxido de Cálcio (%)	CaO	59,43	
Óxido de Magnésio (%)	MgO	6,39	≤ 6,5
Sulfatos (%)	SO ₃	2,92	≤ 3,5
Óxidos de Potássio (%)	K ₂ O	0,98	
Óxido de Sódio (%)	Na ₂ O	0,22	
Cloretos (%)	Cl ⁻	0,01	
Anidrido Carbônico (%)	CO ₂	2,15	≤ 3,0
Cal Livre (%)		0,41	
Fator de Saturação de Cal		103,4	
Módulo de Sílica		2,6	
Módulo de Alumina		1,6	

Fonte: Fornecedor.

Ainda foi realizada a caracterização química de amostras de cimento em pó (Figura 9) a partir de análise de DRX em um difratômetro marca Rigaku, modelo ULTIMA IV equipado com uma fonte de radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,5418\text{\AA}$) com geometria de Bragg-Brentano. As medidas foram realizadas nas instalações da Universidade Federal do Pampa. Os parâmetros estabelecidos foram ângulo de varredura de 10° a 80° com variação de 2θ , a 40 kV e 20 mA, em temperatura ambiente.

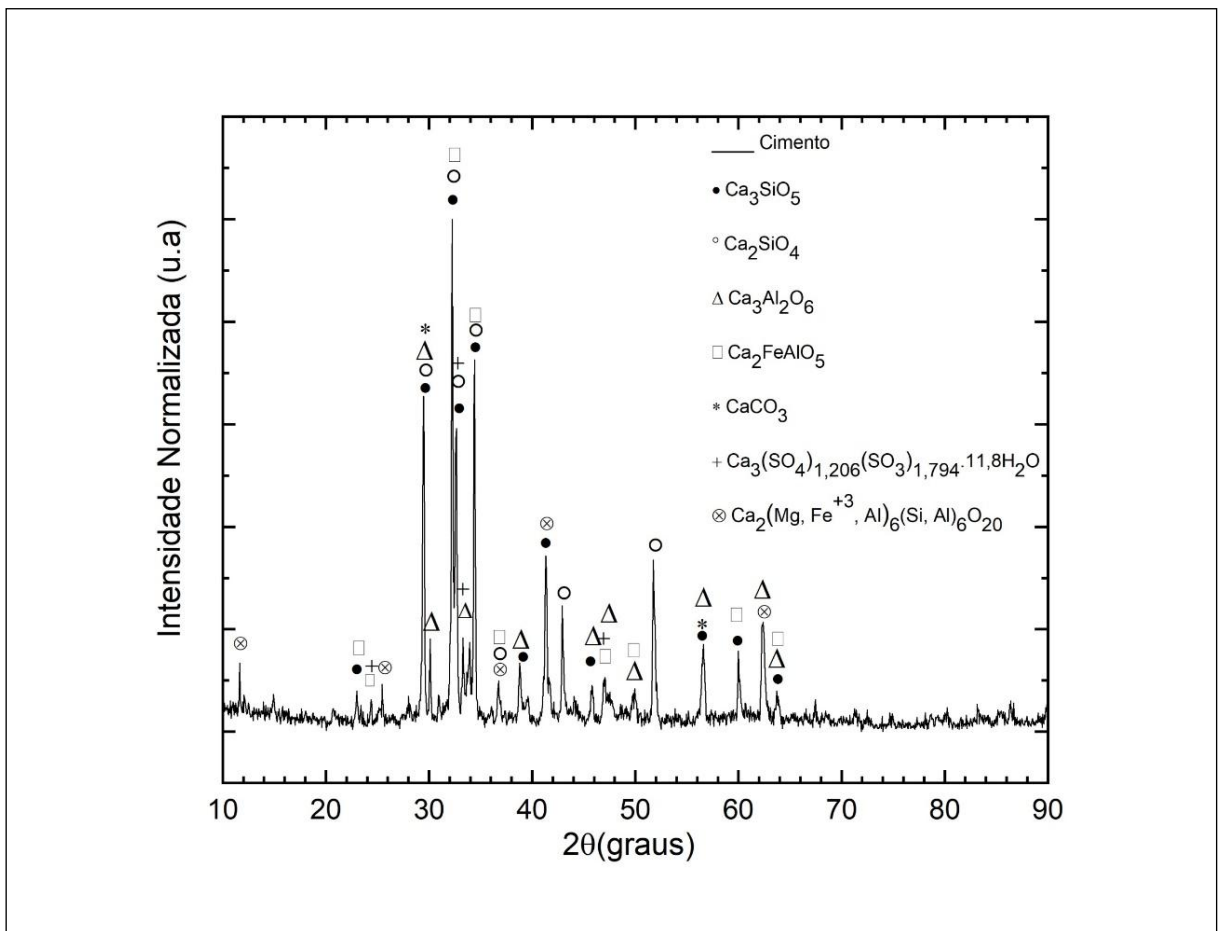


Figura 8 - Difração de Raio X do Cimento CPV – ARI.

4.1.2 Agregado Graúdo

Foram adotados neste trabalho dois tipos de agregado graúdo. O primeiro com diâmetro máximo de 9,5 mm (Brita 0) e o segundo com diâmetro máximo de 19 mm (Brita 1) conforme a norma ABNT 7211 (ABNT, 2019). O agregado é proveniente da britagem de rocha granítica da região de Pelotas, lavada e peneirada para caracterização segundo as normas brasileiras. A Figura 10 apresenta a composição granulométrica segundo a ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003) das frações estudadas.

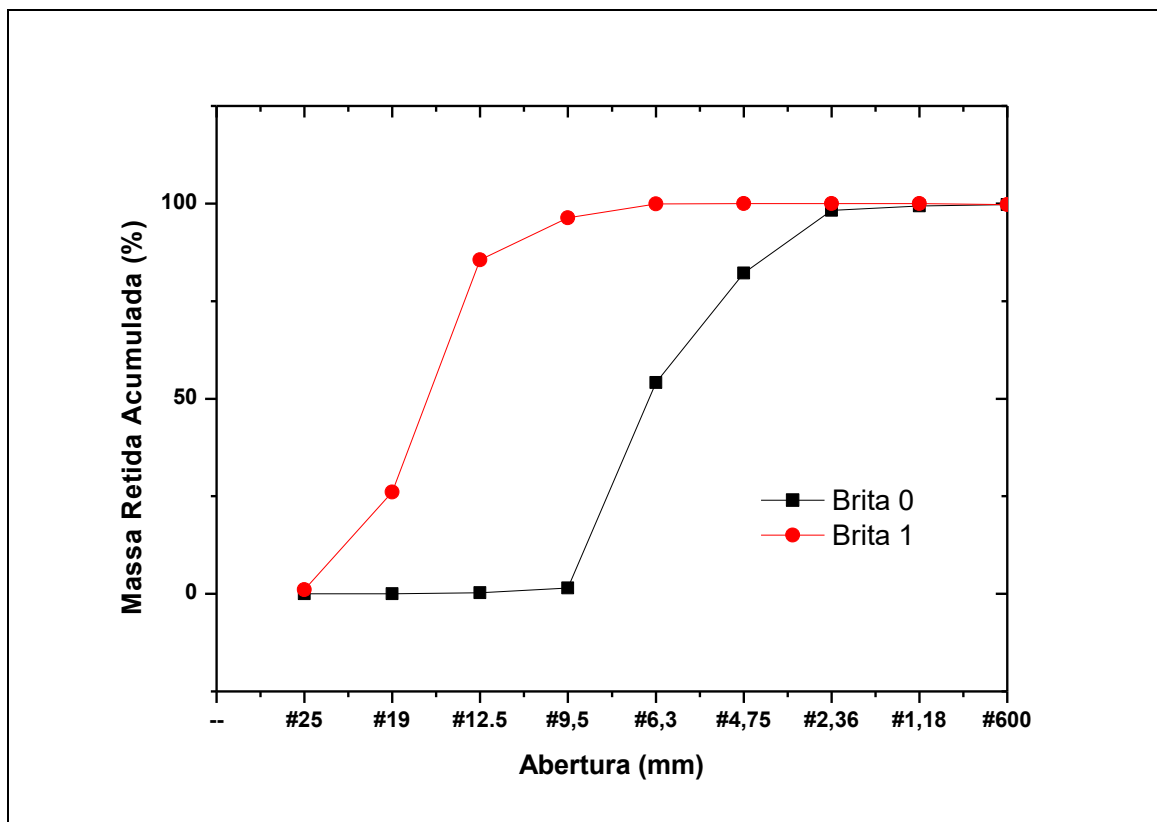


Figura 9 - Curva granulométrica – agregado graúdo.

A determinação da massa específica absoluta e aparente e a absorção de água do agregado graúdo ocorreu conforme as recomendações da norma ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2009) bem como a determinação da massa unitária e do volume de vazios através da norma ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006).

4.1.3 Agregado Miúdo

Seguindo o padrão estipulado para agregados miúdo, foram, dois tipos de agregados miúdos utilizados, com duas curvas granulométricas distintas, sendo o primeiro com módulo de finura 2,13 (areia 1) e o segundo com módulo de finura 1,04 (areia 2) conforme a norma NBR 7211 (ABNT, 2019). A areia 2 foi adotada como *filler* neste trabalho. Ambos os agregados naturais são originários da região de Pelotas, peneirados e secos em estufa a 100°C por 24 horas, para caracterização segundo as normas brasileiras. A Figura 11 apresenta a composição granulométrica segundo a ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003) das frações estudadas.

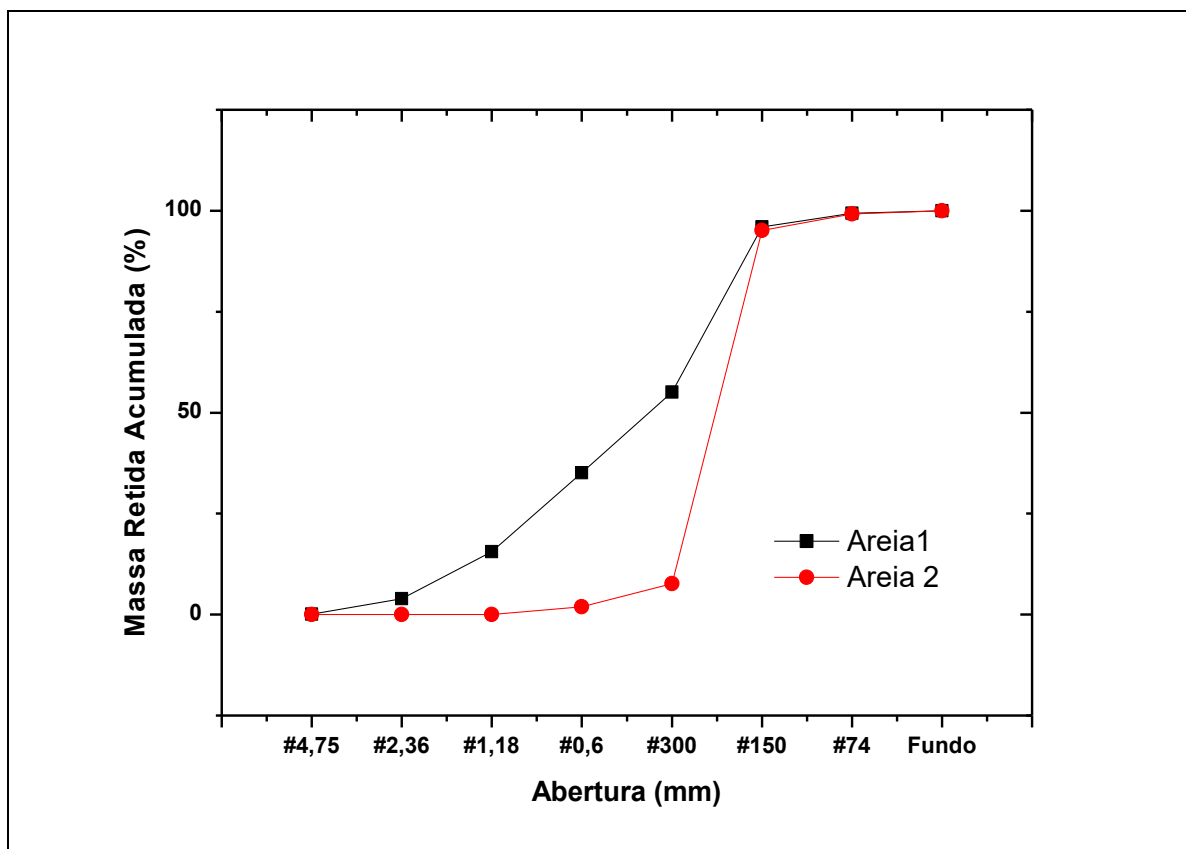


Figura 10 - Curva granulométrica – agregado miúdo.

A determinação da massa específica absoluta e aparente do agregado miúdo foi conforme as recomendações da norma ABNT NBR NM 52 (ABNT, 2009), bem como a determinação da massa unitária através da norma ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006) e o inchamento pela ABNT NBR 6467 (ABNT, 2009).

4.1.4 Aditivos Químicos

Neste trabalho foi empregado aditivo hiperplastificante de terceira geração da marca BUILDER, REOPLAST PCE 650 baseado em cadeias de polietercarboxílico que atua como dispersante do material, propiciando uma hiperplastificação e alta redução de água, promovendo maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega na composição do CAA. Recomendado para o concreto com baixo fator água / cimento e alta fluidez e compatível com todos os tipos de cimento Portland, atendendo aos requisitos das normas brasileiras ABNT NBR 11768 (ABNT, 2011) (tipo P e SP) e ASTM C494 (A.S.T.M., 2013) (tipo A e F). O aditivo deve ser adicionado de preferência ao final da mistura ou junto com a água de amassamento,

nunca junto com os materiais secos (cimento, agregados e adições). Neste trabalho o aditivo foi adicionado em pequenas proporções até o atendimento da norma. A faixa de dosagem recomendada pelo fabricante é de no mínimo 0,2% e no máximo de 2%. A Tabela 8 apresenta dados técnicos fornecido no laudo do aditivo superplastificante de alto desempenho do REOPLAST PCE 650.

Tabela 8 -Dados Técnicos do Aditivo REOPLAST PCE 650

Aspecto:	Líquido
Cor:	Amarelo Claro
Função:	Aditivo superplastificante de alto desempenho
Ph:	5 a 7
Densidade a 25°C	1,05 a 1,08 g/ml
Ponto de Ebulição:	100°C
Explosividade:	Isento
Cloretos	Isento

Fonte: Fornecedor.

4.2 Programa Experimental – Etapa 1

Como o objetivo principal do trabalho foi investigar por EIE os mecanismos de degradação em corpos de prova de CAA foram expostos ao ataque de cloretos em conjunto com corpos de prova do CC para parâmetros de comparação. Os parâmetros resistência à compressão e relação água cimento foram padronizados pelos valores mínimos estipulados pela norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) para classe de agressividade forte (Classe III), seguindo os limites normatizados de classe de resistência à compressão, consumo de cimento, relação água/cimento e cobrimento da armadura.

4.2.1 Definição do traço do Concreto Convencional

O método usado para dosagens do traço do CC foi o de EPUSP/IPT (HELENE; TERZIAN, 1992). O método EPUSP/IPT é considerado um dos métodos de dosagem versáteis e simples, sendo classificado como teórico-experimental (GUIMARAES; DE OLIVEIRA JÚNIOR, 2019). Neste método a relação água/cimento (a/c) é fundamental e permite obter para os materiais locais uma mistura trabalhável com uma quantidade mínima de argamassa que permitindo o preenchimento dos vazios.

Primeiramente, precisa-se decidir os tipos de materiais e suas características, como a dimensão máxima característica para o agregado graúdo, tipo de brita, a consistência desejada através do teste de abatimento de cone de tronco, antes de dar início os estudos experimentais, já que para os concretos de cada família são produzidos com os mesmos materiais de construção e para um mesmo teor de argamassa α (%) e uma mesma classe de consistência (abatimento).

O método construiu um ábaco que fornece um diagrama de dosagem onde nos quadrantes apresenta três leis. No quadrante superior da direita é explicado pela Lei de Abrams, no quadrante inferior da direita, pela Lei de Lyse, e no quadrante inferior da esquerda pela Lei de Prizskulnik e Kirilos. O ábaco relaciona a resistência a compressão, o consumo de cimento e o fator água/cimento.

A lei de Abrams introduz o Módulo de Finura ideal a uma relação com a dimensão máxima do agregado total (equação 29).

$$MF = 7,94 + 3,32 * \log D_{max} \quad (29)$$

Onde, MF = módulo de finura dos agregados;

$D_{m\acute{a}x}$ = dimensão máxima característica do agregado.

Além disso, a lei também apresenta a lei do comportamento dos materiais onde a resistência de um concreto numa determinada idade (f_{cj}) é inversamente proporcional à relação água cimento (a/c) (equação 30).

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2 \frac{a}{c}} \quad (30)$$

Onde,

F_{cj} = resistência à compressão do concreto para a idade de j dias (Mpa);

a/c = relação em massa de água/cimento em kg/kg;

k_1, k_2 são constantes particulares de cada conjuntos de materiais.

A Lei de Lyse determina que ao se fixar a quantidade de cimento e agregados, a consistência do concreto fresco depende do volume de água por m^3 de concreto (equação 31).

$$m = k_3 + k_4 \cdot \frac{a}{c} \quad (31)$$

Onde: m = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg;

k_3 e k_4 = constantes particulares do conjunto de mesmos materiais;

a/c = relação em massa água/cimento, em kg/kg.

Para complementar, existe uma correlação entre o consumo de cimento e a quantidade unitária de materiais secos. Este consumo de cimento por m^3 de concreto sofre alteração de forma proporcionalmente inversa a relação da massa seca de agregados/cimento (kg/kg) (equação 32).

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m} \quad (32)$$

Onde, C = consumo de cimento por m^3 de concreto adensado em Kg/m^3 ;

k_5 e k_6 = constantes particulares do conjunto de mesmos materiais;

m = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg.

O diagrama de dosagem para uma família de concreto é apresentado na Figura 12.

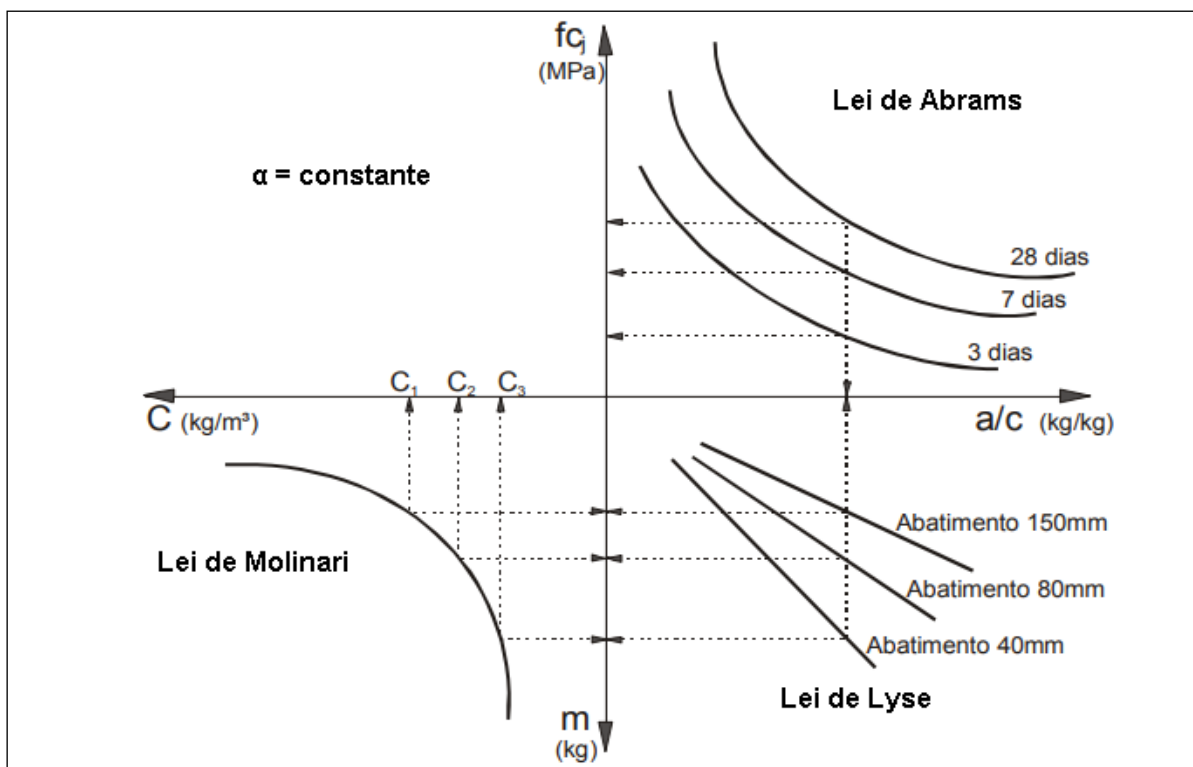


Figura 11 - Diagrama de Dosagem para uma família de concreto com mesmo abatimento e mesmo teor de argamassa.

Fonte: (HELENE; TERZIAN, 1992).

4.2.2 Definição do traço Concreto Auto Adensável (CAA)

O método usado para dosagens do CAA foi o método do Tutikian e Dal Molin (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). O primeiro passo foi a escolha dos materiais tendo o cuidado de verificar as dimensões dos agregados recomendado pelo método para melhor garantir a coesão do CAA. O próximo passo é a determinação do teor ideal de argamassa seca adotada, neste caso, para o agregado fino não pozzolâmico determinando os traços rico, intermediário e pobre. Ajustando o traço, o passo seguinte foi a colocação do aditivo e o acerto de finos. O método do Tutikian e Dal Molin utiliza conceitos dos métodos do IPT/EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992), Díaz O'Reilly (1998) e o Modelo Empacotamento Compressivo (DE LARRARD, 1999) (TUTIKIAN, 2007).

A incorporação dos finos (filler) no CAA garantiu as condições de compacidade do esqueleto granular e coesão da mistura foram adotados com dimensão inferior a 0,125 mm sendo neste caso, não pozzolâmicos. A metodologia do método de Tutikian e Dal Molin é apresentada na Figura 13.

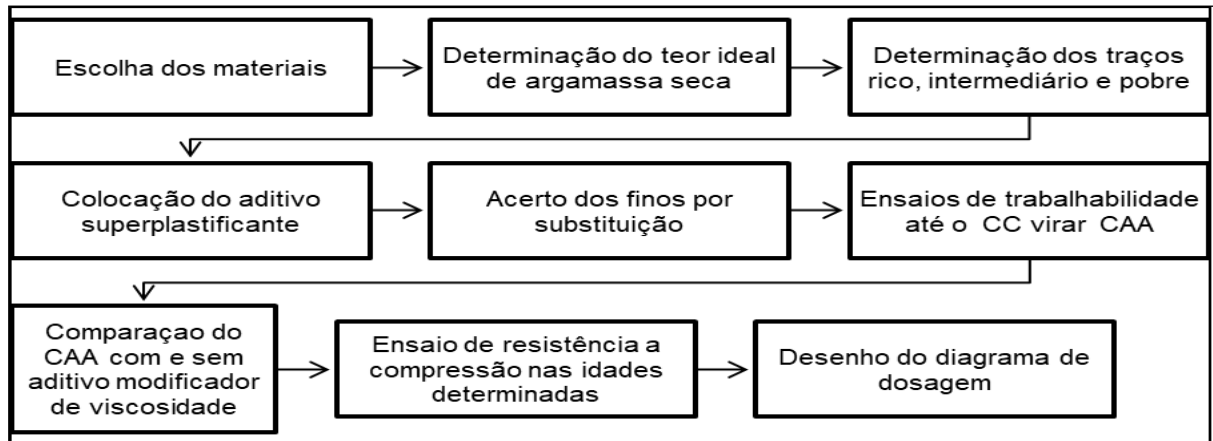


Figura 12 - Metodologia Tutikian e Dal Molin
Fonte: TUTIKIAN, 2007.

A metodologia de Tutikian descreve o procedimento de dosagem completo. Neste trabalho partiu-se do ajuste de finos e adição do superplastificante com a finalidade de atingir traços de concreto CC e CAA com a mesma relação água/cimento e resistência mecânica a compressão.

Para tanto, a metodologia de Tutikian e Dal Molin foi adaptada, de acordo com a Figura 14, para este estudo, onde o espalhamento, a viscosidade, a trabalhabilidade, a ausência de exsudação e segregação que foram avaliados de forma experimental.

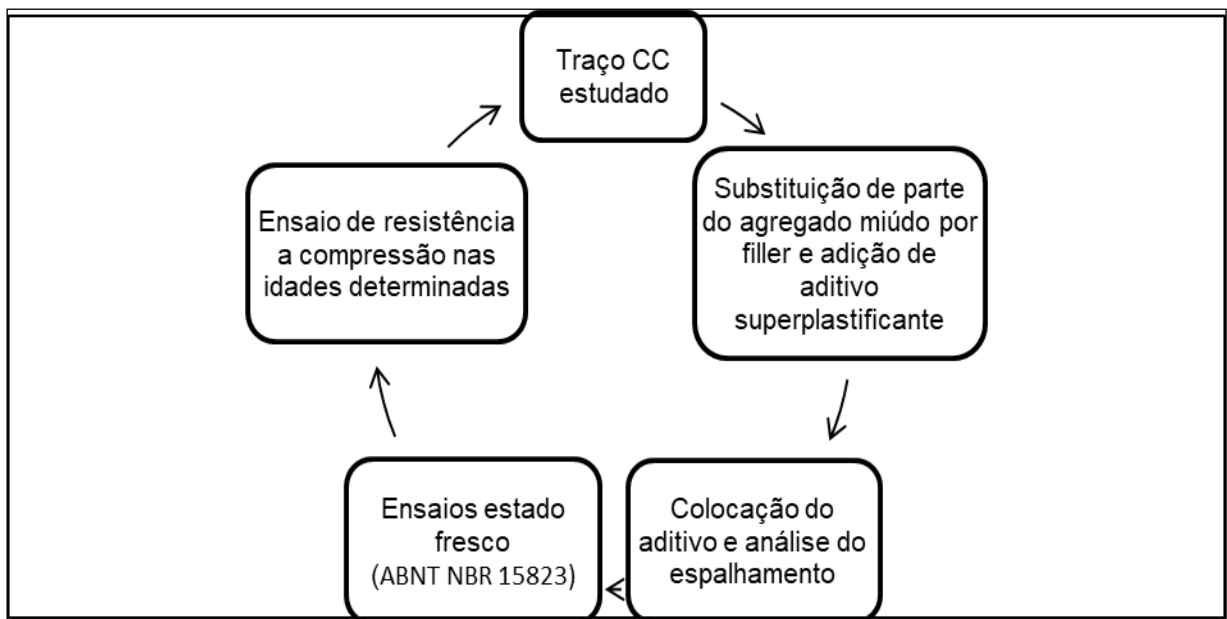


Figura 13 - Metodologia adaptada Tutikian e Dal Molin.

Deste modo foi realizada neste trabalho a mistura dos materiais, com uma pequena substituição de finos e em sequência a adição de parte do superplastificante. Tutikian (TUTIKIAN, 2004) afirma que quantidade ideal de superplastificante é sensorial. A quantidade de plastificante/superplastificante varia de acordo com a massa de cimento do traço (não havendo um comportamento definido e nem matematicamente descrito), além da marca e do tipo de superplastificante escolhido. Tutikian (TUTIKIAN, 2004) recomenda iniciar com pequenas quantidades de superplastificante.

Assim, seguindo a recomendação do fabricante e do método, o aditivo superplastificante durante o desenvolvimento do traço foi adicionado em pequenas porcentagens empírica.

4.2.3 Análise do Traço de CC – Estado Fresco

A análise do estado fresco do CC foi baseada na norma NBR 67 (ABNT, 1998) e NBR 12655 (ABNT, 2015).

O ensaio de trabalhabilidade que se refere às propriedades do concreto fresco antes do início da pega que representa a maior ou menor facilidade da capacidade de trabalho (Tattersall,1991) foi analisado pelo ensaio de consistência (Ensaio do abatimento do tronco de cone (Slump-Test)) e pela coesão do concreto, através do teor ideal de argamassa.

Como a trabalhabilidade não é uma propriedade intrínseca do concreto e depende do método de lançamento, adensamento e operador, optou-se por utilizar sempre o mesmo equipamento e mesmo operador. Para execução do Slump-Test e moldagem dos corpos de prova, foi utilizado adensamento manual para a diminuir as variáveis em comparação com o CAA. A coesão, segregação e exsudação também foram analisadas de modo visual para o CC.

Nesta pesquisa foi adotada a classe de consistência S50 ($50 \leq A < 100$ mm) de acordo com a ABNT NBR 8953 (ABNT, 2015) considerando os parâmetros adotados próximo a consistência do concreto comum sem aditivo. O slump adotado foi 70 ± 10 mm para as três proporções de traço pelo método do EPUSP/IPT (Helene e Terzian (1992)).

Procurou-se adotar os parâmetros aproximados do trabalho de Medeiros (2008), que as barras de referência sem superfície protegida despassivaram-se entre um período de 244 e 252 dias.

4.2.4 Análise do Traço CAA – Estado Fresco

A análise do estado fresco do CAA foi baseada na norma NBR 15823 (ABNT, 2017).

A primeira parte da norma define a classificação do estado fresco do CAA em função de sua autoadensabilidade e estabelece diretrizes para controle e recebimento do concreto.

Os parâmetros principais são: fluidez e escoamento (SF), viscosidade Plástica aparente (VF ou VS) e habilidade passante (PL ou PJ). A Fluidez e escoamento o valor da medida de espalhamento é feito por meio do ensaio *slump flow* sendo um ensaio primário, indicando a fluidez e habilidade de preenchimento das fôrmas em fluxo livre (Figura 15).

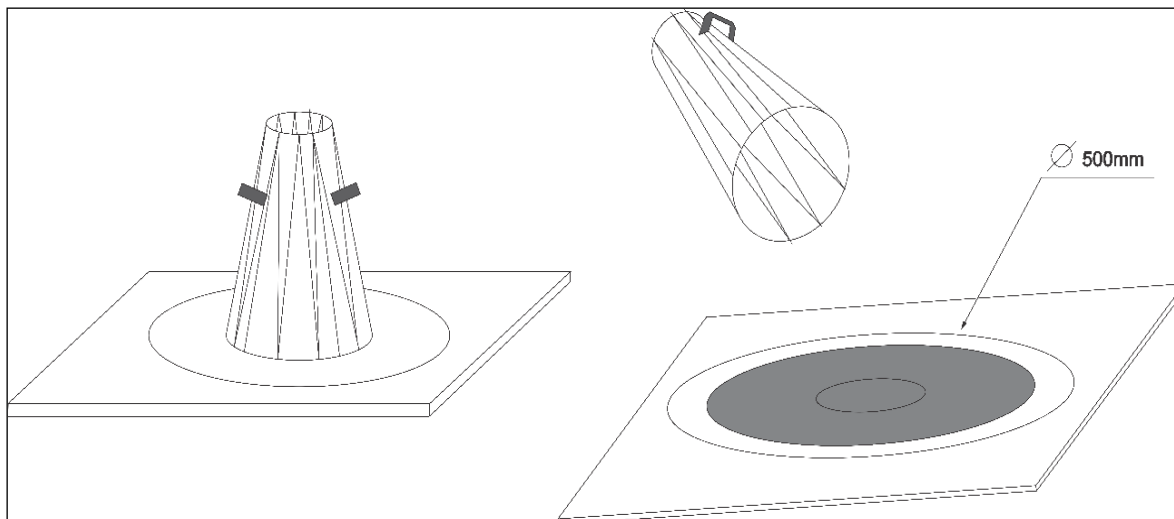


Figura 14 - Placa-base (a) perspectiva (b) execução do ensaio
Fonte: ABNT NBR 15823-2:2017

O adensamento do concreto dentro do molde do cone de Abrams, posicionado sobre o centro de uma base plana, se dá exclusivamente pela força da gravidade. Após o preenchimento, o molde é levantado e o concreto flui livremente. O resultado do ensaio é a média de dois diâmetros perpendiculares do círculo formado pela massa de concreto.

A viscosidade plástica aparente que foi feita de forma qualitativa por meio do tempo de escoamento do CAA e sua habilidade em fluir, realizado através do ensaio do Funil V em um fluxo confinado. A técnica consiste em cronometrar o tempo que o CAA leva para escoar totalmente através de um equipamento em forma de V conforme a Figura 16.

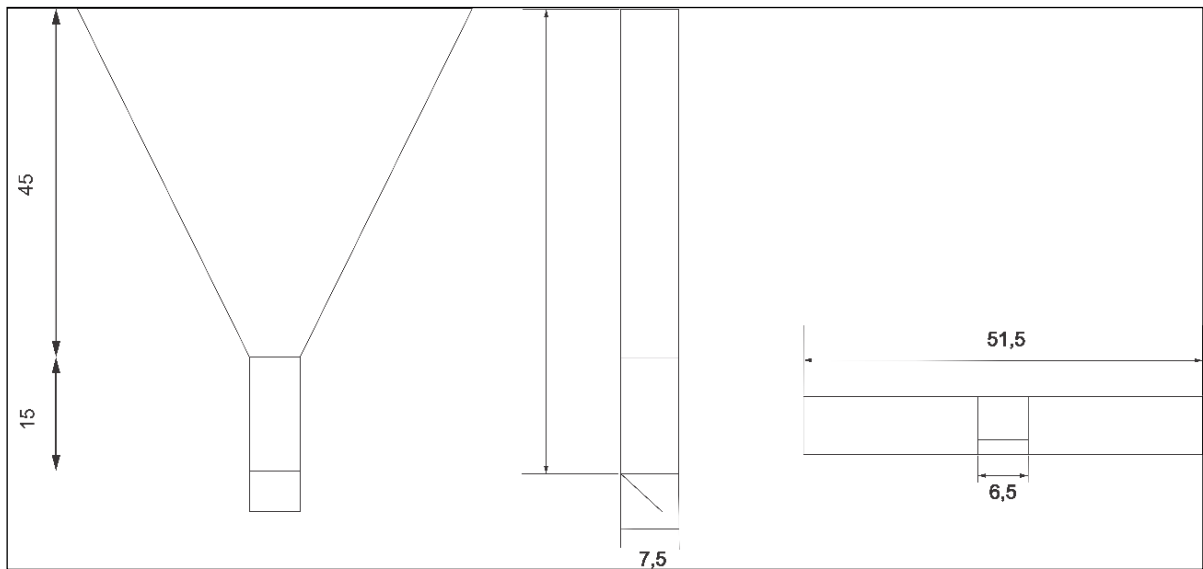


Figura 15 - Funil V (a) vista em planta, (b) vista frontal, (c) vista lateral. Dimensões em centímetros
Fonte: ABNT NBR 15823-5:2017

O parâmetro de habilidade passante foi analisado pelo ensaio da caixa L, calculando a razão entre as alturas h_2 e h_1 da superfície do concreto nas extremidades posterior e anterior da câmara horizontal do fluxo confinado após aberta a grade de separação entre os compartimentos.

A Figura 17 mostra o esquema da caixa L.

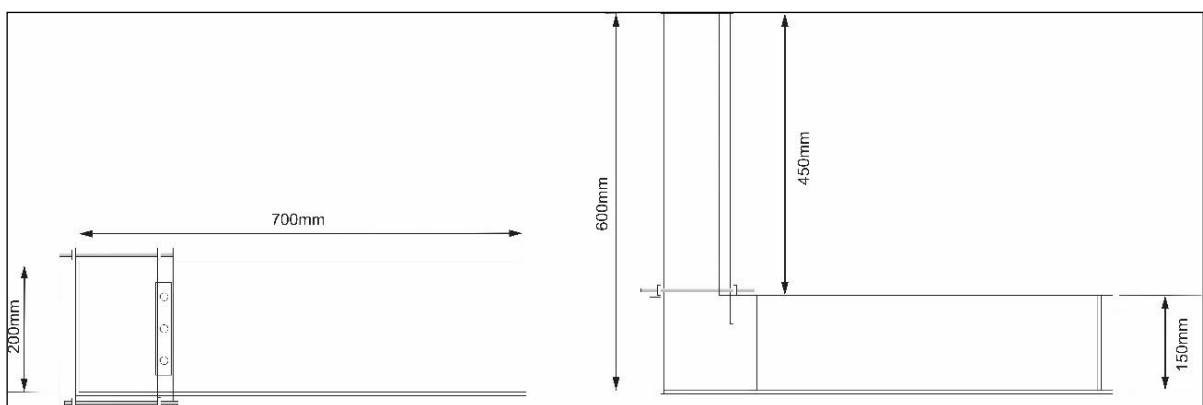


Figura 16 - Caixa L (a) Planta (b) Vista Lateral
Fonte: ABNT NBR 15823-4:2017

Esta propriedade de habilidade passante analisa a capacidade do concreto fresco em fluir sem perder a uniformidade ou causar bloqueio através de espaços confinados e aberturas estreitas.

A propriedade de habilidade passante também foi verificada através do Anel J onde o molde foi preenchido de forma contínua e uniforme sem adensamento e fluxo parcialmente livre. O Anel J possui obstáculos em barras verticais calculando o espalhamento final onde este não poderá ser maior que três vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo (Figura 18).

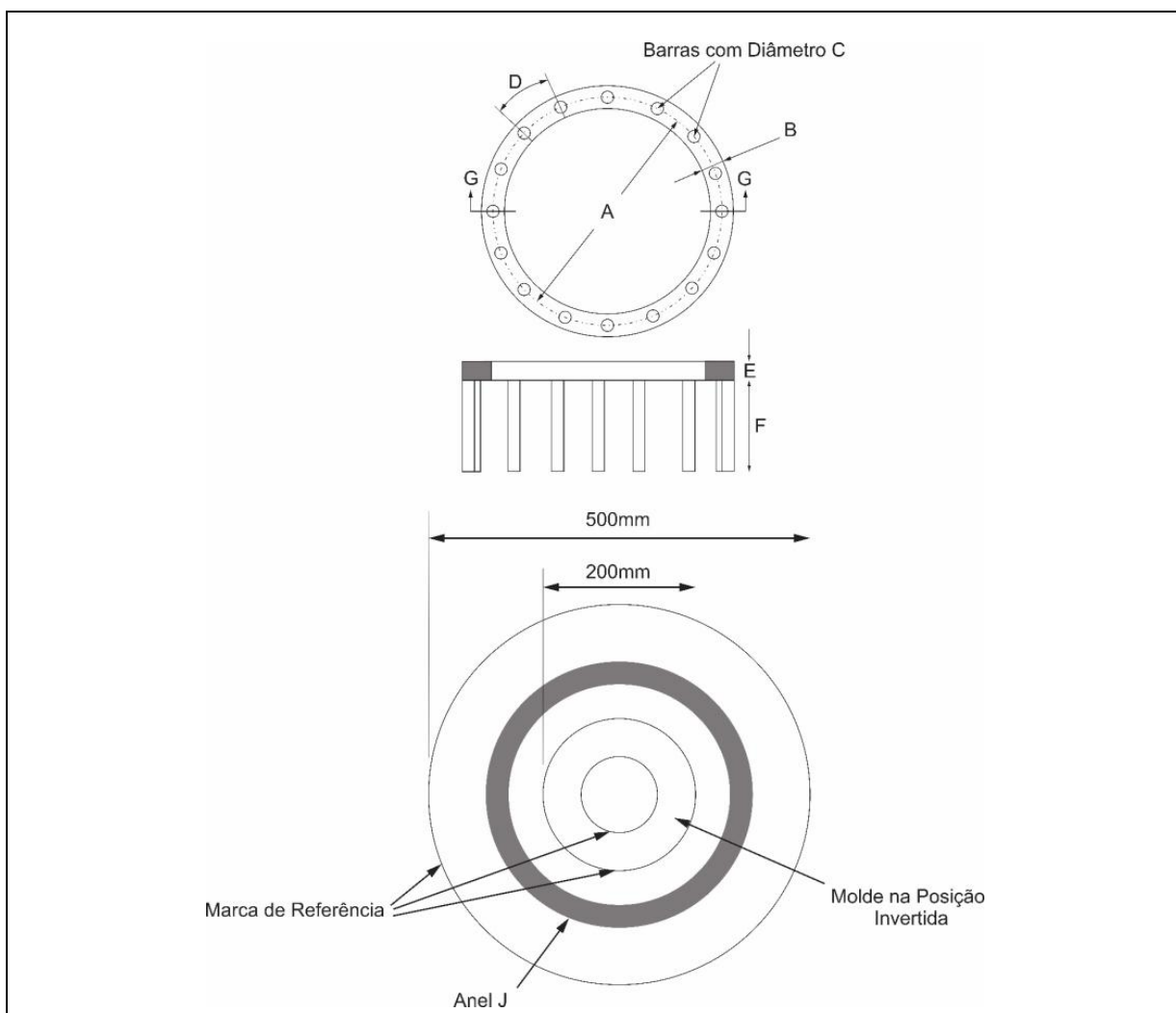


Figura 17 - Anel J e vista em planta do molde e do anel J
Fonte: ABNT NBR 15823-3:2017

Para aceitação do CAA o concreto deve ser classificado de acordo com os seguintes requisitos, seguindo as normas especificadas (Tabelas 9 a 13).

Tabela 9 - Propriedades Variadas – Concreto CAA

Propriedades Avaliadas	Método de Ensaio	Norma
Fluidez e viscosidade plástica aparente	Espalhamento (Cone de Abrams e t_{500})	NBR 15823-2
	Método do Funil	NBR 15823-5
Habilidade Passante	Método do Anel J	NBR 15823-3
	Método da Caixa L	NBR 15823-4

Fonte: Autora, 2020

Tabela 10 - Classes de Espalhamento (slump-flow)

Classe	Espalhamento (mm)	Aplicação
SF1	550 A 650	CAA bombeado
SF2	660 A 750	Aplicações correntes
SF3	760 A 850	Estrutura com alta densidade

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 11 - Classes de Viscosidade Plástica aparente t_{500} (sob fluxo livre)

Classe	t_{500} (segundos)	Funil V (segundos)	Aplicação
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8	Lajes, paredes diafragma
VS2/VF2	> 2	9 a 25	Vigas Pilares e outros

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 12 - Classe de Habilidade Passante caixa L (sob fluxo confinado)

Classe	Caixa L (H2/H1)	Aplicações
PL1	$\geq 0,80$ com duas barras de aço	Lajes, painéis, elementos fundação
PL2	$\leq 0,80$ com três barras de aço	Vigas, Pilares, pré-moldado

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 13- Classe de Habilidade Passante Anel J

Classe	Anel J (mm)	Aplicações
PJ1	0 a 25	Lajes, painéis, elementos fundação
PJ2	25 a 50	Vigas, Pilares, pré-moldado

Fonte: Autora, 2020.

A estabilidade ou a resistência à segregação, que é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de evitar a segregação de seus componentes, foi analisada pelo tempo registrado denominado de tempo de fluxo do ensaio do Funil – V (T_v), onde após a abertura superior do funil, o cronômetro é parado no momento em que a passagem inferior está completamente visível e este valor precisa ser superior a 3 segundos (GOMES E BARROS, 2009).

As propriedades devem ser quantificadas ou qualificadas através de ensaios que representem seu comportamento na aplicação.

4.2.5 Análise do Traço CC e CAA – Estado Endurecido

A análise do Estado Endurecido para o CC e CAA foram baseadas nas normas de caracterização da resistência mecânica através dos ensaios propostos pelas normas NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos e NBR 5738 (ABNT, 2015) – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

As idades de cura adotadas foram de 3, 5, 7, 28 e 91 dias com cura úmida.

Adotou-se os traços com a mesma classe de resistência mecânica para CC e CAA, com o valor de compressão mínima de C30 ($f_{ck} \geq 30\text{MPa}$) de acordo a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto NBR 6118 (ABNT, 2014) e a norma brasileira de concreto de cimento Portland NBR 12655 (ABNT, 2015).

4.3 Comportamento em Relação ao Transporte de Cloretos – Etapa 2

4.3.1 Ciclos de Secagem e Molhagem

Considerando que nas amostras, as variáveis interface aço-concreto, tipo de aglutinante, relação água/cimento, composição química do aço, fonte de cloreto e tipo de cátion, e condições do meio são as mesmas. A metodologia para aproximar as outras variáveis com o objetivo de provocar o processo acelerado foi adotada a utilização de ciclos de secagem e molhagem tomando o cuidado de ser realizados nos mesmos períodos para as medidas eletroquímicas.

Para aceleração da corrosão via ação de cloretos foi utilizado o método de imersão alternada dos corpos-de-prova (ciclos de molhagem e secagem), onde dentro do tempo total dos ensaios os corpos de prova foram submetidos a imersão parcial (a meia altura) em uma solução de concentração de NaCl encontrada na água do mar, em torno de 3,5% (CHANG et al, 2017; ÖZYURT et al, 2019; WANG et al, 2019). Para garantir a concentração de cloretos a solução ia sendo monitorada (pH e temperatura) e rigidamente sendo trocada no período de dois meses, com o propósito de manter elevado o nível de aeração e teor de concentração.

No tanque de armazenamento da solução salina a medida de altura foi controlada e a solução repostada, caso necessário, para garantir o nível constante.

As amostras dos dois concretos foram submetidas a ciclo semanais de secagem e molhagem no campus Anglo da Universidade Federal de Pelotas.

A forma de ciclos de imersão e secagem mais empregados são de 3 dias para imersão e 4 dias para secagem ou de 2 dias para imersão e 5 dias para secagem (FERREIRA, 2015). A metodologia utilizada neste trabalho foi de 2 dias imersos e 5 dias de secagem, sendo o ciclo reproduzido semanalmente por 2 anos (ANGST et al, 2011; OTIENO et al, 2019; DASAR et al, 2020).

Para o estudo da penetração de cloretos, corpos de prova com idades de curas diferentes foram submetidos a solução de NaCl de 3,5%, baseado em trabalhos anteriores (WANG *et al.*, 2018; WU *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2019 2019; FIRODIYA et AL, 2014; ROVENTI et al, 2014; ARREDONDO-REA et al, 2019).

O princípio dos testes usuais de eletro-migração é aplicar um potencial constante em uma amostra totalmente saturada por uma solução salina (íon cloreto) de interesse (LIZARAZO-MARRIAGA et al, 2012).

Como os fatores que influenciam a durabilidade das estruturas de concreto são, principalmente, o meio ambiente de exposição, as amostras que foram submetidas ao ciclo de secagem e molhagem foram mantidas protegidas de intempéries e mantidas protegidas de chuva e sol.

Os corpos de prova que foram estudados o comportamento difusional e penetração de cloretos sofreram alterações naturais de temperatura e umidade para análise das condições ambientais por um período total de 2 anos.

A solução foi colocada a meia altura dos corpos de prova.

O grupo amostral para o ciclo foi de 18 corpos de prova por idade de cura e tipo de concreto.

As Figuras 19 e 20 demonstram este método.

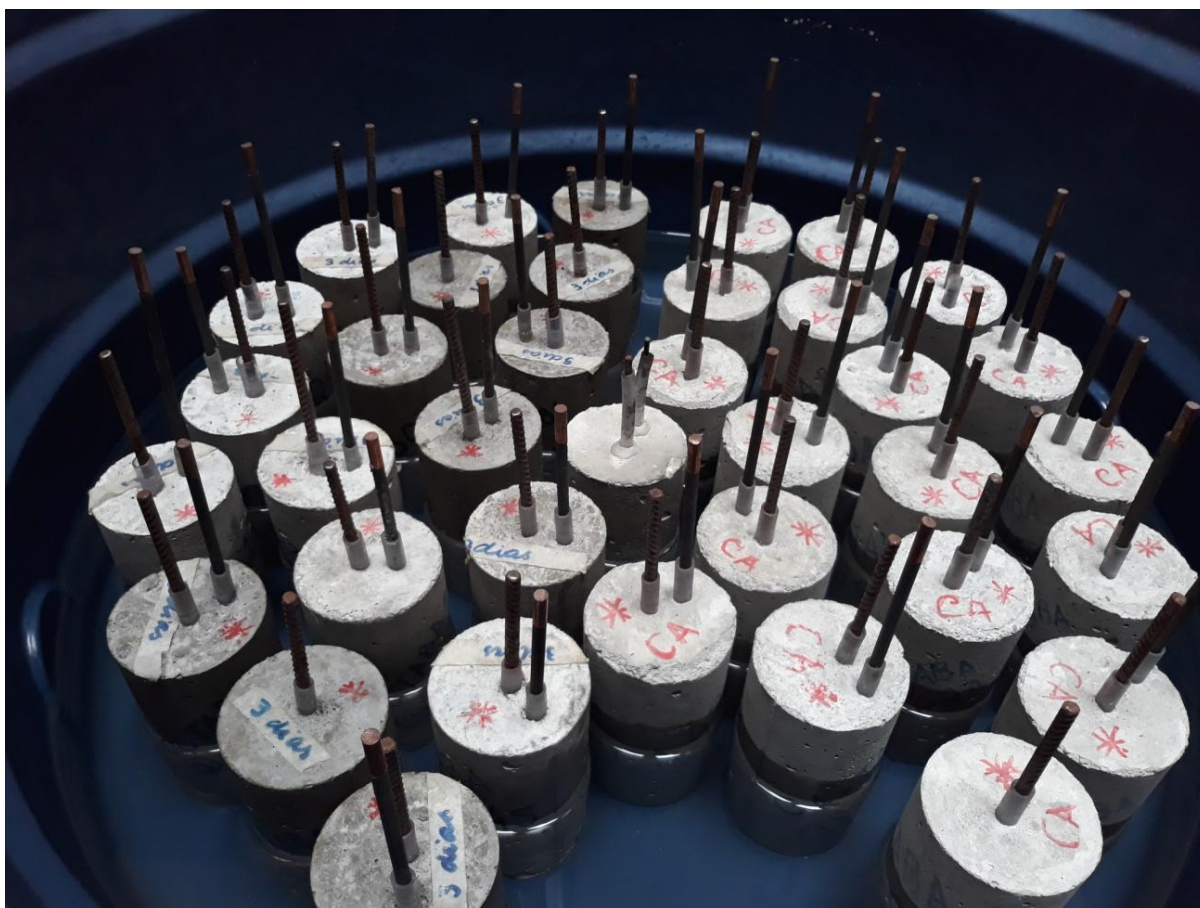


Figura 18 - Ciclo de Molhagem na solução de 3,5% de NaCl por 2 dias a meia altura.



Figura 19 - Ciclo de Secagem em temperatura ambiente por 5 dias.

4.3.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

O equipamento utilizado neste estudo foi um potenciostato/gavanostato IVIUM STAT da Ivium Technologies onde possui integrado o FRA/EIE. O modelo utilizado foi o USB portátil CompactStat onde suas especificações são ± 30 mA (± 1 mA no modo alimentado), com um potencial aplicado médio do potenciostato de ± 4 V, com precisão de 2 mV e média de frequência do EIE de 3 MHz.

O intervalo de frequência adotados foi de 0,05 a 10^6 Hz, com voltagens aplicadas em amplitude de 0,025 V em um potencial de circuito aberto (OCP) baseado em um procedimento semelhante a Bragança et al (2016) e Bragança et al (2014), confirmado em Obot e Onyeachu (2018).

A solução eletrolítica, para os experimentos, adotada consiste na solução de 35 g/l de cloreto de sódio (NaCl P.M. 58,44, teor de pureza 99,9%) que corresponde a concentração do sal na água do mar (SAN MARTÍN et al, 2018). As medidas eletroquímicas foram realizadas após o ciclo molhado com os corpos de prova úmidos, para considerar a pior situação. A medida de impedância nas amostras de

concreto secas são superiores que a medida nas amostras úmidas, como a água é um condutor de energia elétrica, logo a resistência a passagem da corrente é menor.

Para a obtenção da resposta da interface aço-concreto e as medidas eletroquímicas e sua perturbação ao longo do tempo com a coleta dos dados, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm armados, com a inserção de um eletrodos de aço carbono (CA-50) de 8 mm de diâmetro e um eletrodo cilíndrico de grafite também de 8 mm de diâmetro, sendo este inerte e poroso, garantindo o espectro dos dados de domínio da frequência. O arranjo para a análise do estudo quantitativo das reações na interface eletrodo-solução no corpo de prova foram garantidas pelos eletrodos imersos. O eletrodo de interesse é o de aço (CA-50) e o de referência o eletrodo de grafite (contra-eletrodo).

Foi adotado um cobrimento de 40 mm e um espaçamento entre os eletrodos de 20 mm. Para garantir que todas as amostras tivessem o mesmo cobrimento e espaçamento, foi utilizado um molde de madeira conforme a Figura 21. A Figura 21b apresenta o molde de madeira com os eletrodos de aço e grafite durante a moldagem dos corpos de prova de concreto armado de CC e CAA.

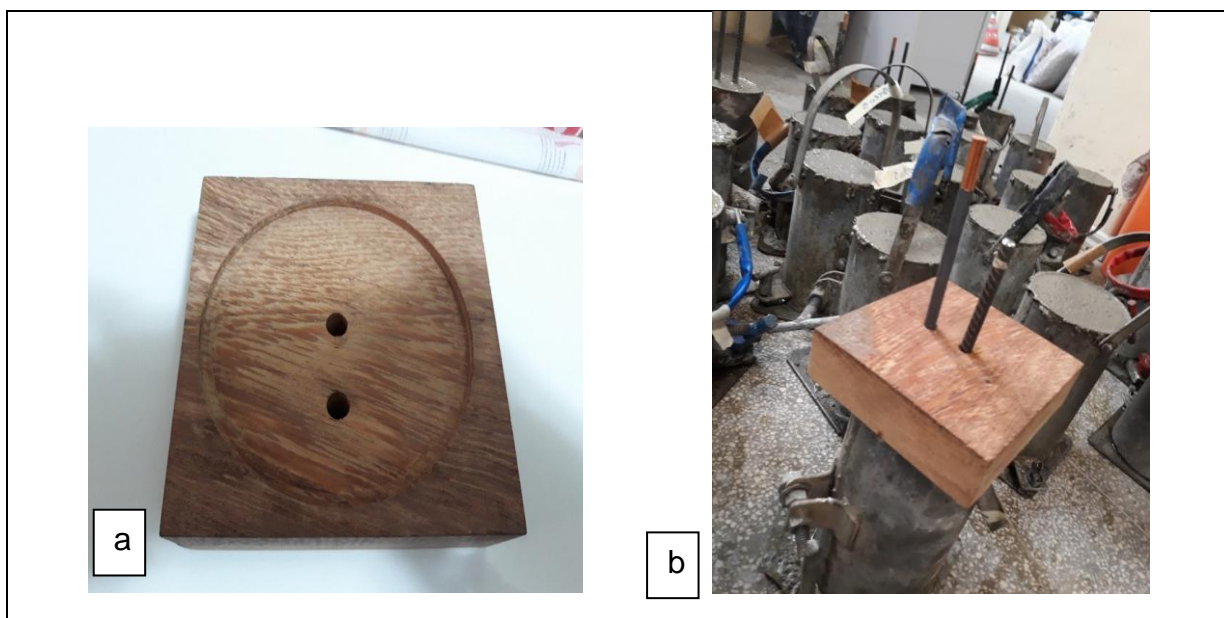


Figura 20 - Molde de madeira para os eletrodos de aço e grafite na moldagem dos corpos de prova (a). Molde de madeira com os eletrodos de aço e grafite durante a moldagem dos corpos de prova de concreto armado de CC e CAA (b).

O cobrimento de 40 mm foi adotado de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) para classe de agressividade ambiental III (risco de

deterioração grande, agressividade forte, ambiente de projeto marinho ou industrial) para o tipo de estrutura concreto armado elementos estruturais.

O espaçamento de 20 mm entre os eletrodos foi adotado semelhantemente ao modelo proposto no procedimento de hidratação de materiais cimentícios com resistência de Warburg causada pela difusão de íons proposto por Dong et al (2017).

A área média de exposição da barra de Aço CA 50 à passagem de corrente no interior do corpo de prova foi de $0,0035 \text{ m}^2$. A barra foi protegida na parte inferior por uma bucha para evitar que toque no fundo e garantir o espaçamento limitado conforme Figura 22.

A Figura 22 e 23 mostra o esquema da célula galvânica utilizada nas medidas eletroquímicas com as referidas dimensões e a posição dos eletrodos.

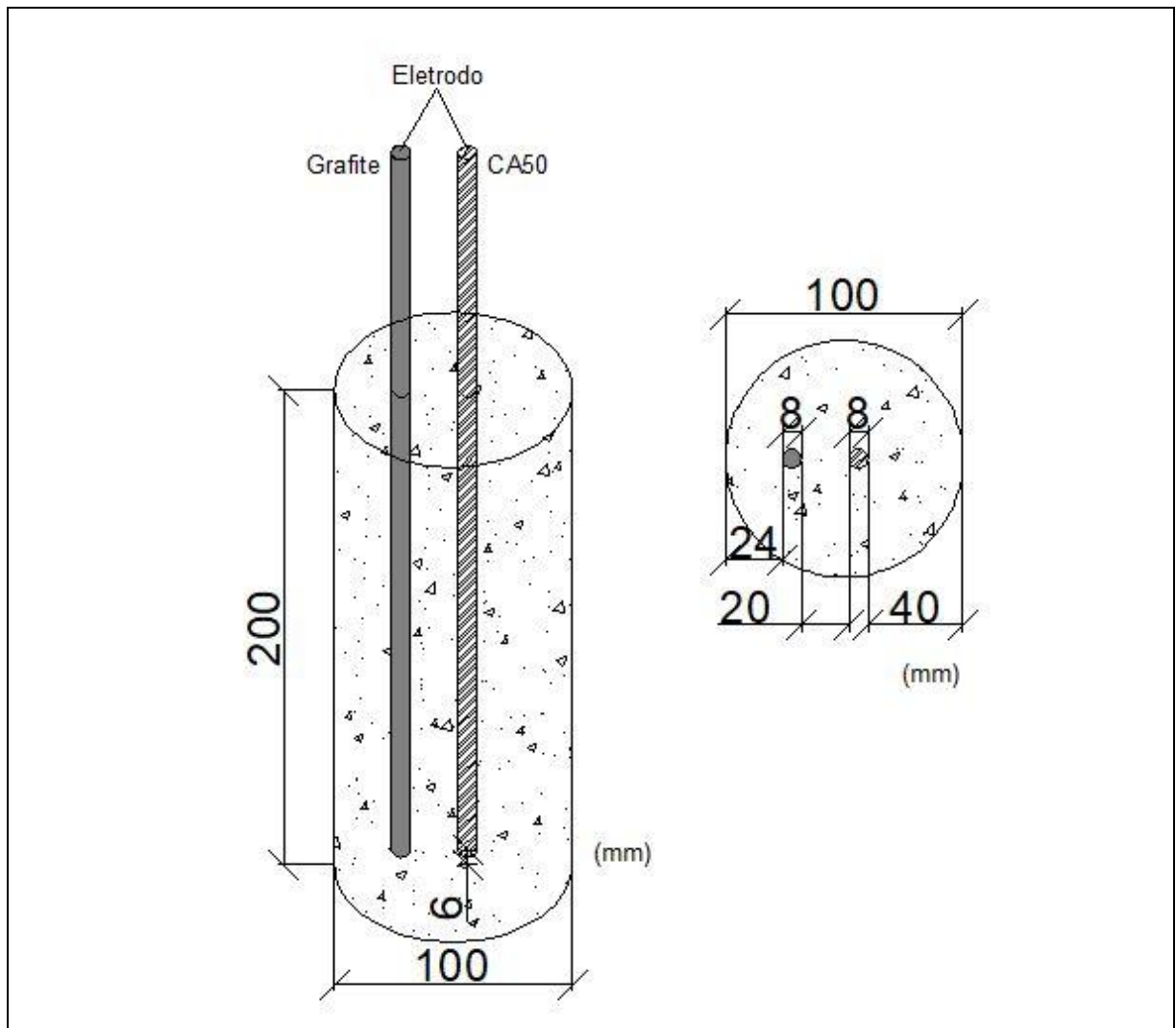


Figura 21 - Amostras para a análise eletroquímica nos corpos de prova de concreto armado de CC e CAA.

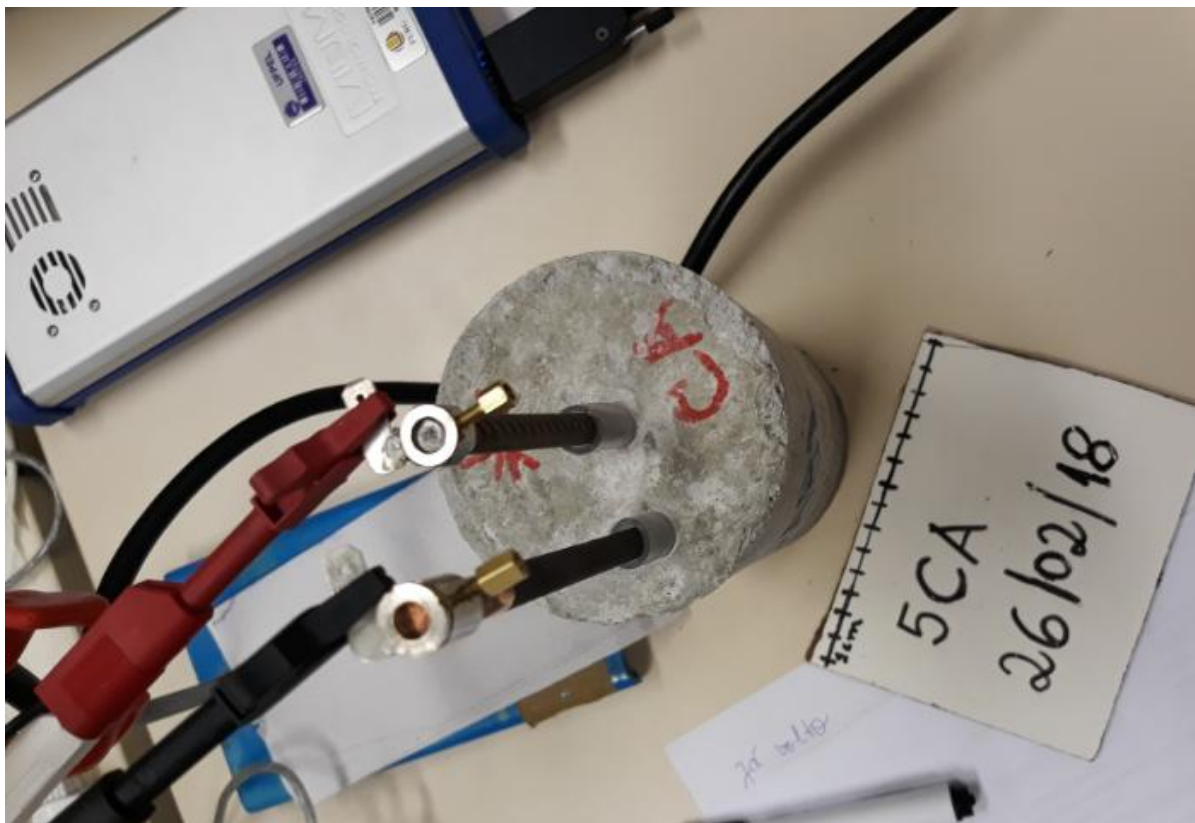


Figura 22 - Análise Espectroscopia de Impedância Eletroquímica com os adaptadores nos eletrodos.

Os resultados foram expressos pelos diagramas de Nyquist e Bode em função das impedâncias real e imaginária e a frequência.

4.3.3 Resistividade Elétrica

O cálculo da resistividade é obtido através da medida de impedância (Z) do material cimentício.

A resistividade elétrica obtida através da equação 25 foi obtida multiplicando-se a resistência (Z), resposta da medida eletroquímica, pelo fator dependente das dimensões do corpo de prova utilizado, ou seja, a área da seção transversal e o comprimento do cilindro (CHIDIAC E SHAFIKHANI, 2019). A área da seção transversal do material sabendo que os corpos de prova de concreto armado possui diâmetro de 10 cm foi de $78,5 \text{ cm}^2$ e a área exposta na célula galgânica no eletrodo de trabalho (interesse), considerando o eletrodo de 8 mm de diâmetro e o comprimento médio interno exposto de 14 cm para o grupo amostral foi de 35 cm^2 . Logo o valor da impedância real e imaginária (Z' e Z'') obtidas para uma área unitária foram multiplicadas pela área média de exposição da barra de Aço CA 50 à passagem de corrente.

A resistividade do concreto varia conforme a natureza da corrente que o atravessa. Os resultados da resistividade para a corrente alternada são ligeiramente menores do que correntes contínuas (HELENE, 1999; COPPIO et al, 2019). Neste trabalho optou-se pela corrente alternada visando o pior cenário.

A Figura 24 apresenta o espectro EIE experimental para massa do concreto com as resistências da solução do poro (R) e resistência de polarização (R_p) de forma simplificada. O valor de R_p , está relacionado a resistência do sistema e transferência de carga, e R , à microestrutura e propriedades do concreto que no primeiro momento é atribuído a resistência do cimento não hidratado e produtos de hidratação e depois, em um segundo momento, para resistência da solução (SONG, 2000; GU et al., 1992).

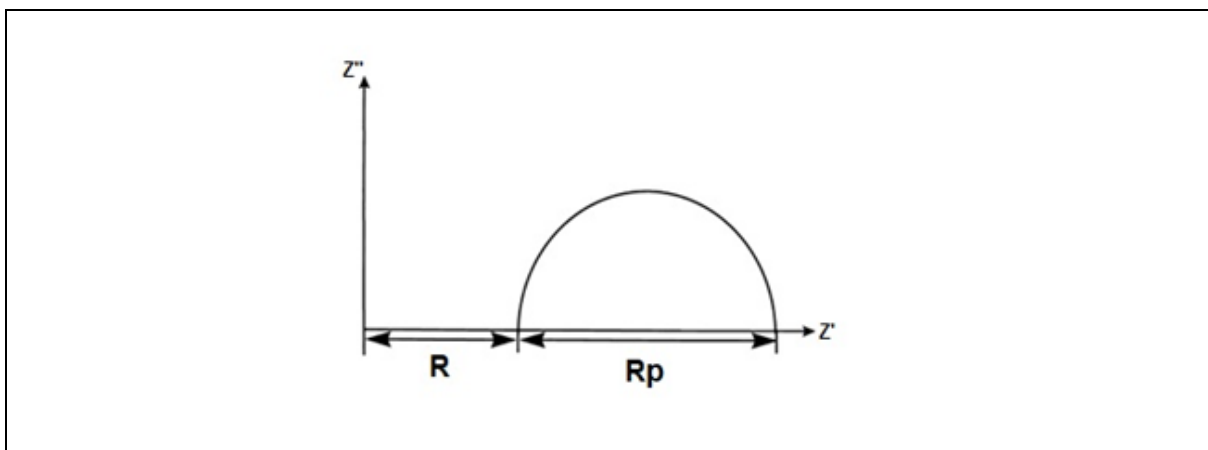


Figura 23 – Espectro EIE experimental para massa do concreto com as resistências da solução do poro (R) e resistência de polarização (R_p).
Fonte: SONG (2000); LANGFORD E BROOMFIELD (1987).

Uma vez construído o diagrama de Nyquist, faz-se a extrapolação da parte direita do semicírculo até encontrar o eixo horizontal. O diâmetro do semicírculo é equivalente à resistência de polarização (R_p) (FENG et al., 1996; LANGFORD E BROOMFIELD, 1987; RIBEIRO, 2015 ; GILBERT, 2017);

Para o estudo do comportamento da resistividade elétrica ao longo do processo de hidratação e degradação dos corpos de prova CC e CAA nas diferentes idades de cura os resultados foram comparados com a resistência de polarização (R_p) do material.

Nas etapas da medida dos R_p os resultados levam em consideração a disposição geométrica dos eletrodos e a área de exposição (ANDRADE E ALONSO, 2004).

As medidas da resistividade elétrica foram realizadas com as amostras saturadas (SABBAĞ e UYANIK, 2018).

O R_p adotado neste trabalho foi a média aritmética de um grupo amostral de 9 corpos de prova.

Após a determinação das medidas do R_p , a intensidade de corrosão (I_{corr}) foi calculada pela equação de Stern e Geary (Equação 28) apresentados no item 3.11.1 de impedância eletroquímica. (FAHIM et al., 2018).

4.3.4 Difusividade dos íons de Cloreto

A determinação da difusividade dos íons de cloreto nos dois tipos de concreto através de espectroscopia de impedância de corrente alternada foi baseada no coeficiente de impedância de Warburg (Shi et al, 1999).

O comportamento difusional e o transporte dos íons cloretos em função do tempo foram estudados nas amostras submetidas a solução salina e aos ciclos de envelhecimento.

O coeficiente difusional (D_w) para CC e CAA foram calculados através das equações 22, 23 e 24 apresentadas no item 3.10.2 onde os valores adotados para as constantes foram de:

$$R = 968,3144621 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

$$F = 96485,33 \text{ Cmol}^{-1}$$

$$A = 0,00785 \text{ m}^2$$

$$C = 35 \text{ g/l.}$$

Os valores da admitância (Y_o) e do coeficiente de Warburg (σ_w) foram obtidos através das curvas de Nyquist e dos respectivos circuitos equivalentes do período estudado. Os resultados de impedância na análise eletroquímica foram multiplicados pela área de exibição interna da barra de aço de $0,0035 \text{ m}^2$.

A dinâmica da transferência de massa sob um gradiente de concentração dos íons cloreto e o estudo da difusão nas amostras foi de um período de tempo de dois anos. Deste modo o estudo eletroquímico garantiu que os poros da microestrutura

sejam preenchidos com a solução através dos ciclos de secagem e molhagem conforme estabelece Shi et al (1999).

4.3.5 Método Colorimétrico

Existem diversos métodos para identificar e quantificar os cloretos livres e totais ao longo da profundidade do concreto, e para a determinação do perfil de cloretos - que requer corte ou perfuração, moagem e análise química de amostras de concreto – são necessários vários equipamentos e tempos de análise (HE *et al*, 2011).

O método colorimétrico é um de um método qualitativos amplamente utilizado para determinação de cloretos em concretos e argamassas baseados na aplicação de um indicador químico, que na presença de cloretos, apresentam mudança na sua coloração. O teor mínimo de cloretos livres é detectado pela solução indicadora (FRANÇA, 2011; , HE *et al.*, 2012; REAL *et al.*, 2015; HELENE *et al.*, 2018).

O ensaio colorimétrico deste trabalho foi feito para o CC e o CAA para as diferentes idades de cura, apresentando apenas os resultados finais com 1 e 2 anos de exposição.

As etapas adotadas foram as seguintes: inicialmente os corpos de prova foram retirados do ambiente do ciclo de secagem e molhagem 24 horas protegidos em temperatura ambiente. Após este período foi rompido diametralmente com o auxílio de uma prensa hidráulica para a aspersão da solução indicadora de nitrato de prata.

Para análise da profundidade da penetração de cloretos (medida transversal) utilizou-se todo o corpo de prova, sem desconsiderar as extremidades, já que os ciclos foram realizados a solução à meia altura (HELENE *et al.*, 2012).

O esquema do ensaio é apresentado nas Figuras 25, 26 e 27.



Figura 24 - Ensaio Colorimétrico – Rompimento diametral da amostra.



Figura 25 - Ensaio Colorimétrico – Aspersão de Nitrato de Prata.

Como a penetração de agentes deletérios em estruturas de concreto armado é relacionada à qualidade do concreto e sua à resistência a penetração dos agentes agressivos, considerando sua porosidade e permeabilidade, seu deslocamento é determinado pelas características químicas e físicas, concentração das substâncias agressivas e condições ambientais (CHEN et al., 2008; NEVILLE, 2016) o ensaio para ambos os concretos e idades foi realizado tomando no mesmo dia e horário.

Em relação à exposição das amostras ao agente deletério, íons cloreto, todas as amostras seguiram as mesmas condições de exposição.

A Figura 27 apresenta as regiões formadas com a presença dos íons cloretos (livres e combinados) (região branca) e livres de cloretos (região marrom).



Figura 26 - Ensaio Colorimétrico – Região branca e Marrom.

O método colorimétrico é um processo prático e rápido que mede a profundidade da penetração de cloretos quando uma solução aquosa de nitrato de prata 0,1 N (AgNO_3) é pulverizada sobre a seção transversal do concreto rachado (KIM et al, 2013).

O mecanismo do método após a aplicação da solução em estruturas de concreto um depósito branco é formado através da reação do íon prata (Ag^+) e íon cloreto (Cl^-) e após a penetração de íon cloreto (Cl^-), ocorre uma reação adicional de precipitação ao lado da reação de precipitação branca, criando uma outra parte marrom livre dos cloretos, onde há a formação do óxido de prata conforme apresentado na Figura 28 (MEDEIROS, 2008; MARCONDES, 2012).

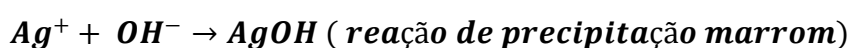
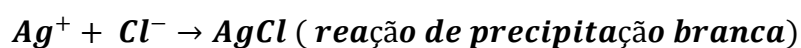


Figura 27 – Reações químicas envolvidas no processo colorimétrico.

O hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) resultante da hidratação do cimento reage com os íons de prata, gerando o óxido com precipitação marrom e sem a existência de cloretos.

4.3.6 Medida de Avanço da Penetração de Íons Cloreto

A reação química que leva a mudança de cor é afetada pela concentração da solução de nitrato de prata, pelo pH do meio, pela presença de carbonatos e pelo teor de cloretos do concreto (REAL et al., 2015).

Deste modo para a análise do avanço da penetração dos íons tomou-se o cuidado das medidas serem realizadas com os dados nos primeiros minutos após a reação para evitar alterações no pH do meio.

As datas dos rompimentos foram próximas das medidas da difusividade para analisar o teor dos cloretos presentes no concreto. Já que a migração dos íons cloreto no concreto é claramente influenciada com a influência das reações pozolânicas e com o refinamento da porosidade em relação à permeabilidade à água e propriedades de transporte (MIR et al, 2020).

A medida do avanço da penetração dos íons de cloreto foi baseada na NT BUILD 492 (1999). Como a penetração de cloretos não é uniforme, a NT BUILD 492 (1999) recomenda realizar medidas a cada 1 cm, sendo o resultado a média entre todas elas (TANG AND SØRENSEN, 2001). O cálculo da média da penetração dos íons é descrito na norma ASTM G1:1998.

Os resultados da medida de avanço dos íons cloreto foram feitos em 425 dias e 665 dias, sendo realizados após mais de um ano de ciclos já que em cobrimentos superiores a 16 mm o concreto seca mais devagar e a capacidade de fixar cloretos é principalmente uma questão de adsorção física (GJORV, 2015).

4.3.7 Determinação da Porosidade do Concreto

A porosidade, medida da proporção do volume total ocupado pelos poros é expressa em porcentagem. Sabe-se que o teor de umidade controla a penetração dos agentes agressivos e com o aumento do tempo de cura há uma redução na porosidade.

Logo, deste modo, optou-se a analisar a porosidade inicial para as amostras curadas apenas aos 28 dias de cura para ambos os tipos de concreto, sem considerar as outras idades de cura estudadas.

Para determinar as características físicas dos concretos, foram ensaiados um total de 36 amostras cilíndricas (\emptyset 10cm, h = 20 cm) com cura úmida para os

ensaios de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica para caracterização da porosidade.

O estudo da absorção capilar é importante para aplicação de materiais de fins estruturais, vida útil do concreto e concreto em ambientes marinhos (JÚNIOR et al, 2019).

O coeficiente de absorção capilar do concreto, que corresponde ao coeficiente angular da curva de absorção capilar contra a raiz quadrada do tempo, em seu trecho linear inicial, foi determinado pelo método padrão brasileiro NBR 9779 (ABNT, 2012).

O método consiste em colocar a face inferior do corpo de prova imerso em água a uma profundidade de 5 ± 1 mm e medindo a sua massa após 3, 6, 24, 48 e 72 h (Figura 29). Este teste foi realizado em triplicada onde as amostras de 28 dias de cura de CC e CAA estavam secas em estufa a 105°C até à constância de massa.



Figura 28 - Ensaio de absorção capilar das amostras de concreto de 28 dias de cura

A avaliação da taxa de absorção de água por imersão, índice de massa e massa específica foi determinado pela norma NBR 9778 (ABNT, 2009). A preparação da amostra foi realizada de acordo com NBR 9778 que recomenda a saturação dos corpos de prova em água após 3 dias, a amostra então foi mantida em um recipiente e fervida por 5 horas para os respectivos cálculos das massas (Figura 30).



Figura 29 - Corpos de prova de concreto submetidos à fervura por 5 horas

Os testes de absorção de água nas amostras foram realizados para comparação com outros resultados e avaliações das propriedades de durabilidade (SASANIPOUR AND ASLANI, 2020).

Este ensaio foi realizado nas mesmas condições de tempo e idade para o grupo amostral reduzindo as variações em relação as fases hidratadas, e desenvolvimento da microestrutura em relação ao tempo.

Os cálculos das massas para a análise das taxas de absorção de água por imersão, índice de massa e massa específica dos CC e CAA foram determinados através da média do grupo amostral, com os respectivos cálculos do desvio padrão e coeficiente de variação.

4.3.8 Determinação da Porosidade do Concreto – B.E.T.

O método Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.) tem o intuito de entender a microestrutura e o empacotamento das misturas, o qual através da determinação do volume de gás adsorvido há uma relação com a superfície específica do material (DINIZ, 2018). Ele apresenta a medida do diâmetro médio do espaço poroso e a porosidade do material através do método de adsorção e desorção de nitrogênio.

A resposta é expressa em termos de área de superfície por unidade de volume de grão, S_{Vgr} . A área superficial específica é definida como a razão da área

superficial exposta por unidade do volume de grão do material (BENAVENTE et al, 2006).

Com relação a superfície dos poros sua caracterização e estrutura também pode estar relacionada a superfície específica (SSA) após um período acelerado, como os ciclos de secagem e molhagem. Há uma correlação positiva entre os parâmetros de transporte de água no concreto e raio médio dos poros, e uma negativa com a área SSA.

A área de superfície específica (SSA) pode ser estimada usando a equação 33 (B.E.T) (SAEIDPOUR, 2015):

$$SSA = \frac{AN_a}{M_w} V_m \quad (33)$$

Onde SSA é a área superficial específica, V_m é o volume de gás adsorvido quando a superfície do material é completamente coberta com uma molécula de camada única, N_a é constante do avogadro, M é a massa molar do vapor e A é a área ocupada com uma molécula de gás.

Para este ensaio o grupo amostral foi de amostras sólidas de CC e CAA secas em estufa a 105°C até não apresentar variação de massa para as diferentes idades de cura, com aproximadamente duas gramas (Figura 31).



Figura 30- Amostras sólidas dos tipos de concreto para o ensaio de B.E.T

As porosidades das amostras cilíndricas submetidas aos ciclos de secagem e molhagem foram analisadas para este ensaio após 445 dias. A massa seca de cada amostra foi determinada após forno secagem a 105 ° C por 48 h, verificando a constância da massa em balança analítica.

O ensaio foi realizado no Centro Integrado de Análises da Universidade Federal do Rio Grande - CIA/FURG, utilizando o gás nitrogênio, em equipamento Analisador de Área Superficial Gemini VII 2390 A–Micromeritics (Figura 32). As amostras analisadas por adsorção de nitrogênio foram feitas após serem termicamente tratadas e submetidas a vácuo, para não desorverem gases ou vapores durante a análise.



Figura 31- Equipamento Analisador de Área Superficial Gemini VII 2390A – Micromeritics

A análise de B.E.T foi realizada para correlacionar as diferentes idades de cura com a porosidade dos concretos, sua penetrabilidade e difusividade após um ano de ciclos de envelhecimento nas amostras de CC e CAA. Esta revela a investigação da interação complexa dos subprocessos do concreto que atua em sua microestrutura (KLEPEL et al, 2019) e a resposta a degradação.

4.3.9 Análise Morfológica e Química

O estudo da morfologia das amostras de CC e CAA nas idades de cura de 3, 5, 7 e 28 dias foram feitas com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) após o período de envelhecimento acelerado.

Os MEVs foram realizados pelos equipamentos microscópios modelo Jeol, JSM-6610LV localizado no CEME-SUL no campus FURG em Rio Grande e pelo modelo SHIMADZU, SSX-550 localizado no NOVONANO no campus UFPel em Pelotas e ambos acoplados com detector de EDS no modo de elétrons secundários.

Esta técnica foi utilizada para identificar possíveis alterações nas fases e a influência do cloreto. A morfologia do concreto e as propriedades do transporte dependem de vários fatores como a idade de cura e das condições de exposição (WONG et al, 2011). Deste modo as micrografias foram realizadas no mesmo período considerando suas alterações durante o processo de exposição.

As amostras foram tratadas para análise do MEV no período inicial, após um período de 445 e 665 dias de ciclo de secagem e molhagem para CC e CAA. Considerou apenas a idade de 28 dias no período inicial (referência) sem as amostras estarem submetidos ao processo de deterioração e ciclos de envelhecimento. Para os outros períodos foram ensaiadas as amostras do CC e CAA para as idades de 3, 5, 7 e 28 dias de cura após a ação dos íons de cloreto em ciclo de secagem e molhagem em processo acelerado. As amostras foram secas em estufa a 105°C por um período de 72 h.

A Figura 33 mostra o porta amostra do MEV com as amostras de concreto.



Figura 32 - Portal de Microscopia contendo amostras sólidas de concreto

Como os equipamentos de MEV estão acoplados com detector de EDS (espectrômetro de raio-X de energia dispersiva) foram realizadas as análises químicas das amostras (Figura 34).



Figura 33- Microscópio Jeol, JSM-6610LV localizado no CEME-SUL

Os sinais utilizados na análise química por EDS são gerados a partir da interação de um feixe de elétrons de alta energia (20 kV de potencial) com os elementos químicos da superfície da amostra. A análise qualitativa por EDS foi realizada a partir de um volume muito pequeno de material, sendo as mesmas amostras que se encontravam no porta amostras para o MEV.

4.3.10 Análise Mineralógica

A técnica de difração de raios X foi utilizada para a identificação das fases cristalinas, presentes nas amostras de concreto.

As análises qualitativas das fases de hidratação para as amostras de CC e CAA foram realizadas com o auxílio do software Panalytical x'Pert.

O equipamento para a análise foi o difratômetro Bruker, D8 Advance localizado no CEME-Sul no campus FURG em Rio Grande. A varredura foi realizada com valores de 2θ entre a faixa angular de 10° a 90° com passo de $0,05$ e tempo de 1s.

Para o preparo da amostra, foram analisadas as amostras em pó de CC e CAA nas idades de 3, 5, 7 e 28 dias de cura em relação ao maior tempo de exposição aos íons de cloreto (665 dias).

As amostras foram secas a 105°C em estufa até massa contante e após foram trituradas e peneiras em peneira mesh 200.

A Figura 35 mostra as amostras em pó e a Figura 36 o equipamento utilizado.



Figura 34- Amostras em pó de concreto e porta amostras do DRX



Figura 35 - Equipamento Bruker, D8 Advance localizado no CEME-Sul

Deste modo esta técnica permitiu avaliar a influência da presença do íons cloreto nas fases de hidratação dos concretos (sal de Friedel) e as diferentes condições do transporte do mesmo nas diferentes idades e tipo.

5 Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados segundo o planejamento experimental da Etapa 1 – caracterização dos traços CC e CAA e da Etapa 2 – Comportamento em Relação ao Transporte de Cloretos.

5.1 Etapa 1 - Traço Concreto Convencional e Traço Concreto Auto Adensável

Os estudos experimentais basearam-se na obtenção de traços de concreto da mesma família com materiais e suas características para atendimento das normas brasileiras.

5.1.1 Traço Concreto Convencional (CC)

O procedimento usado para dosagens do CC foi o método do EPUSP/IPT onde adotou-se curvas granulométricas ideais para o desenvolvimento dos dois traços (CC e CAA).

De posse das caracterizações dos materiais e utilizando os mesmos materiais para todas as famílias de concretos, os resultados experimentais dos traços rico, intermediário e pobre com diferentes relações água/cimento e, conseqüentemente, diferentes resistências à compressão para os valores unitários totais de agregados (m) em relação ao cimento conforme o método preconiza são apresentados na Tabela 14.

O teor de argamassa ideal adotado foi de 51% para os três traços.

Tabela 14 - Traços do IPT

Traço IPT		
Rico (m=3,5)	Intermediário (m=5)	Pobre (m= 6,5)
a/c: 0,38	a/c: 0,50	a/c: 0,63
1 : 1,30 : 2,2	1 : 2,06 : 2,94	1 : 2,83 : 3,67

De posse dos valores de resistência à compressão, construiu-se o diagrama de dosagem baseado nas equações de Abrams, de Lyse e a Lei de Priszkulnik e Kirilos.

O desvio padrão de dosagem (sd) foi adotado de acordo com a norma brasileira NBR 12655 (ABNT, 2015) sendo o seu valor igual a 4,0 MPa (condição de preparo A).

Considerando os valores limites de norma para classe de agressividade III os resultados das leis de comportamento foram às equações (34), (35) e (36) apresentadas aos 28 dias.

$$f_{c28} = \frac{164,1035}{11,2551^{a/c}} \quad R^2 = 0,9859 \quad (34)$$

$$C = \frac{1000}{0,396+0,4644*m} \quad R^2 = 0,9999 \quad (35)$$

$$m = -1,0368 + 11,9936 * a/c \quad R^2 = 0,9994 \quad (36)$$

O traço CC adotado, neste trabalho, considerando os valores limites de norma para classe de agressividade III foi: 1 : 1,918 : 2,803 (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo). A composição ótima adotada para o agregado graúdo (Brita 1 e 2) foi de 70/30.

Sendo o teor de argamassa do traço encontrado de 51%, o consumo de cimento de 382,6 kg/m³, o consumo de agregado miúdo de 733,65 kg/ m³ e o consumo de agregado graúdo de 1072,5 kg/m³.

A relação de água/cimento adotada foi de 0,5 para uma resistência à compressão aos 28 dias de 42,38 MPa.

Os diagramas de dosagem encontrados aos 3, 7 e 28 dias são apresentados na Figura 37 que representa o ábaco do IPT desenvolvido no trabalho.

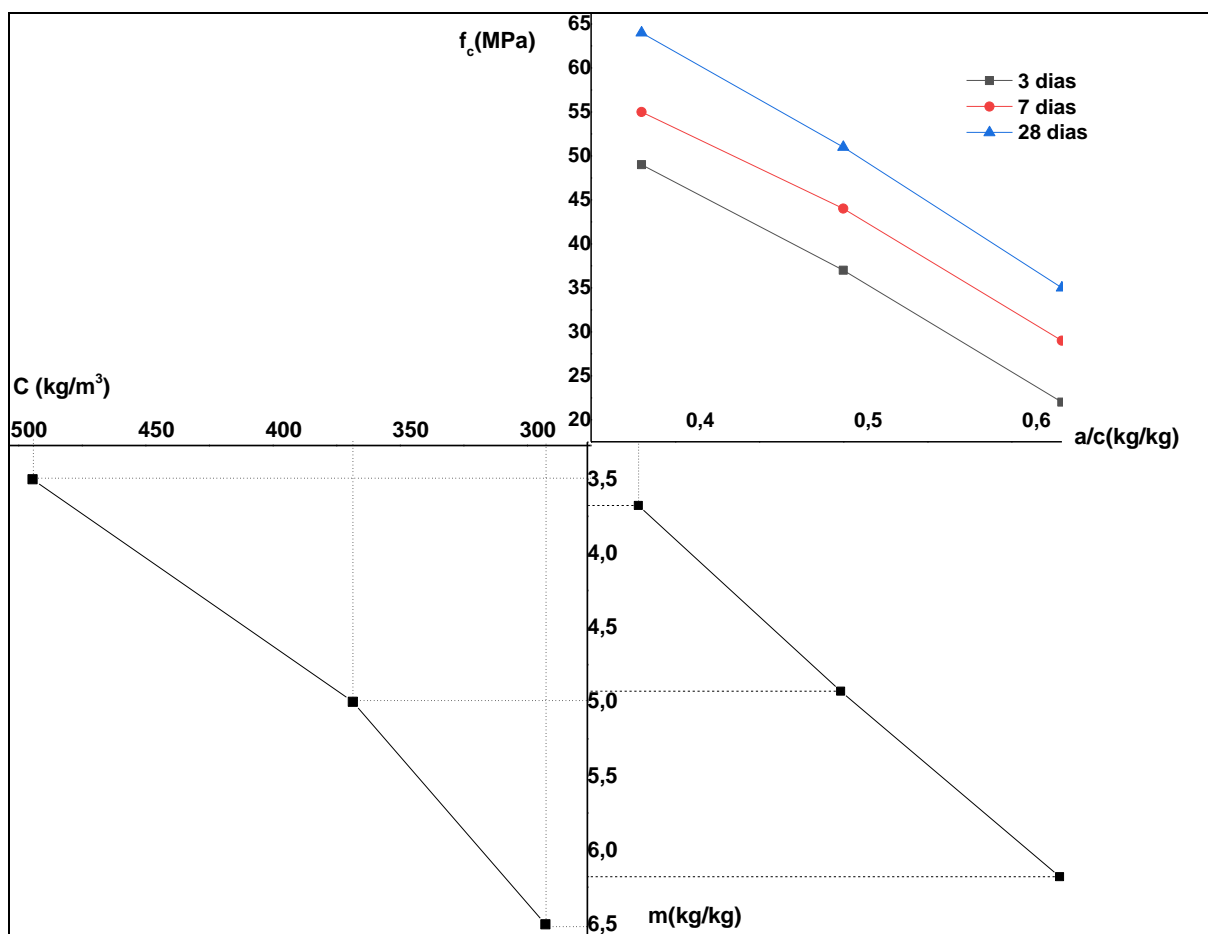


Figura 36 - Diagrama de dosagem concreto convencional referência.

5.1.2 Traço Concreto Auto Adensável (CAA)

O método usado para dosagens do CAA foi o método do Tutikian e Dal Molin (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008) adaptado. O método adaptado partiu do traço CC adotado substituindo parte do agregado miúdo (areia 1) pelo filler (areia 2) com a adição do plastificante até a obtenção do espalhamento desejado (classe SF1).

Para o ajuste do traço do CAA foram considerados os parâmetros fixos relação água/cimento e resistência mecânica para as idades normatizadas e encontradas para o traço do CC. As variáveis volume de filler e porcentagem do aditivo finais do traço adotado foram encontradas de forma a garantir a coesão do mesmo evitando exsudação e segregação.

O teor ideal de argamassa seca adotado foi sendo ajustado de forma experimental. Para tanto as proporções do superplastificante partiram de um estudo

da abertura do espalhamento da argamassa na mesa de fluidez (Flow Table) e seus resultados serviram de base para o estudo do traço do CAA.

A Figura 38 demonstra o estudo experimental da abertura do espalhamento da argamassa na mesa de fluidez. Desta forma diferenças surgem para o acerto dos finos e do aditivo. À medida que se adiciona material fino a mistura, esta vai ficando mais coesa e menos fluida. O ensaio de trabalhabilidade nos primeiros estudos foi o espalhamento, tomando-se cuidado para que aditivo não perdesse o efeito por cerca de 10 minutos. A Figura 39 demonstra o estudo experimental da abertura do espalhamento no concreto no Cone Abrams.

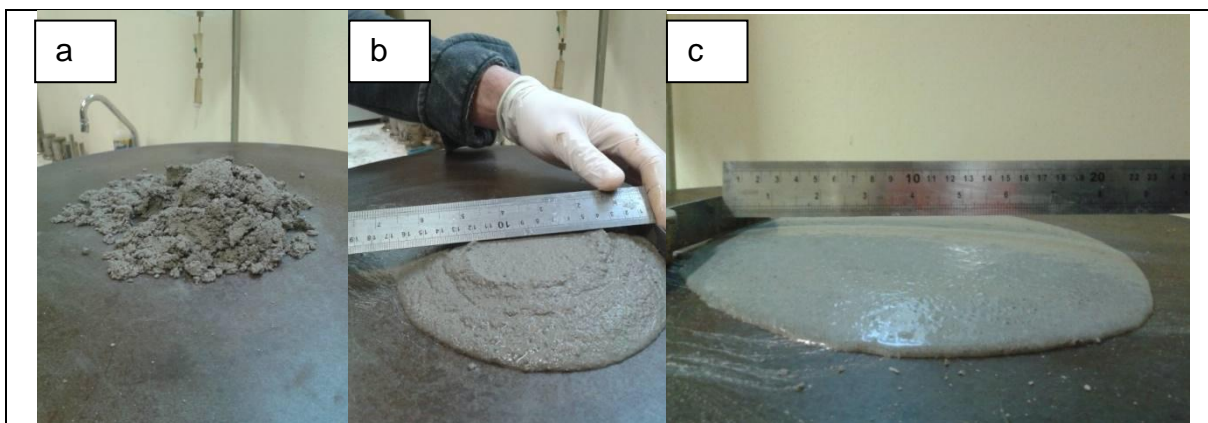


Figura 37 - Estudo Experimental do Espalhamento da Argamassa (a) medida de espalhamento seca; (b) medida de espalhamento intermediária; (c) medida de espalhamento final.

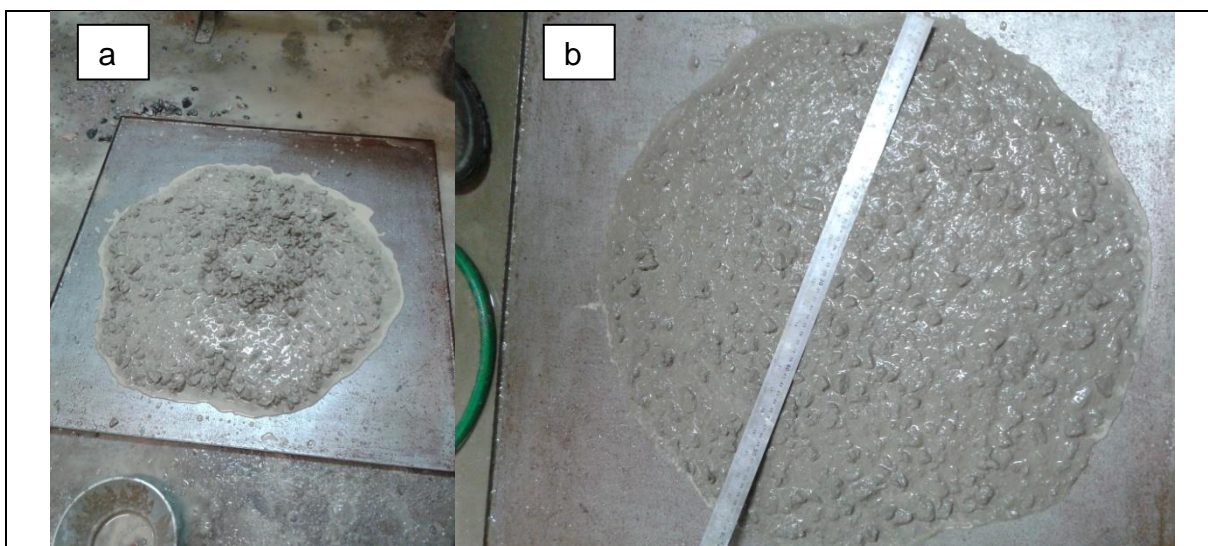


Figura 38- Estudo Experimental do Espalhamento do Concreto (a) com segregação (b) sem segregação

Após o estudo experimental para ajuste do traço e considerando os valores limites de norma para classe de agressividade III, o traço adotado para o CAA foi de 1 : 2,520 : 1,813 (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo).

Foi adotado 30% de relação de finos (filler, areia 2) e um teor final de aditivo superplastificante de 0,39%, bem inferior ao limite máximo recomendado pelo fabricante da BUILDER e considerado no estudo do espalhamento da argamassa.

O teor de argamassa final encontrado foi de 66%, o consumo de cimento de 408,37 kg/m³ e uma relação água/cimento de 0,49. Cabe ressaltar que o consumo de cimento e fator água cimento são bastante similares aos valores do CC.

O consumo adotado de agregado miúdo foi de 1029,1kg/m³ e de 740,51 kg/m³ para o agregado graúdo.

A composição ótima adotada foi mantida a mesma do traço do CC que era de 70/30 (Brita 1/Brita 2). A resistência à compressão aos 28 dias do traço de CAA foi de 42,36 MPa.

5.1.3 Análise do Estado Fresco do CC e CAA

A Tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios encontrados para o traço de CC e CAA adotados neste estudo.

Os resultados para o CC comprovam que o traço adotado representa um concreto não fluido e vibrado, classe de consistência S50. Os resultados para o CAA comprovam um concreto fluido bombeado com aplicações em vigas, pilares e pré-moldados para as classes SF1, VS2/VF2, PL2 e PJ2.

Tabela 15 - Resultados para análise do Estado Fresco para CC e CAA em ensaio experimental

Traço	CC		CAA			
	Slump Test (mm)	Cone Abrams (mm)	T500 (segundos)	Caixa L (H2/H1)	Funil V (segundos)	Anel J (mm)
	70	590	2,19	0,77	4,47	50

As Figuras 40 e 41 apresentam imagens dos ensaios dos concretos em seu estado fresco, analisando a mistura em relação ao seu grau de fluidez (Slump Test. e Cone Abrams).



Figura 39 - Ensaio de Trabalhabilidade concreto convencional.

Para o CAA o resultado para a determinação da fluidez livre foi analisado em relação a ação do seu próprio peso e viscosidade adequada para bombeamento e espalhamento do concreto (Figura 41).



Figura 40 - Ensaio de Trabalhabilidade CAA.

As Figuras 42 a 45 apresentam os resultados da habilidade de preenchimento, passante e resistência à segregação segundo a norma ABNT NBR 15823 (ABNT, 2010) avaliados experimentalmente.



Figura 41 - Ensaio Experimental CAA Cone Abrams.



Figura 42 - Ensaio Experimental CAA Caixa L.



Figura 43- Ensaio Experimental CAA Funil V.



Figura 44 - Ensaio Experimental CAA Anel J.

Deste modo, frente aos resultados do CAA em estado plástico os requisitos de norma foram garantidos pelo traço adotado, verificando suas propriedades e classes de autoadensibilidade.

5.1.4 Análise do Estado Endurecido do CC e CAA

As Tabelas 16 e 17 apresentam os resultados de resistência mecânica à compressão axial dos CC e CAA nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Tabela16 - Resultados do de Resistência a Compressão do CC

Ensaio a Compressão	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
$f_{c,j}^*$ (MPa)	29,39	31,76	42,38	46,02
Desvio padrão (MPa)	3,66	0,99	1,26	0,89
Coefficiente de Variação (%)	12,45	3,12	2,98	1,95

$f_{c,j}^*$ - resistência média à compressão.

Tabela 17 - Resultados do de Resistência a Compressão do CAA

Ensaio a Compressão	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
$f_{c,j}^*$ (MPa)	32,29	35,88	42,36	46,99
Desvio padrão (MPa)	1,62	1,37	1,03	1,26
Coefficiente de Variação (%)	5,02	3,83	2,42	2,74

$f_{c,j}^*$ - resistência média à compressão.

O comportamento mecânico avaliado para CC e CAA são apresentados na Figura 45. O resultado confirma que o grupo amostral estudado apresenta a mesma resistência mecânica aos 28 dias, que foi confirmado aos 91 dias.

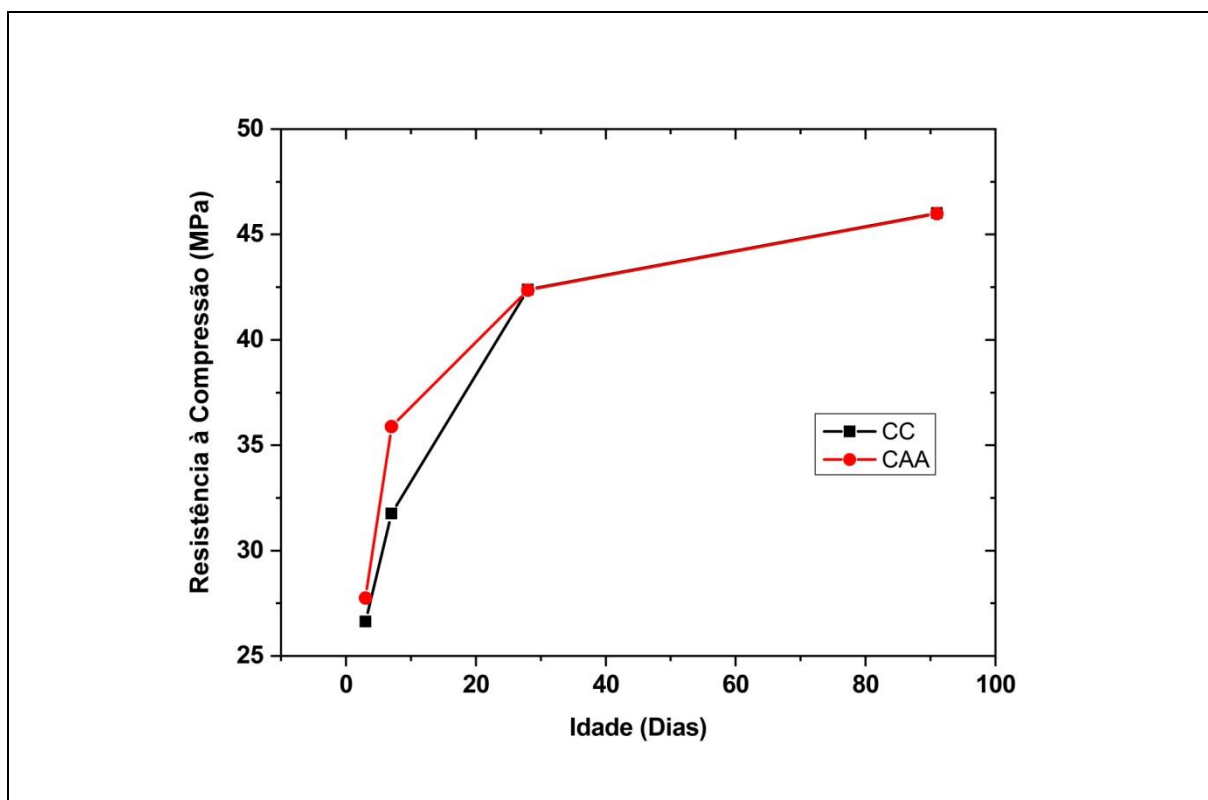


Figura 45- Curva de Resistência à Compressão em função da idade e do tipo de concreto.

Os resultados dos traços de CC e CAA confirmam que os valores encontrados para a resistência característica do concreto (f_{ck}) foi superior a 30 MPa aos 28 dias (o desvio de padrão de dosagem (sd) igual a 4,0 MPa). Portanto o valor encontrado está dentro do mínimo estabelecido pela norma para a para classe de agressividade forte (Classe III).

Como o coeficiente de variação representa uma estimativa de erro experimental em relação à média geral do ensaio, foi verificada maior precisão nas idades de 28 dias e 91 dias para ambos os concretos sendo que nas primeiras idades, principalmente aos 3 dias, maior variação no grupo amostral.

5.2 Etapa 2 – Comportamento em relação ao transporte de cloretos

Os resultados apresentados nas amostras submetidas ao processo acelerado com a utilização de ciclos de secagem e molhagem no períodos de dois anos são apresentados a seguir.

5.2.1 Análise do comportamento eletroquímico – Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

Os resultados obtidos para a caracterização do CC e CAA por EIE foram analisados individualmente nas idades de cura de 3, 5, 7 e 28 dias durante os ciclos de secagem e molhagem pelos diagramas de Nyquist e se encontram no Anexo A.

Para uma melhor visualização do processo eletroquímico e comparação do tipo de concreto, idades de cura e idade de ciclo (processo de envelhecimento, tempo de exposição) foram apresentadas apenas as respostas inicial (primeiro ciclo) e final (86 ciclos) pelo diagrama de Nyquist.

E de forma mais clara o estudo do comportamento da curva e o estabelecimento da correlação entre os processos eletroquímicos pelo diagrama de Bode. Este estudo será apresentado apenas para os ciclos onde há alterações mais significativas, ou seja, onde ocorrem modificações no comportamento da curva. Os ciclos apresentados são inicial, 10 ciclos, 26 ciclos, 46 ciclos, 78 ciclos e 86 ciclos para as curvas de bode.

As representações de Bode, juntamente com Nyquist são muito utilizadas na literatura. Elas consistem na representação de logaritmo do módulo de impedância $\log|Z|$ e ângulo de fase (Θ) correspondente ao valor $|Z|$ em função do logaritmo da faixa de frequência estudada.

As Figuras 47 a 54 apresentam os diagramas de Nyquist para o estudo inicial (primeiro ciclo) e final (86 ciclos) para o CC e CAA aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura. De modo a verificar a magnitude, em termos de valores absolutos, das propriedades interpretadas a partir dos dados da caracterização por EIE nos diagramas de Nyquist, os dados foram analisados matematicamente através do ajuste de circuitos elétricos equivalentes.

Os diagramas de Bode foram apresentados no item 5.2.2 juntamente com a discussão.

A Figura 47 e 48 apresentam os diagramas de Nyquist para o estudo inicial (primeiro ciclo) e final (86 ciclos) para o CC aos 3 e 5 dias de cura (3CC e 5CC).

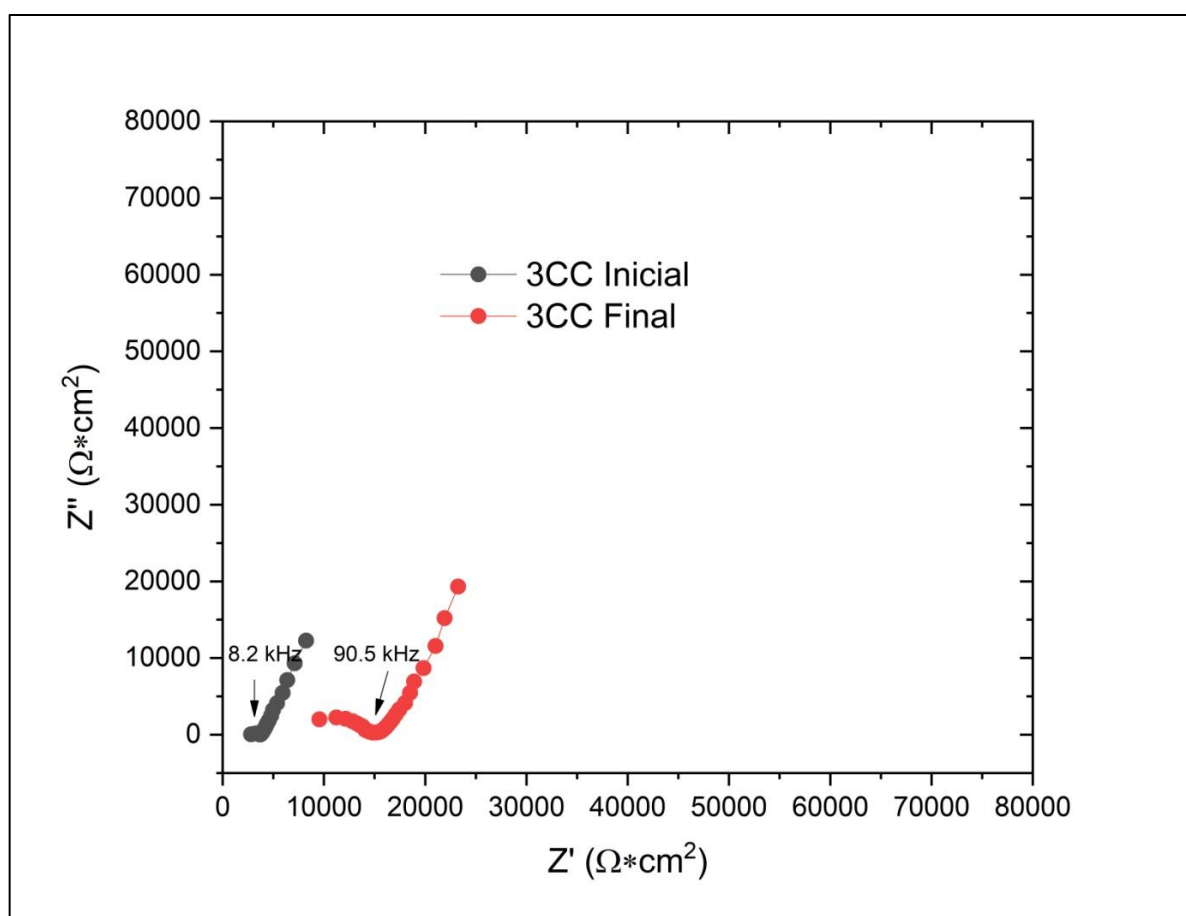


Figura 46– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado a 3 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).

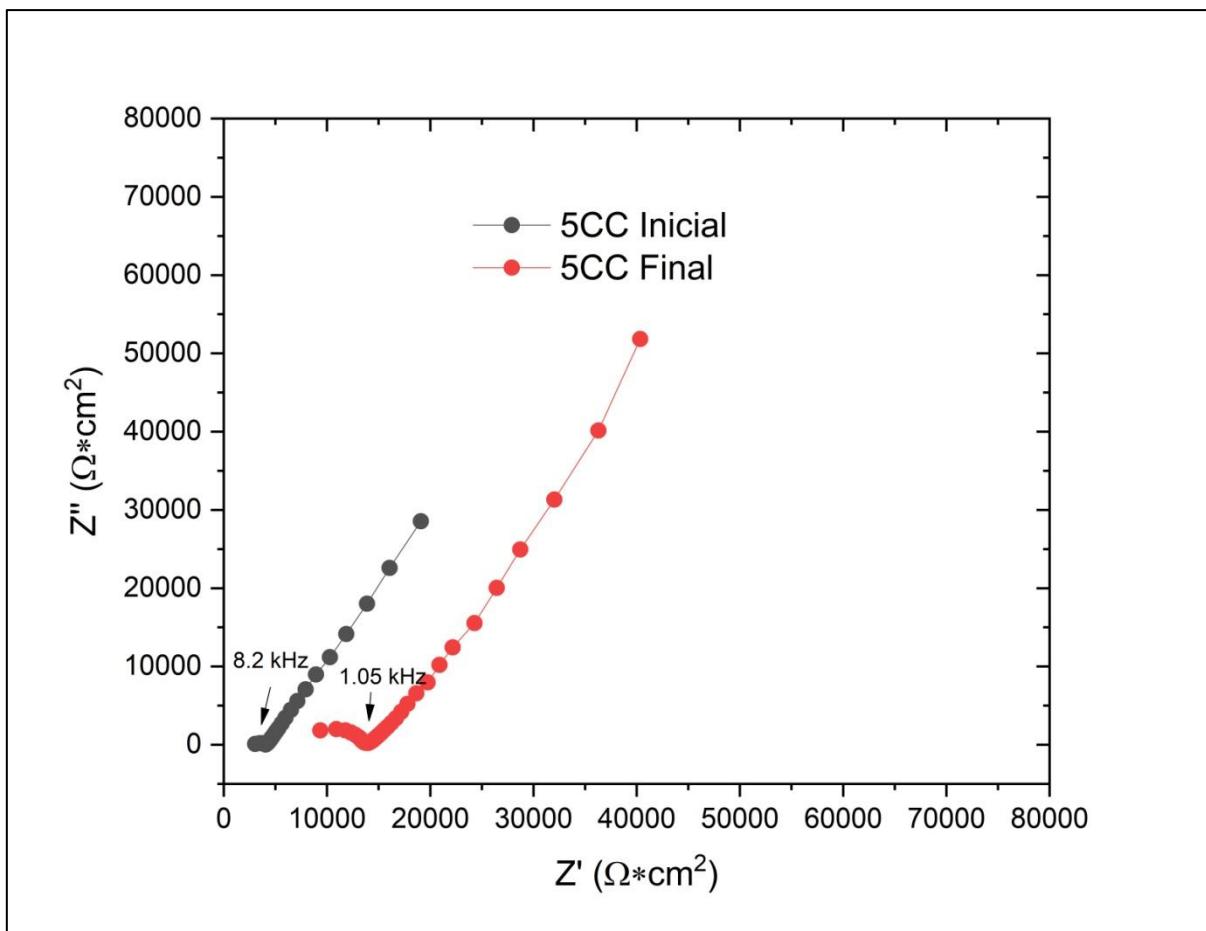


Figura 47 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado a 5 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).

Comparando a resistência elétrica inicial nas Figuras 47 e 48 para as medidas das amostras estudadas, nas primeiras idades de cura (3 e 5 dias) no CC o valor médio no grupo amostral foi de um R_p de $3.699,85 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 7,41%) para 3 dias e um valor de $4.056,15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V.= 16,68%) para 5 dias. Verificando que houve aproximadamente 18% de aumento na resistência elétrica das amostras com apenas dois dias a mais de cura úmida.

Já os valores da resistência final nas Figuras 47 e 48, medida após 86 ciclos de molhagem e secagem, para o mesmo grupo amostral, as médias encontradas foram de um R_p de $13.918,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V.= 11,41%) para 3 dias e um valor de $15.010,8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V.= 21,68%) para 5 dias. Em relação ao ciclo final estudado houve um aumento de aproximadamente 13% em relação a sua resposta elétrica para os ciclos iniciais.

Os resultados do grupo amostral das primeiras idades do CC apontam uma considerável variabilidade em relação a idade de cura com o aumento da idade de exposição. Como os valores do C.V. ficam abaixo de 25% o conjunto de dados é representativo e aceitável (ALBERT E ZHANG, 2010). O coeficiente de variação CV (%) é amplamente utilizado para medir a variação relativa de uma variável aleatória em relação à sua média ou para avaliar e comparar o desempenho de técnicas/equipamentos analíticos. Deste modo, os resultados são considerados confiáveis para o estudo e a variação da singularidade/ homogeneidade do material reduzida.

A Figura 49 apresenta o diagrama de Nyquist para o estudo inicial (primeiro ciclo) e final (86 ciclos) para o CC curados por 7 dias (7CC).

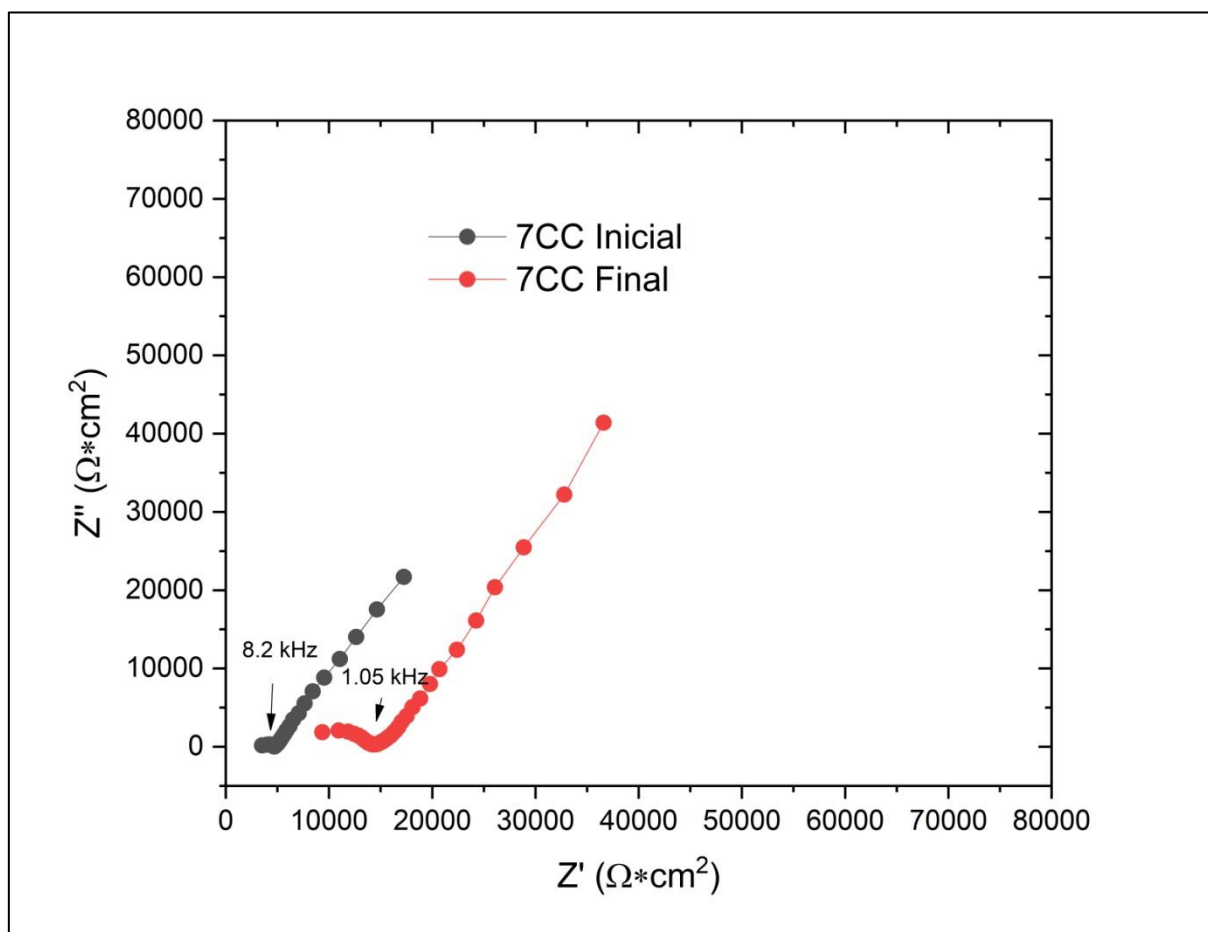


Figura 48– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado a 7 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).

Os resultados encontrados na Figura 49 para as suas resistências elétricas iniciais e finais foi de R_p de $4.693,15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 19,28%) e R_p de $16.351,3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 20,74%), respectivamente.

É importante salientar que o tipo de cimento utilizado neste estudo é o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V- ARI) com a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias de idade. Comparando os dados de 5 dias de cura e 7 dias de cura, percebe-se que na idade inicial os valores de resistência elétrica não obteve grandes alterações e para o ciclo final uma pequena variação de 10,82%.

A Figura 50 apresenta o diagrama de Nyquist para o estudo inicial (primeiro ciclo) e final (86 ciclos) para o CC aos 28 dias de cura (28CC).

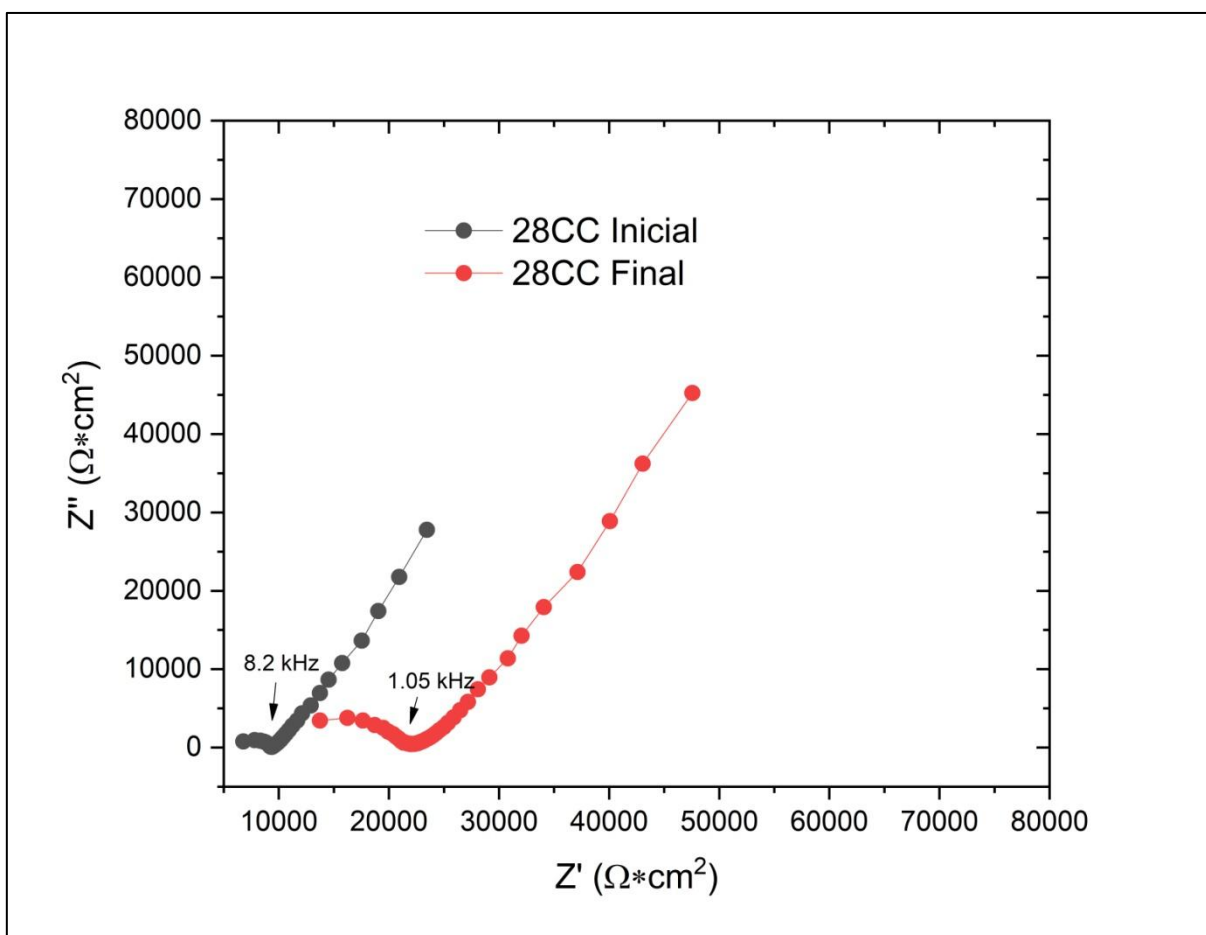


Figura 49 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado a 28 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).

Os resultados encontrados na Figura 50 para as suas resistências elétricas foram de R_p de $8.031,294 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 21,14%) e R_p de $22.138,9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. =

26,9%) para as idades de exposição iniciais e finais, respectivamente. Os resultados demonstram um aumento de aproximadamente 70% da resistência na comparação das Figuras 49 e 50 no primeiro ciclo para as idades de cura de 7 e 28 dias e, aproximadamente, 35% nas ultimas idades de exposição (86 ciclos.)

Considerando o tipo de cimento utilizado neste estudo que possui reatividade mais alta em baixas idades em função da moagem (mais fino) e, conseqüentemente, possui maior superfície específica, atingindo altas resistências mecânicas nas idades iniciais, este resultado demonstra que os benefícios da cura por 28 dias no concreto convencional em relação à resistência elétrica é importante mesmo que aos 7 dias de cura para a resistência a compressão já tenha sido atingido.

A Figura 51 apresenta o diagramas de Nyquist para o estudo inicial (primeiro ciclo) e final (86 ciclos) para o CAA aos 3 dias de cura (3CA).

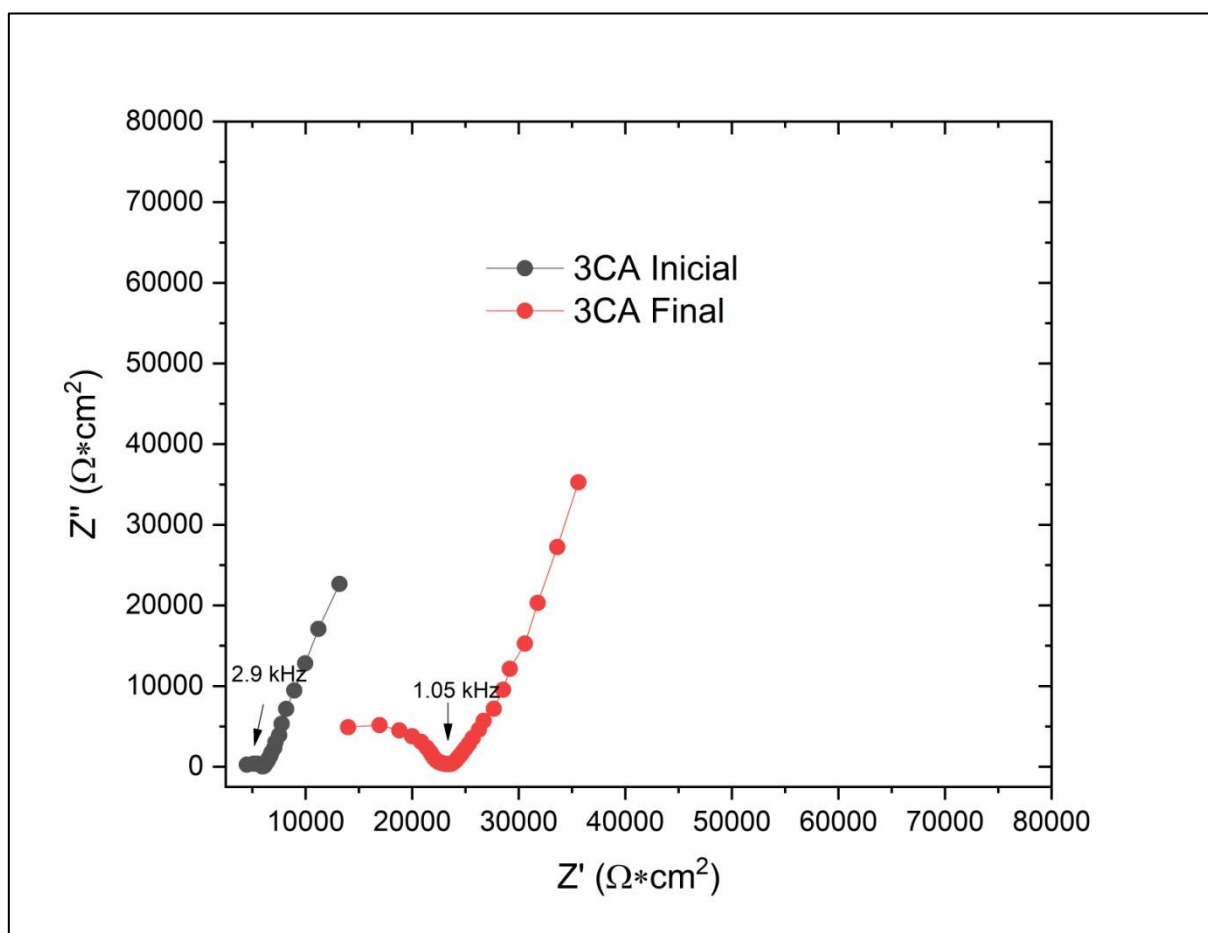


Figura 50– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 3 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).

Os resultados encontrados para a resistência elétrica inicial do CAA curado por 3 dias (3CA) é de R_p de $5.979,75 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 10,28%), que representa aproximadamente 62% maior do que apresentado no CC curado nas mesmas condições.

As respostas encontradas nos materiais submetidos ao mesmo processo indicam que existe uma maior resistência ao processo físico de transferência de carga, ou seja, uma menor taxa de corrosão do aço do 3CA em relação ao 3CC (GLASS et al., 1998). A resposta elétrica aferida indica que a geometria da microestrutura do CAA e dificuldade de circulação da água possui uma maior capacitância na interface eletrodo/eletrólito na região de altas frequências (RAJHANS et al., 2018 a,b; REVILLA-CUESTA et al., 2020).

Portanto o CAA possui maior resistência elétrica e maior resistência a transferência de carga, logo resistência a corrosão da armadura, se comparado com o CC submetido as mesmas condições e com a mesma resistência mecânica. Chen et. al (2020) confirma a maior resistência a corrosão da armadura no concreto auto adensável.

Os finos do CAA preenchem os poros e tem um efeito impermeabilizante com um loop capacitivo na região de alta frequência no espectro de impedância sendo apontado como uma resposta dielétrica do material à base de cimento (CHRISTENSEN et al., 1994; TANG et al., 2017, COVERDALE et al., 1994; HU et al., 2019).

Quanto maior for à constante dielétrica do material maior será sua capacitância e conseqüentemente maior é sua resistência na passagem de corrente elétrica, logo muitas vezes são chamados os materiais dielétricos de materiais isolantes. Já considerando todo o processo acelerado do material os resultados encontrados para a resistência final do CAA curado aos 3 dias (3CA) é de R_p de $23.377,9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 11,86%) o qual se aproxima de um aumento de 68% em relação ao CC curado nas mesmas condições e com a mesma idade de cura (Figura 47).

As altas porcentagem na diferença de resistência elétrica na comparação do CC e CA para 3 dias de cura reforça o interesse do estudo das condições da resistividade inicial e os parâmetros de impedância do material para seu controle.

Como o coeficiente de variação é menor tanto para os dados iniciais quanto finais para um mesmo tamanho de amostra que aponta um CAA mais homogêneo.

A Figura 52 apresenta os resultados de EIE para o CAA aos 5 dias de cura (5CA).

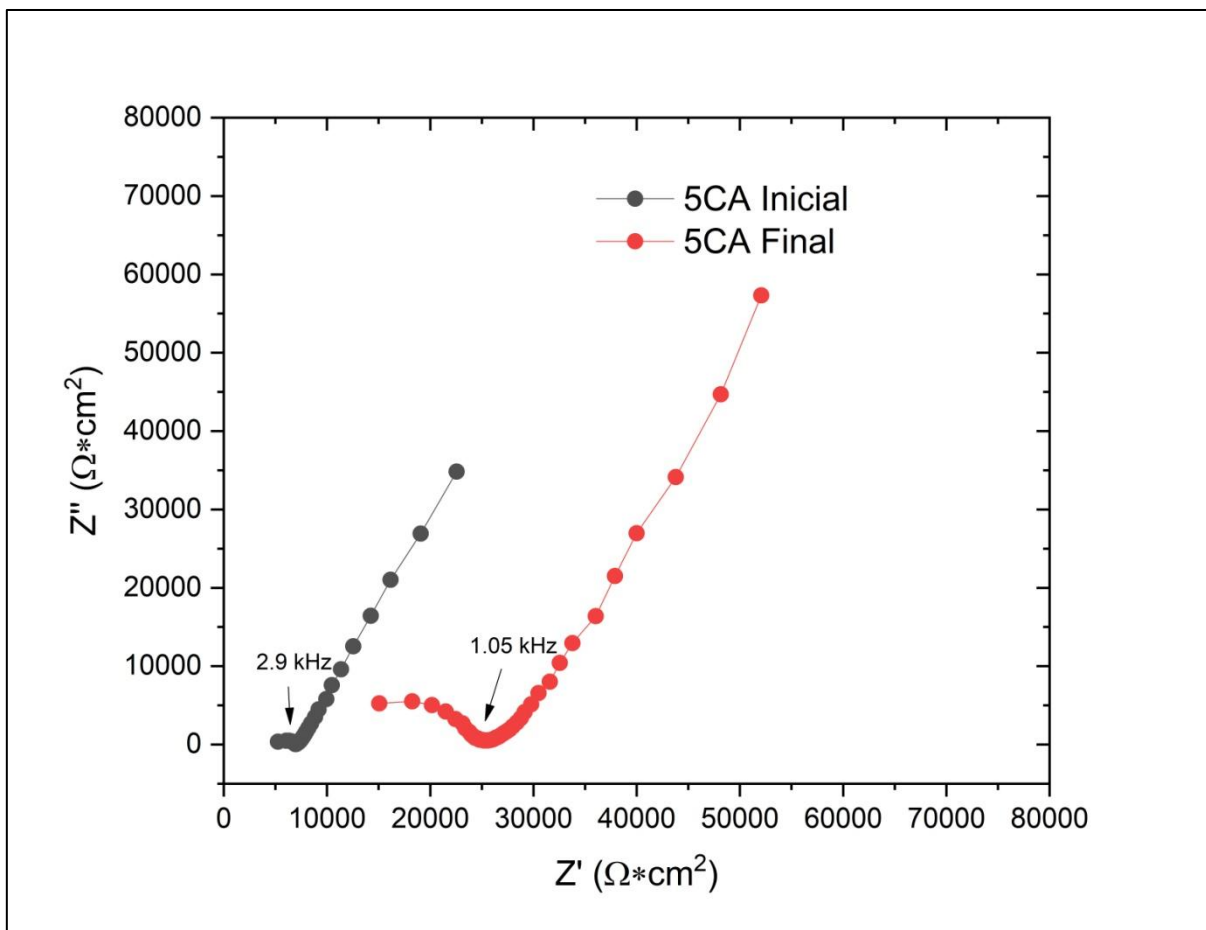


Figura 51 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 5 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).

Os resultados encontrados na Figura 52 são de R_p de 6.982,85 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 11,25%) para os dados iniciais e R_p de 29.733,2 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 14,96 %) para os dados finais. O aumento de R_p dos resultados encontrados nas curas de 3 dias (Figura 51 – 3CA) em relação a idade de cura de 5 dias é de 27,18% e 16,77% para os dados iniciais e finais, respectivamente.

Esta pequena variação nas primeiras idades de cura da resistência elétrica (R_p de 5.979,75 para 3 dias de cura e R_p de 6.982,85 para 5 dias de cura) em comparação com os dados do CC, curado nas mesmas condições, confirma a homogeneidade do material.

A Figura 53 apresenta o diagrama de Nyquist para o estudo inicial (primeiro ciclo) e final (86 ciclos) para o CAA aos 7 dias de cura (7CA).

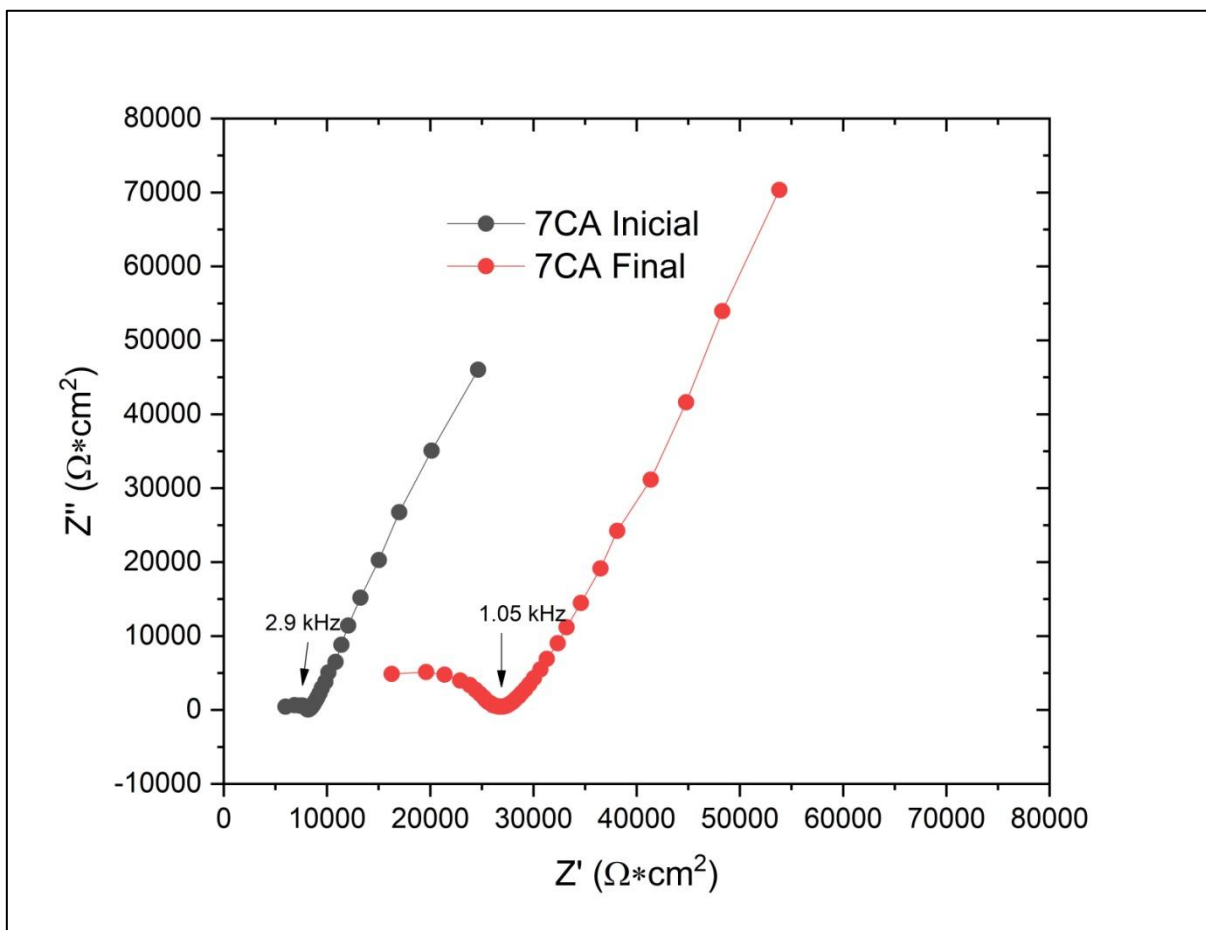


Figura 52 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 7 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).

Os resultados encontrados na Figura 53 para as resistências elétricas do 7CA no ciclo inicial foi de R_p de $8.167,61 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 6,74%) e R_p de $30.104,2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 5,85%) para a idade final.

Apesar dos resultados não apontarem um aumento significativo em relação ao concreto curado aos 5 dias (5CA) a resposta do coeficiente de variação CV (%) menor indica para a cura de 7 dias um material com menores alterações no processo de cura e hidratação.

A Figura 54 apresenta o diagrama de Nyquist para o estudo inicial (primeiro ciclo) e final (86 ciclos) para o CAA aos 28 dias de cura (28CA).

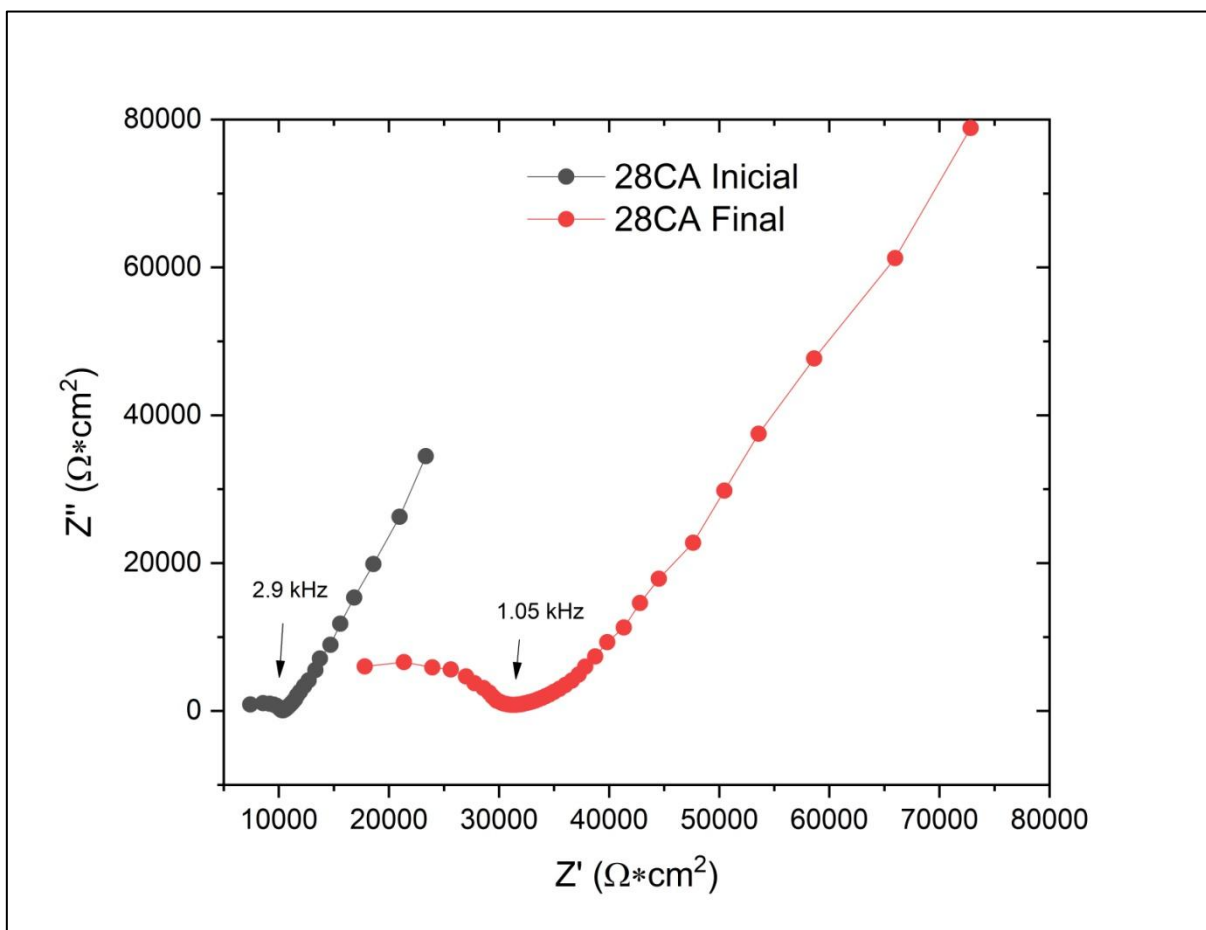


Figura 53 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 28 dias no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem).

Os resultados encontrados na Figura 54 para as suas resistências elétricas do 28CA foram de R_p de $10.354,75 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 7,42%) e R_p de $31.328,15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (C.V. = 11,50%) para as idades iniciais e finais, respectivamente.

Os resultados apresentam um aumento menor do 7CA para o 28CA (26% e 4%) aproximadamente para as idades iniciais e finais em relação as mesmas idades de cura do CC (70% e 35%). Os dados apontam que o processo de cura para a resistência elétrica no concreto auto adensável não possui resultados tão variáveis em relação ao concreto convencional corroborado pelo coeficiente de variação menor encontrado para este material

Os gráficos de impedância eletroquímica (EIE) também apresentam que o raio do semi-arco de impedância para o concretos armados (CC e CAA) aumentam

com o tempo indicando a formação de uma camada passiva gradual na superfície da barra de aço (MCCARTER, 1994; CABEZA et al., 2002, HU et al., 2019). Nas Figuras 47 a 54 o raio do arco de impedância para o ciclo inicial e final foi aumentado, ou seja, houve um aumento da transferência de carga, processo redox. Como a resistência de polarização (R_p) já discutida nos diagramas de Nyquist equivale à resistência a transferência de carga (diâmetro do semicírculo) verificou-se que o aumento da resistência de polarização ocorreu com o aumento do diâmetro do semicírculo. Quanto maior a resistência de polarização menor a taxa de corrosão (SOHAIL et al., 2020).

Verificou-se nas curvas iniciais e finais nas Figuras 47 a 54, os fenômenos de transporte de elétrons são mais rápidos do que os fenômenos de transporte de massas, por este motivo são apresentados nas frequências mais altas e nas primeiras idades de cura são bem menores.

A resistência do material em relação a um fluxo de eletricidade (resistência elétrica) é um parâmetro que varia em relação à vários fatores como a relação água/cimento, tipo de ligante, teor de umidade, temperatura, frequência e idade de cura (KURDA et al., 2019). Como nos resultados apresentados o único fator que varia é a idade de cura fica evidente a mudança da resistividade com a idade. Nas primeiras idades a variação da resistência elétrica não é tão grande como a variação encontrada nas amostras curadas aos 28 dias, provavelmente, devido ao tipo de cimento (NEMATOLLAHZADE et al., 2020).

Como o concreto convencional (CC) possui uma microestrutura porosa e conseqüentemente maior armazenamento de água nos poros, verifica-se nas últimas idades uma redução da resistência elétrica (Anexo A) e devido ao aumento na condutividade elétrica (MEDEIROS-JUNIOR et al., 2014), demonstrando que se o material não tivesse sido submetido a ciclos seus valores elétricos seriam maiores.

Nematollahzade et al. (2020) comprova uma alta taxa de variação da resistência elétrica até os 28 dias de idade com o tipo de cura do concreto auto adensável. Neste trabalho a idade de cura e o tempo de exposição (inicial e final) com a idade de cura no concreto auto adensável é um parâmetro que altera as propriedades elétricas do material de forma considerável.

Desta forma, para a análise das propriedades do desempenho do material as condições de cura e tempo, considerando os parâmetros elétricos que indicam

resistência a penetração de agentes agressivos devem sempre ser consideradas juntamente com os outros fatores.

A partir dos dados eletroquímicos (Figuras 47 a 54) com as medidas de impedância real (Z') e imaginária (Z''), a frequência e o ângulo de fase é possível avaliar os processos de transferência de carga e massa, condutividade, processo redox, região de dupla camada e coeficiente de difusão (JIANG E KUCERNAK, 2002).

Com isso, o arranjo dos elementos dos circuitos equivalentes são ajustáveis em função dos processos eletroquímicos desenvolvidos nos meio concreto, aço e interface. Para cada diagrama de Nyquist corresponde um circuito equivalente.

Sabe-se que neste espectro, o primeiro semicírculo, região de altas frequências, representa as características do concreto em si e pode ser analisado como um circuito composto de resistores (R) e capacitores (Q/CPE) (processo de transferência de carga).

Já o segundo processo, caracterizado na região de baixas frequências, representa a interface entre armadura e o concreto, além dos elementos resistores e capacitores também é identificada por mecanismos de difusão iônica, elemento de Warburg no circuito (W) (Bragança, 2014).

Nas Figuras 47 a 54 a linha linear com um ângulo em torno de 45° é caracterizada pela impedância de Warburg (SOUZA, 2013; RIBEIRO et al., 2015).

O fundamento na aplicação de circuitos equivalentes leva em consideração o comportamento da célula eletroquímica (Figura 22) utilizada durante as medidas de EIE. Além disso, há um efeito resistivo da solução de íons representada por R_s (resistência da solução).

Como a resistência de polarização (R_p) já discutida nos diagramas de Nyquist equivale à resistência a transferência de carga (diâmetro do semicírculo) sabe-se que houve aumento da resistência de polarização pelo aumento do diâmetro do semicírculo.

Neste trabalho os circuitos equivalentes seguem os modelos $[R(RQ)(RQ)]$ e $[R(RQ)(R[QW])]$ encontrados para o ciclo inicial e final, respectivamente (VEDALAKSHMI et al., 2017 e GNEDENKOV et al., 2018).

A Figura 55 apresenta o modelo de circuito equivalente proposto para o ciclo inicial e a Figura 56 para o ciclo final dos diagramas de Nyquist.

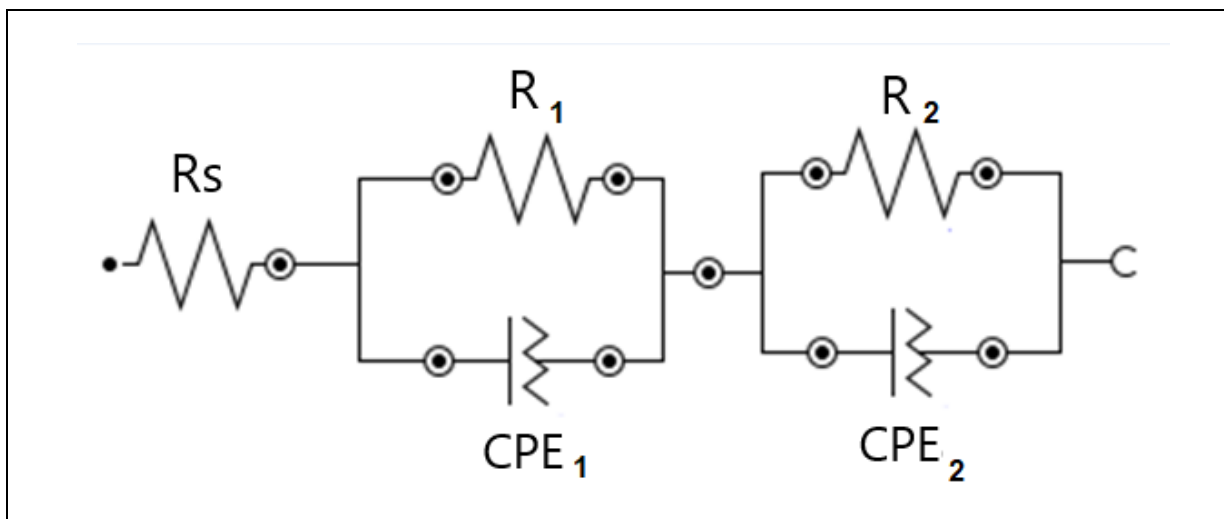


Figura 54 – Modelo de Circuito Equivalente Proposto para o ciclo inicial [R(RQ)(RQ)] .

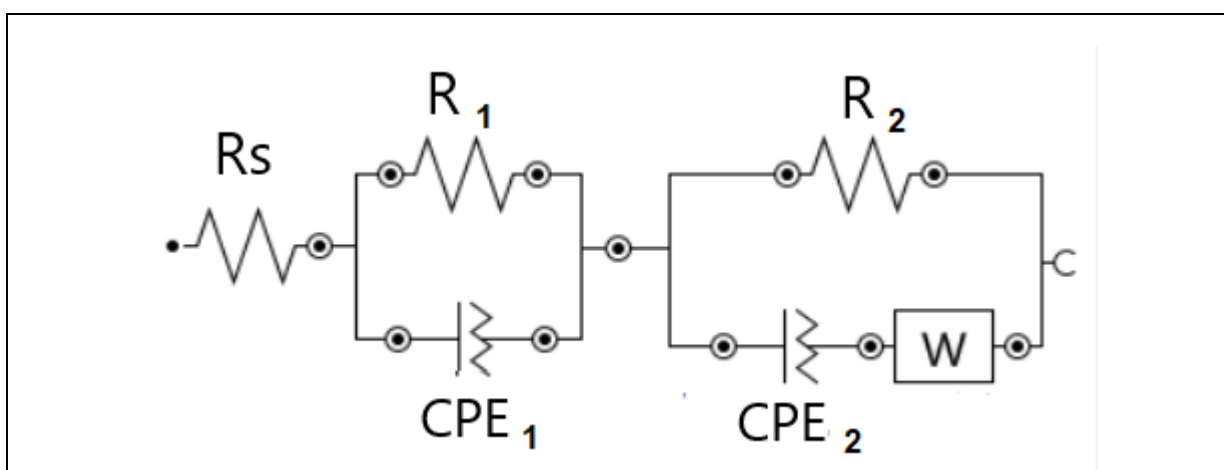


Figura 55 – Modelo de Circuito Equivalente Proposto para o ciclo Final [R(RQ)(R[QW])].

No circuito, a primeira resistência é a resistência da solução eletrolítica (R_s) onde o material a base de cimento e o concreto como meio poroso testa suas propriedades elétricas em seus poros devido sua estrutura capilar e a solução eletrolítica na transição interfacial.

A segunda parte dos circuitos representados para o inicial e final de um resistor (R_1) em paralelo com um capacitor (Q_1/CPE_1) representam a transferência de carga no concreto, onde a capacitância formada pela dupla camada do eletrodo/concreto.

A última parte dos circuitos que diferem nos modelos dos ciclos inicial e final representa a transferência de massa (processo difusional) na interface barra de aço/concreto onde o elemento de impedância de Warburg é inserido para refletir as características da difusão de massa, ou seja, Z_w é a impedância de Faraday (XIAN et al., 2012; HU et al., 2019).

A Figura 57 mostra a representação esquemática da interface aço/concreto onde, I representa a interação barra aço/concreto, última parte do circuito, II representa a interação com o concreto e III o material poroso cimentício e a resistência da solução eletrolítica.

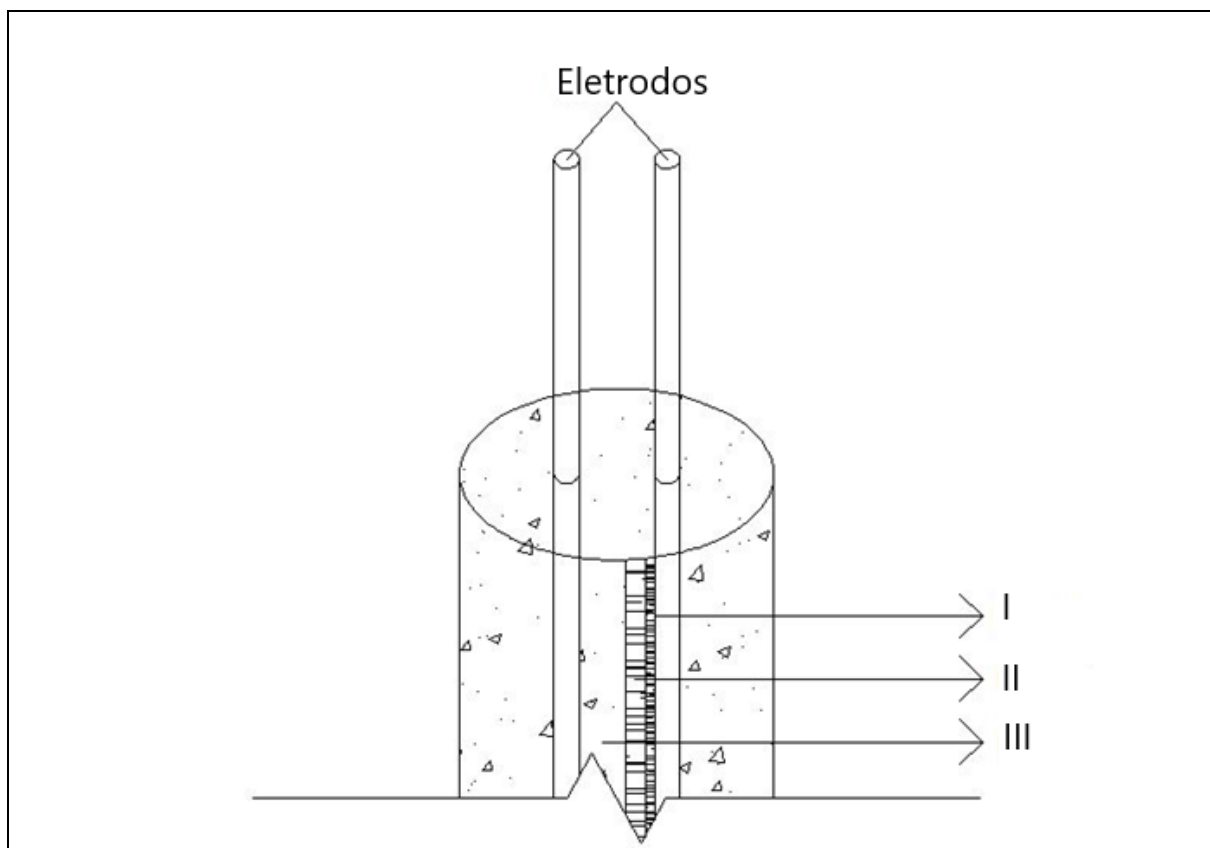


Figura 56 – Esquema das camadas de acordo com o circuito equivalente proposto. As camadas representadas são I (Aço), II (concreto) e III (solução porosa).

A interpretação do circuito equivalente na interface aço/concreto não é uma tarefa simples, existem diferentes processos que tem uma resposta de impedância (RIBEIRO et al., 2016). É interessante também citar que a resistência ao deslocamento nos diagramas de Nyquist geralmente é desconsiderada neste método. Ribeiro et al. (2016) também aborda a presença de um semicírculo em regiões de baixas frequências que demonstra a resistência do vergalhão (barra de aço) e presença de corrosão.

Na literatura existe uma variedade de circuitos equivalentes propostos que de diferentes formas apresenta os vários fenômenos observados no concreto (HU et al., 2019).

Tang et al. (2017) cita a presença das capacitâncias complexas neste material, representando a capacitância dielétrica dos sólidos e a capacitância da dupla camada formada nos poros com os produtos de hidratação de gel C-S-H.

Considerando estes aspectos, o circuito equivalente proposto está de acordo com as respostas da impedância, salvo a consideração da presença do semicírculo nas regiões de baixas frequências. Devido a devido à baixa degradação após exposição aos 86 ciclos de molhagem e secagem no material não houve este segundo semicírculo.

As propriedades eletroquímicas dos materiais cimentícios, principalmente os materiais com presença de íons são influenciados pelo efeito do armazenamento deste e sua difusão.

Os caminhos de transporte de massa dos íons (cinética da difusão) com suas alterações da estrutura cristalina são difíceis de serem analisados.

O elemento de Warburg ajuda nas conclusões da presença dos íons cloreto evidenciando a melhora a difusividade do íon cloro (GNEDENKOV et al., 2018).

Para confirmação dos circuitos equivalentes propostos nas Figuras 56 e 57, as Figuras 58 e 59 apresentam o diagrama de Nyquist correspondente as medidas experimentais e as medidas calculadas através do circuito elétrico equivalente encontrado (Fitting) para todas as idades de cura e tipos de concreto.

Na Figura 58 verificou-se a confiabilidade do modelo pelo ajuste das curvas.

Para a idade de cura de 3 dias o modelo proposto que possui melhor ajuste foi para o ciclo inicial, já para a idade de 28 dias o melhor ajuste foi para o ciclo final.

Na idade de cura de 7 dias para o CC , apresenta tanto para a idade inicial, quanto final o melhor ajuste para o circuito equivalente proposto.

Para o processo de construção da curva, optou-se por usar para as mesmas idades iniciais e finais a mesma modelagem com os mesmos parâmetros para observar os dados e em função dos dados observados analisar as relações entre as variáveis.

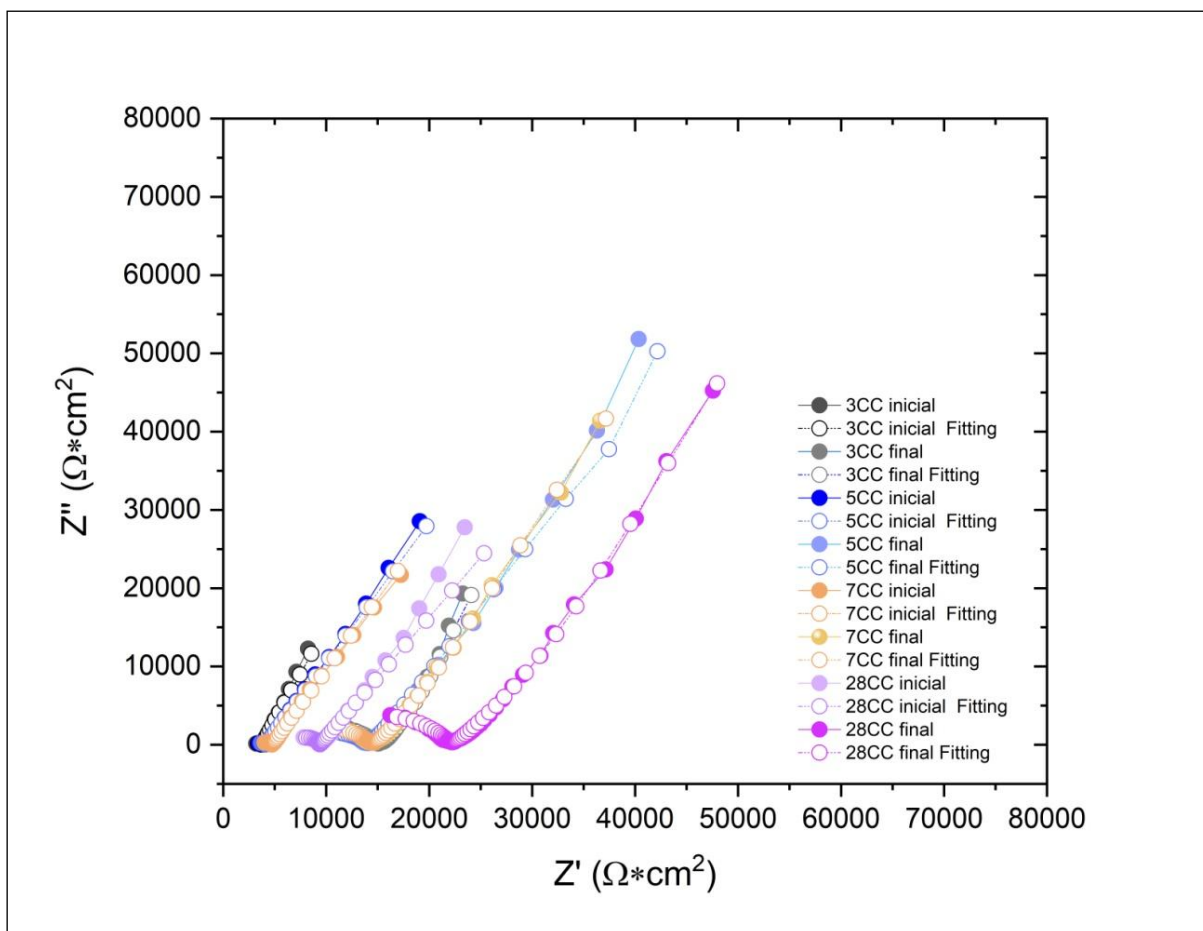


Figura 57– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto convencional para 3,5, 7 e 28 dias de cura no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem) e respectivo fitting

Para a modelagem do circuito equivalente determinado para cada período de tempo analisado (ciclo inicial e final), tipos de concreto e mesmas condições de exposição os dados experimentais e calculados possuíram um erro menor que erro menor de $\pm 5\%$.

Se compararmos os ciclos iniciais e finais (Figura 58) dos valores de Z' para as idades de cura e 3, 5 e 7 dias no CC verificou-se um aumento de sua resistividade de aproximadamente de 200%, enquanto que na idade de cura de 28 dias este aumento foi de 136%.

O aumento da resistividade se dá pelo processo de hidratação e pela entrada de íons cloreto que preenchem os vazios.

A Figura 59 mostra o diagrama de Nyquist correspondente as medidas experimentais e as medidas calculadas (Fitting) através do circuito elétrico para todas as idades de cura do CAA.

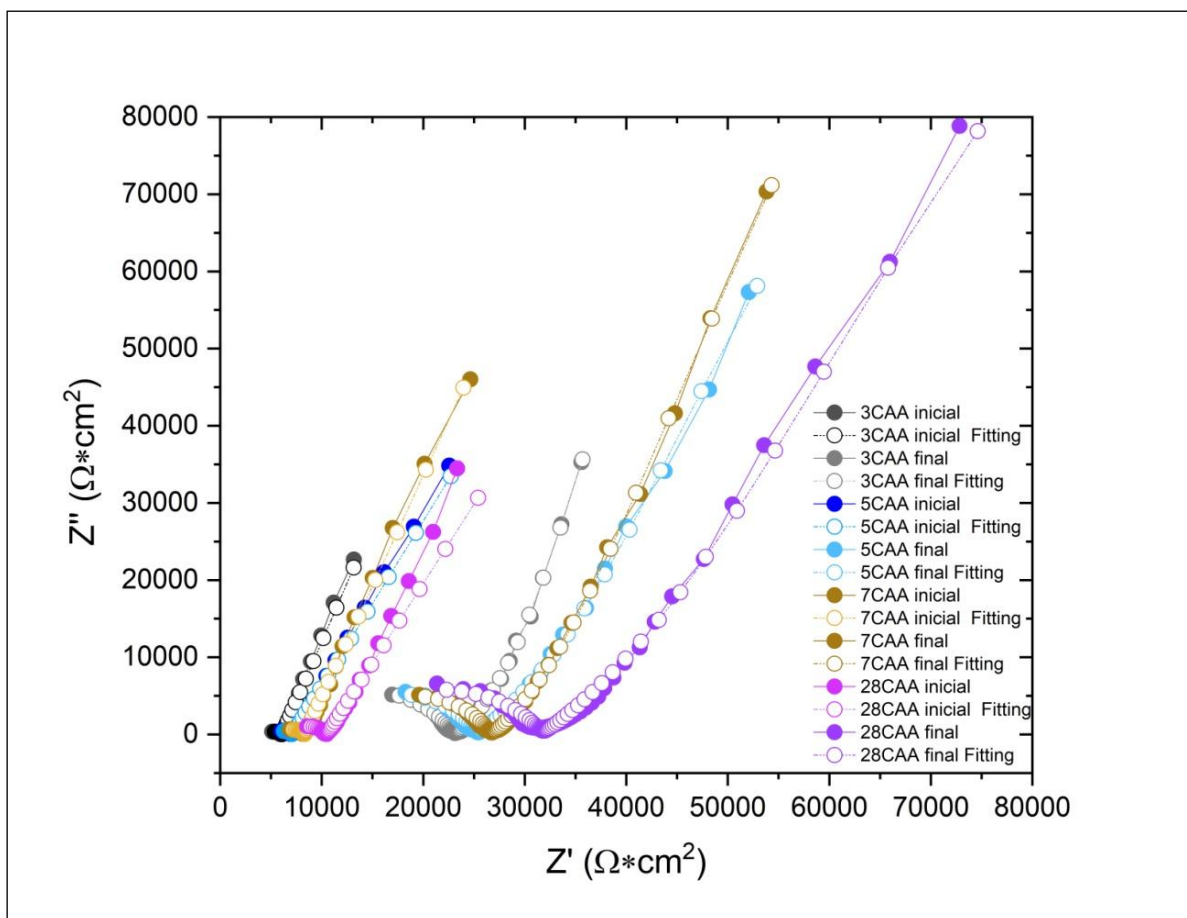


Figura 58– Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável para 3, 5, 7 e 28 dias de cura no primeiro ciclo e último ciclo (aproximadamente dois anos de processo de aceleração acelerado pelo ciclo de secagem e molhagem) e respectivo fitting

Se compararmos os dados experimentais e modelados das Figuras 58 (CC) e 59 (CAA), verifica-se que a impedância real (Z') e imaginária (Z'') para CAA para o modelo proposto foi ainda melhor ajustado que no CC. Isso se deve a sua maior homogeneidade quando comparado ao CC.

Na modelagem do circuito equivalente determinado para cada período de tempo estudado no CAA, o erro encontrado entre os valores experimentais e calculados foram menores que $\pm 5\%$. Sendo, novamente considerados confiáveis.

Para a Figura 59, se compararmos os ciclos iniciais e dos valores de Z' para as idades de cura de 3, 5 e 7 dias no CAA verificou-se um aumento de sua resistividade de 300% enquanto que na idade de cura de 28 dias este aumento foi de 200%. Como o aumento da resistividade se dá pelo processo de hidratação do concreto, verifica-se um material cimentício mais compacto e com menos vazios, quando comparado com o CC.

Na modelagem do circuito equivalente para os grupos amostrais garantindo a concordância dos dados teóricos (calculados) com os experimentais o teste estatístico do qui-dradrado (χ^2) foi aplicado.

Os dados experimentais de impedância ajustaram-se as equações obtidas pela simulação (circuito equivalente) apresentando uma concordância razoável com o valor qui-quadrado na ordem de 10^{-3} a 10^{-5} (DOTTO, 2006). Este parâmetro leva a conclusão que o circuito equivalente proposto, mesmo sendo representado de uma forma simplificada, verifica consistência nos dados. O teste estatístico do qui-dradrado (χ^2) é ideal para amostras não pareadas como no caso deste estudo.

A Tabela 18 apresenta os χ^2 dos circuitos equivalentes propostos e dos parâmetros apresentados na Tabela 19. O teste apresentado na Tabela 18 é utilizado para testar a qualidade do ajuste.

Tabela 18 – Valores do Qui-dradrado dos Circuitos Equivalentes Adotados das amostras para o Concreto Convencional (CC) e CAA (CA) para os ciclos Inicial e Final com os diferentes tempos de cura

Ciclo	Tipo	Tempo de cura (dias)	χ^2
Inicial (1 ciclo)	CC	3	0,014241
	CC	5	0,009411
	CC	7	0,009189
	CC	28	0,030129
	CA	3	0,016788
	CA	5	0,012689
	CA	7	0,014764
	CA	28	0,032243
Final (86 ciclos)	CC	3	0,010848
	CC	5	0,024768
	CC	7	0,007411
	CC	28	0,008988
	CA	3	0,007457
	CA	5	0,011869
	CA	7	0,006472
	CA	28	0,020768

Este método é um mecanismo computacionalmente eficiente de sistema linear que habilita aproximações de alta-ordem. Sua restrição é que o conjunto de pontos precisa ser regularmente espaçado permitindo um menor erro (GOIS, 2008).

Tabela 19 – Parâmetros do Circuito Equivalente para as amostras curadas aos 3, 5, 7 e 28 dias para o Concreto Convencional (CC) e CAA (CA) para os ciclos Inicial e Final.

Ciclo	Tipo	Idade de cura	R _s	R ₁	Y ₀₁ , n ₁	CPE ₁	R ₂	Y ₀₂ , n ₂	CPE ₂	Warburg
			kΩ.cm ²	kΩ.cm ²	μMho	F.cm ⁻²	kΩ.cm ²	μMho	F.cm ⁻²	μMho
Inicial	CC	3	3,10	0,66	1,41E-01 0,62	4,77E-10	1,10E+09	190,00 0,75	1,13E-01	-
Final	CC	3	6,72	8,30	9,52E-03 0,59	1,34E-11	1,66E+02	292,00 1,10	2,05E-04	1,41E-04
Inicial	CC	5	3,32	0,78	6,68E-02 0,65	3,30E-10	1,10E+09	68,30 0,67	5,17E-01	-
Final	CC	5	6,30	7,86	3,45E-02 0,5	9,36E-12	5,27E+02	58,80 0,80	1,39E-04	8,88E-05
Inicial	CC	7	3,70	1,04	3,07E-02 0,67	1,87E-10	1,00E+09	86,60 0,68	4,71E-01	-
Final	CC	7	1,76	12,80	1,15E-02 0,51	2,39E-12	4,59E+02	99,50 0,93	1,33E-04	7,74E-05
Inicial	CC	28	6,89	2,50	2,29E-03 0,79	9,26E-11	1,10E+09	71,20 0,63	3,08E+00	-
Final	CC	28	8,02	14,20	3,85E-03 0,62	9,40E-12	5,07E+02	126,00 1,05	1,03E-04	5,20E-05
Inicial	CA	3	4,65	1,44	1,10E-01 0,57	1,49E-10	1,10E+09	111,00 0,80	1,17E-02	-
Final	CA	3	3,93	19,17	6,00E-04 0,7	4,59E-12	7,38E+02	141,85 1,05	1,14E-04	9,70E-05
Inicial	CA	5	5,45	1,65	5,29E-02 0,61	1,34E-10	1,10E+09	62,50 0,72	6,51E-02	-
Final	CA	5	8,53	16,80	7,11E-04 0,72	8,66E-12	5,04E+02	89,90 1,07	7,01E-05	4,89E-05
Inicial	CA	7	6,16	2,10	1,58E-02 0,68	1,23E-10	1,10E+09	52,20 0,79	6,03E-03	-
Final	CA	7	6,72	20,00	1,19E-03 0,66	4,94E-12	1,03E+03	58,90 0,98	6,40E-05	5,83E-05
Inicial	CA	28	7,22	3,26	6,10E-03 0,7	5,90E-11	1,10E+09	66,85 0,72	7,66E-02	-
Final	CA	28	11,60	20,10	1,75E-03 0,66	8,89E-12	4,96E+02	68,50 1,10	4,97E-05	3,20E-05

A Tabela 19 apresenta os parâmetros do circuito equivalente do modelo proposto nas Figuras 55 (Modelo proposto para o ciclo inicial) e 56 (Modelo proposto para o Ciclo Final)

Na modelagem do dimensionamento dos controladores das correntes de saída do sistema, considera-se no circuito equivalente, a função de transferência usando o parâmetro de admitância (Y), que são obtidos a partir da matriz inversa dos parâmetros de impedância. Os parâmetros do circuito equivalente são a resistência (R), a admitância (Y_0), o elemento de fase constante (CPE) para amostras do concreto convencional (CC) e CAA (CA) para todas as idades de cura considerando o ciclo inicial e final. O elemento de fase constante CPE_1 e CPE_2 , novamente estão representando a capacitância no concreto e aço, respectivamente.

Para melhor compreensão dos dados do EIE, o monitoramento dos parâmetros dos circuitos equivalentes demonstram na variação da resistência elétrica e na capacitância (CPE) os mecanismos do processo eletroquímicos. Analisando a resistência elétrica (R_1) e a capacitância (CPE_1) do concreto obtida do semicírculo na região de alta frequência, verifica-se um aumento da resistividade do material e o bloqueio dos poros através do processo de hidratação e penetração dos íons Cl^- .

Ao compararmos nos dois concretos a resistência R_p (Figura 58 e 59) na idade inicial, para a idade de cura de 3, 5 e 7 dias o aumento foi de aproximadamente 61,9%, 73% e 73,8% respectivamente. Aos 28 dias de cura esse valor de resistência elétrica comparando os dados de CC e CAA aumentou aproximadamente 11%.

Agora comparando para os dois concretos a resistência R_1 (Tabela 19) nas idades iniciais, para a idade de cura de 3, 5 e 7 dias para CC e CAA os valores de aumentam passam para 118%, 111% e 101%, respectivamente. Para a idade de 28 dias o aumento foi em torno de 30% comparando R_1 para CC e CAA na idade inicial.

Logo, verifica-se que para a análise da magnitude, em termos de valores absolutos nos circuitos equivalente proposto há um aumento da resistência do concreto significativa nas primeiras idades de cura e menor na última idade (28 dias).

Nas idades finais (86 ciclos), se comparados CC e CAA (Figura 58 e 59), para as idades de 3, 5 e 7 dias o aumento foi de aproximadamente 68%, 98% e 84% respectivamente. Aos 28 dias de cura esse valor de resistência elétrica aumentou aproximadamente 41%.

Comparando a resistência do concreto (R_1) nas idades finais (Tabela 19), para a idade de cura de 3, 5 e 7 dias para CC e CAA os valores de aumentam passam para 130%, 116% e 56%, respectivamente. Para a idade de 28 dias o aumento foi em torno de 41% comparando R_1 para CC e CAA na idade final.

Verificando-se que para o CAA o aumento da resistência foi superior se comparado ao CC provavelmente devido aos processos de cura da matriz cimentícia e alterações das propriedades elétricas do material pela sua superior estabilidade eletroquímica, resultando no aumento da resistência elétrica. Os resultados são corroborados com os resultados de Bragança (2014).

O elemento de fase CPE das Figuras 55 e 56 representam uma capacitância que leva em consideração o comportamento não ideal do sistema concreto/aço. O valor do n do circuito representa dependendo do seu valor, uma capacitância pura ($n=1$), um resistor ($n=0$) ou um processo difuso ($n=0,5$) (HERNÁNDEZ et al., 2019).

Na Tabela 19, verificou-se nos resultados de n_1 e n_2 verificou-se elementos capacitivos ou com difusão. Para o cálculo da capacitância em função dos resultados encontrados nos dados eletroquímicos (EIE) na Tabela 19 foi utilizado a equação de capacitância dada pelas equações 37 e 38 (SOHAIL, 2020):

$$Z_{CPE} = \frac{1}{[Q(j\omega)^n]} \quad (37)$$

$$C = Q^{1/n} R^{1-n/n} \quad (38)$$

Os resultados da Tabela 19 apontam diminuições da capacitância como resultado da transferência da carga ao longo das idades, indicando que o aumento da resistência específica do concreto pode ser controlado pelo processo de transferência de carga, como explicado por HERNÁNDEZ et al. (2019).

O intervalo de grandeza da medida da capacitância do concreto é da ordem de pF ou nF (HERNÁNDEZ et al., 2019; TIITTA E OLKKONEN, 2002).

Analisando os valores do CPE calculados na Tabela 20, verifica-se no grupo amostral de CC e CAA nas diferentes idades de cura que o processo de cura promove uma redução no valor da capacitância (CPE_1) no concreto e um aumento da resistência do poro (R_s). A amplitude do semicírculo das amostras menores nas idades iniciais e sendo gradativamente aumentada (R_1) sugere uma resistência maior na difusão dos íons cloreto através de um refinamento da estrutura do

concreto (idades finais de exposição). Em contrapartida o processo de secagem e molhagem ao longo dos ciclos, promove uma maior presença de íons, fluxo de íons maior nos ciclos finais. Nos resultados dos parâmetros do circuito proposto este comportamento é visto pela diminuição do R_2 (Tabela 19). A redução de R_2 é maior em CAA do que em CC.

O parâmetro CPE_2 (aço) há uma redução expressiva no início e ciclo final (86 ciclos) nos resultados apresentados na Tabela 19 em relação a todas as idades de cura e tipo de concreto.

Comparando os valores de CPE_2 nos ciclos finais para a mesma idade de cura para os tipos de concreto (CC e CAA) na Tabela 19 houve uma diminuição da capacitância (CPE_2) de aproximadamente 50% em relação ao CAA. Isto indica que o CAA possui menor armazenamento de cargas, ou seja, de íons cloreto.

O aumento do valor do CPE_1 no CC em relação ao CAA indica o aumento da difusão do cloreto livre na parte do concreto. O CPE_1 é relacionado a capacitância da dupla camada eletroquímica criando um capacitor ideal ($n=1$) devido ao aumento da distribuição dielétrica e devido ao maior teor de cloreto no material (WANG et al., 2020). Sabe-se que quanto maior teor de cloreto maior a probabilidade de corrosão do aço e redução da durabilidade do material.

O elemento de Warburg que representa a difusão de íons aparece nas idades finais do ciclo (KIM et al., 2020). Os valores encontrados para a impedância de Warburg indicam para o CAA uma maior dificuldade de difusão de íons, sendo que comparando os resultados de 3 dias para 28 dias de cura o aumento foi de 63% para o CC e de 67% para CAA.

A penetração dos íons cloreto na argamassa ao longo do processo dos ciclos é controlada pela etapa de transferência de massa. A transferência de massa nas regiões de baixas frequências nos diagramas de Nyquist podem ser verificadas com o aumento do segundo processo nas curvas (Figura 47 a 54), e confirmadas com a presença do elemento impedância de Warburg no circuito equivalente proposto (Tabela 19).

O elemento de impedância Warburg é menor para o CAA em relação ao CC se compararmos a mesma idade de cura das amostras. Logo menor processo difusional.

O elemento de Warburg que é a presença do controle difusional e a resistência de carga entre os elementos e materiais cimentícios revela a

profundidade de migração dos íons cloreto através do método EIE como reforça o trabalho de Dong et al. (2019). Neste estudo verificou-se que o Warburg é reduzido com o aumento da idade de cura para o mesmo tipo de concreto.

5.2.2 Análise do comportamento eletroquímico – Diagrama de Bode

Devido ao grande número de amostras estudadas (acima de 700 espectros), não é possível apresentar todos os resultados individualmente no corpo do texto. Portanto, analisaram-se a impedância através das alterações nas curvas de Bode para Inicial, 10, 26, 46, 78 e 86 ciclos.

Os ciclos foram escolhidos devido às mudanças mais expressivas nas curvas geradas durante o processo acelerado de molhagem e secagem e que descrevem as condições mais representativas do estudo.

As Figuras 60 a 75 representam o diagrama de Bode para as amostras estudadas nas diferentes idades de cura para CC e CAA. O diagrama de Bode representa os valores medidos do EIE plotados com a impedância total ($|Z|$) e ângulo de fase pela frequência.

A evolução da resistência do concreto ($\log(|Z|)$) com o aumento do tempo de imersão e emersão dos ciclos também podem ser verificados nos diagramas de Bode das Figuras 60 a 75.

As Figuras 60 e 61 mostram o diagrama de Bode para a idade de cura de 3 dias para o CC e CAA (CA), respectivamente. Nelas encontramos três regiões distintas em função do comportamento com a frequência para CC e CAA: região de altas, baixas e frequências intermediárias.

As regiões extremas da curva (Figura 60 e 61) à esquerda e a direita do diagrama de Bode, representam as resistências da matriz do concreto e da interface pasta/aço. Comparando os dois tipos de concreto (3CC e 3CA) verifica-se o mesmo comportamento dos materiais, mas valores absolutos do módulo da impedância distintos.

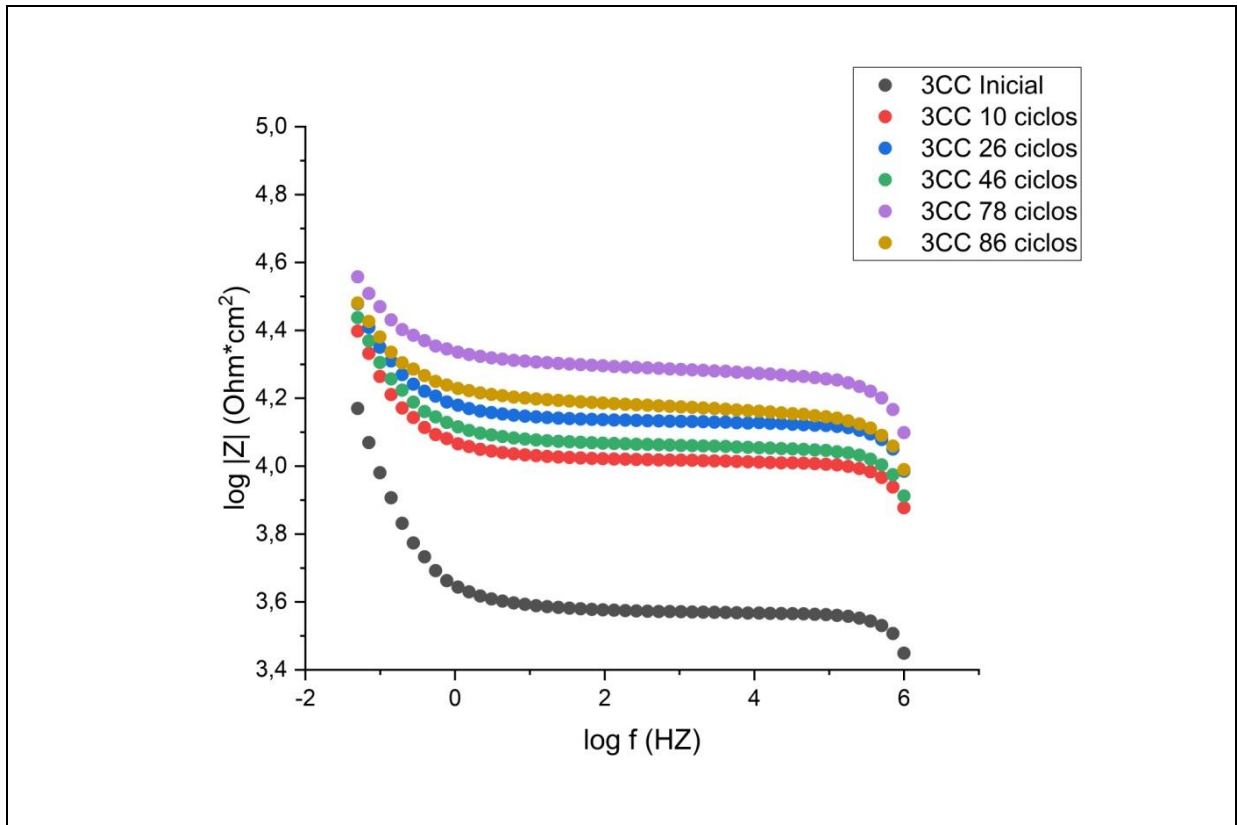


Figura 59– Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 3 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

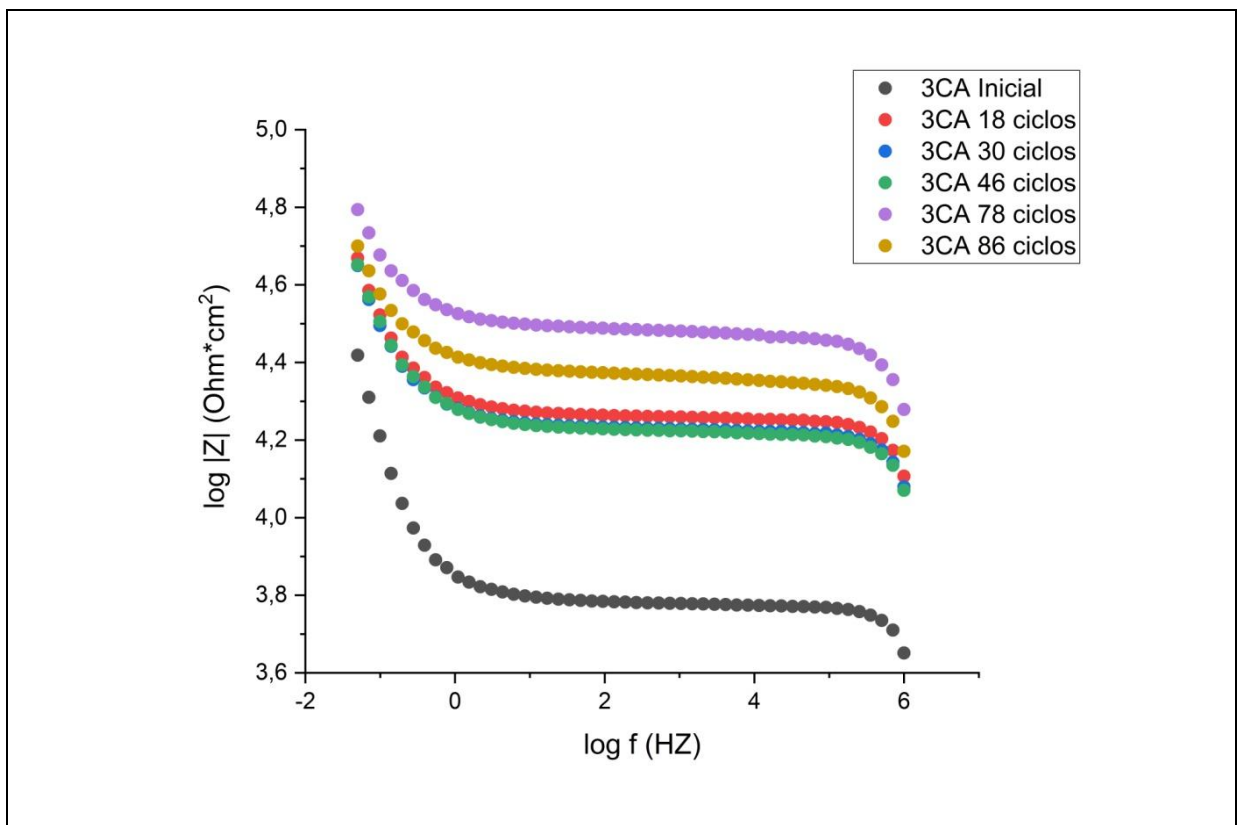


Figura 60– Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 3 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

A região entre os extremos das duas primeiras regiões das Figuras 60 e 61 é caracterizada por um grande plateau resistivo que representa o valor da resistência elétrica do concreto (R_1). Este plateau é uma característica deste sistema e aparece em todos os sistemas analisados (DOTTO, 2006; JIANG et al., 2017; SHEN, 2019; KIM et al., 2020).

Comparando os dois tipos de concreto, verifica-se que a impedância do CAA é superior ao do CC. Verifica-se que o módulo de impedância ($|Z|$) aumenta com o tempo de cura (Figura 60 e 61) até 78 ciclos, que nos 86 ciclos é reduzido devido ao processo de degradação do material e tempo de exposição aos ciclos.

Este comportamento é conferido em ambos os concretos (CC e CAA) que ao atingirem o valor máximo praticamente nas mesmas idades de exposição (78 ciclos) para os 3 dias de cura há uma redução na impedância (86 ciclos).

Este decaimento é decorrente da deterioração ocorrida no concreto, devido à reação dos hidratos com os íons cloreto e a penetração dos mesmos com microfissuração da matriz cimentícia (Bragança, 2014).

As Figuras 62 e 63 mostram o segundo tipo de diagrama de Bode: o ângulo de fase (Θ) em relação a frequência para o CC e CAA, com 3 dias de cura respectivamente.

Vê-se então, comparando as Figuras 60, 61, 62 e 63 que as amostras dos dois tipos de concretos apresentam duas inclinações indicando as constantes de tempo. A primeira constante representa o processo de transferência de carga nas frequências para as regiões de alta frequência (acima de 10^4 Hz) e a segunda constante de tempo para regiões de baixas frequências (abaixo de 10^1 Hz) representa o processo de transferência de massa.

A análise da curva do ângulo de fase para o CC (Figura 62) em relação às idades avançadas de exposição (78 ciclos) revelou um aumento da tendência ao comportamento resistivo devido à evolução deste parâmetro de 5° (inicial) para 20° (86 ciclos) o que reflete a formação de um filme passivo na barra do corpo de prova (região a direita do diagrama).

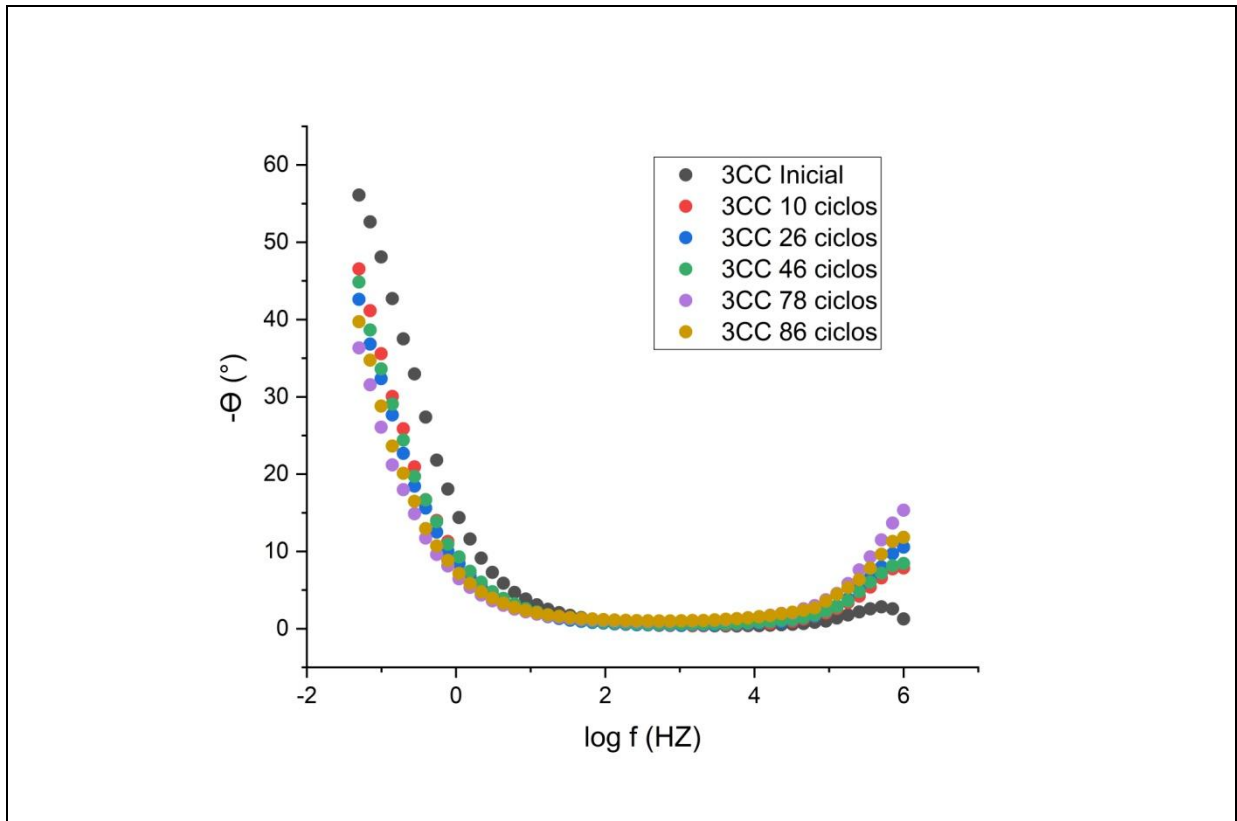


Figura 61 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 3 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

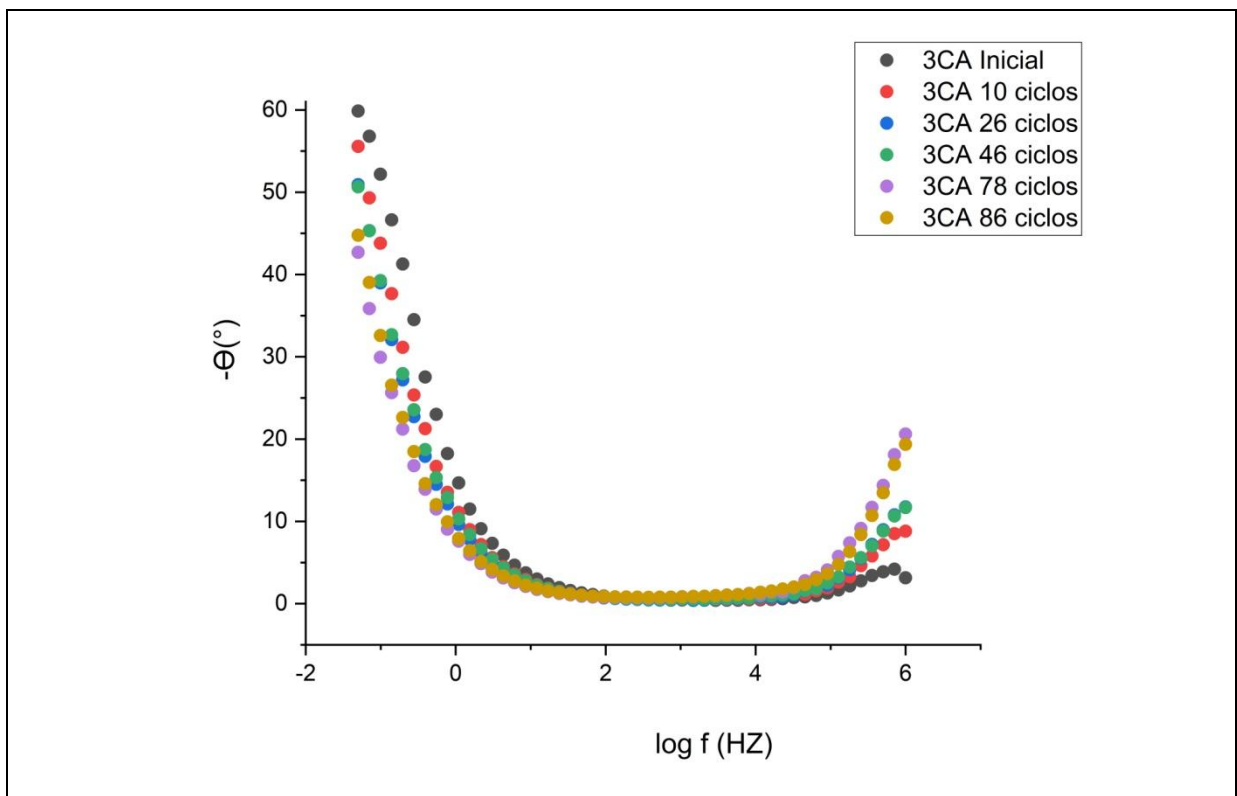


Figura 62 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 3 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

Sabe-se que quando uma corrente elétrica passa pelo elemento do circuito proposto para os diagramas de impedância onde o ângulo de fase fica 0° , este elemento é um resistor puro e quando o valor é de 90° é um capacitor puro.

Para o CC em relação às idades avançadas de exposição (78 ciclos) revela-se um aumento da tendência ao comportamento menos capacitivo com redução do ângulo de fase se aproximando a ordem de 45° (Figura 62) (região de baixas frequências no diagrama) refletindo a degradação da pasta de cimento devido à presença dos íons de Cl^- .

As alterações das constantes de tempo (Figuras 60, 61, 62 e 63) permitiram comprovar a deterioração incipiente do sistema eletroquímico pela exposição à íons cloreto verificando a tendência ao comportamento resistivo do material. Isto é decorrente do início da dissolução do óxido passivo da armadura e do comportamento inicial da corrosão nos poros e vazios da interface com a pasta, comportamento discutido no trabalho de Bragança (2014).

A partir do diagrama de Bode uma reta tangente na parte superior da curva é traçada e a partir do seu ponto inicial tem-se o logaritmo da resistência, o qual fornece o valor de resistividade (GUZATTO, 2014), ficando evidente a redução da resistividade nos últimos ciclos (Figura 60 e 61).

A inclinação da curva $\log |Z| \times \log f$ na posição do ângulo de fase máximo, variando entre 55° e 35° para CC (Figura 62) e 60° para 45° para CAA (Figura 66), indica modificação na matriz cimentícia e o processo difusional (SHEN, 2019).

Nas Figuras 62 e 63 a posição do ângulo de fase máximo é encontrada na idade inicial e após 78 ciclos. Verifica-se uma redução no comportamento capacitivo da dupla camada barra/matriz, evidenciando o aumento da resistência da interface entre a pasta de cimento e o filme passivo da armadura (Figuras 62 e 63).

Na região de baixas frequências ($<10^{-1}$ Hz) verifica-se o aumento da resistência à transferência de carga para o concreto CAA se comparado com o CC, com uma tendência ao comportamento resistivo para CAA, característico desta faixa de frequência.

O aumento do ângulo Θ das curvas no diagrama de Bode, na região de altas frequências (Figura 63) indica uma difusão semi-infinita de espécies como íons de cloreto através da camada de óxido em direção ao eletrodo, juntamente com as reações de transferência (ROSS, 2005).

Comparando os dois tipos de concreto verifica que o ângulo de fase do CAA é bem superior que o CC e que a redução da capacitância no concreto auto adensável é menor (Figura 62 e 63). O concreto é de natureza alcalina com uma solução de poros de pH de 12 a 13, que naturalmente passiva as barras de reforço incorporadas sabe-se que esta passivação do aço é decomposta pela presença de íons cloreto ou por uma redução na alcalinidade do concreto causada pela carbonatação. Como o estudo do processo de carbonatação não é tão expressivo devido às amostras estarem em ambientes controlados, o filme passivado é rompido e o processo de corrosão é iniciado na presença de íons cloreto (ZHOU et al., 2015).

Sabe-se que o filme de óxido passivado foi dissolvido por íons cloreto que migraram continuamente da solução devido à presença de altas concentrações de íons (MAO et al., 2018). Esse comportamento é verificado em ambos os concreto CC e CAA, partir do tempo de exposição de 78 ciclos, como mostra nas Figuras 62 e 63 com novamente um aumento no ângulo Θ (região altas frequências) .

As Figuras 64 e 65 mostram os diagramas de Bode módulo de impedância em função da frequência e o ângulo de fase (Θ) em função da frequência para 5 dias de cura idades do grupo amostral CC.

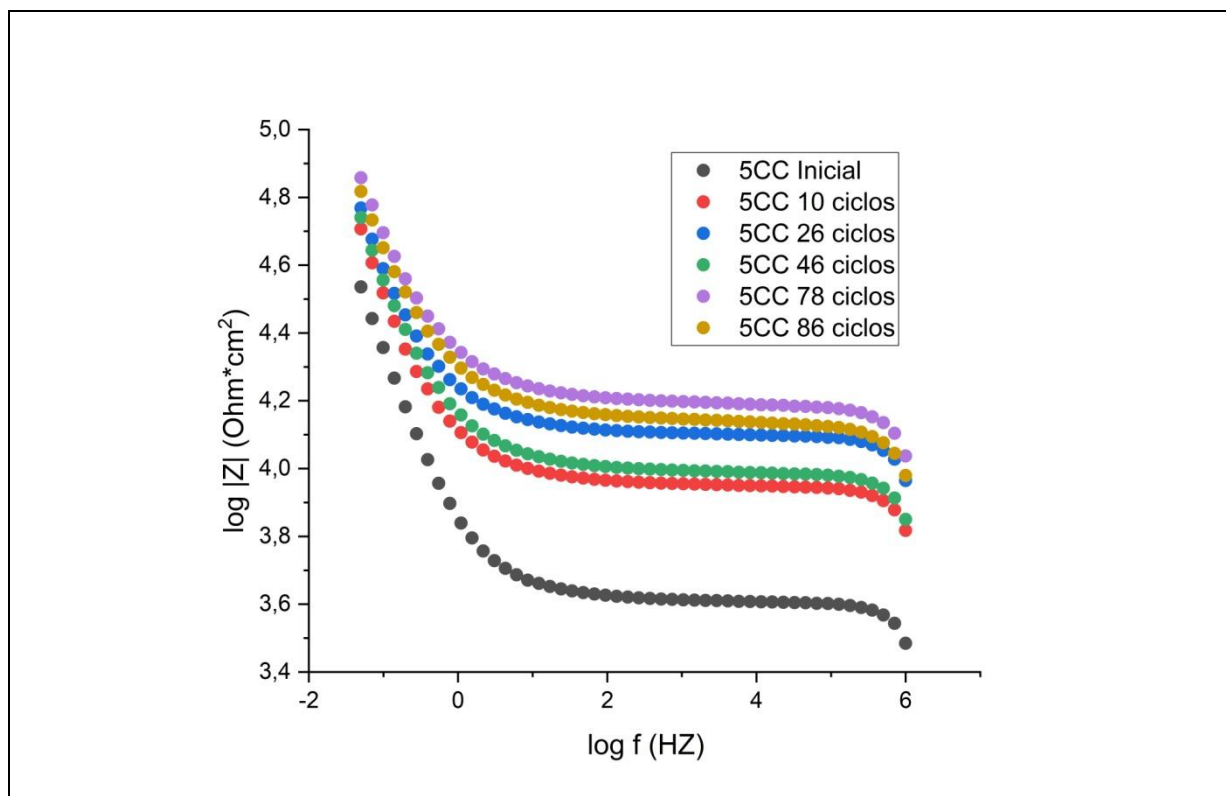


Figura 63 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 5 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

Verifica-se as constantes de tempo com os diferentes comportamentos em função da frequência representando os processos de transferência de carga nas frequências para as regiões de alta frequência (acima de 10^4 Hz) e o processo de transferência de massa para regiões de baixas frequências (abaixo de 10^1 Hz).

As principais diferenças entre a Figura 60 e a Figura 64 são os valores da impedância. O tempo de cura de 2 dias a mais gera uma modificação nas curvas de Bode com o tempo, representando que uma pequena cura promove uma variação na impedância e resposta do material.

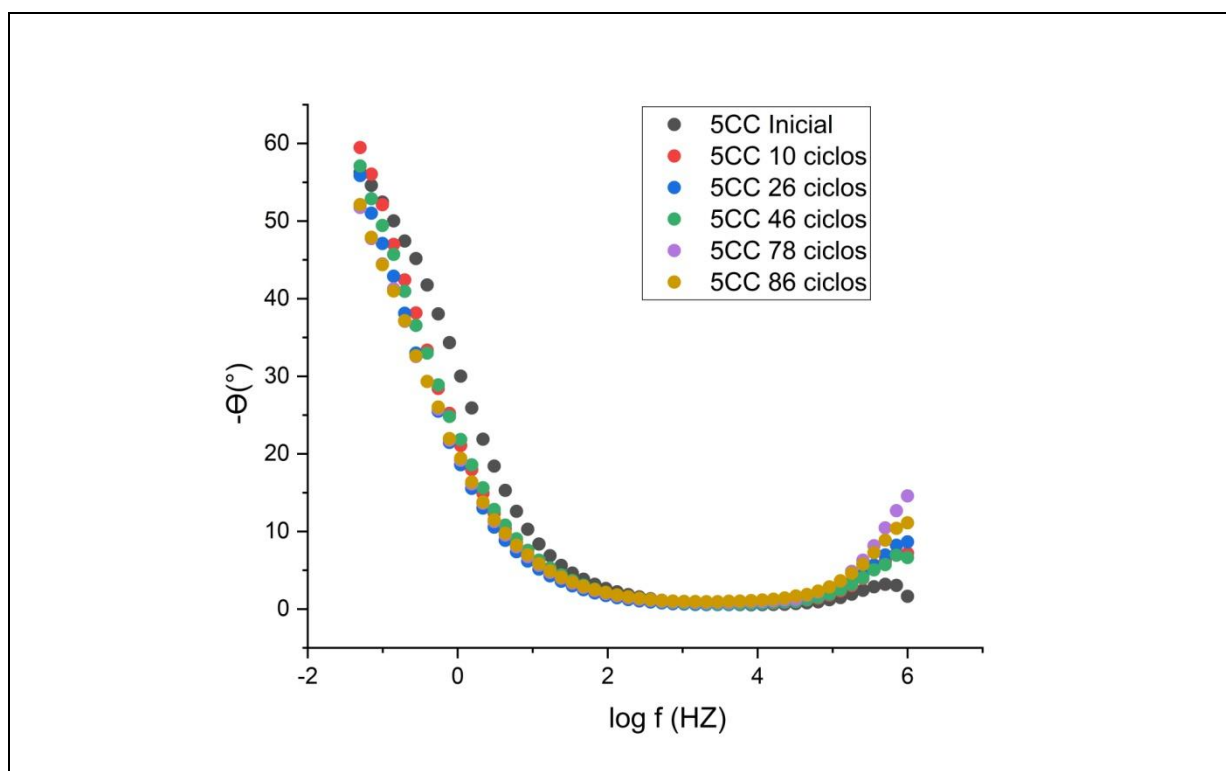


Figura 64– Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 5 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

Verifica-se na região da matriz do concreto uma grande variação na curva que não se apresenta na interface pasta/aço e na região do grande plateau resistivo, correspondente ao valor da resistência elétrica do concreto (R_c).

Nas Figuras 62 e 65 as maiores alterações se dão na posição do ângulo de fase máximo e é encontrada na idade inicial e após 78 ciclos. Há, novamente, a redução do comportamento capacitivo da dupla camada barra/matriz evidenciando o aumento da resistência da interface entre a pasta de cimento e o filme passivo da armadura.

As Figuras 66 a 69 mostram os diagramas de Bode módulo de impedância em função da frequência e o ângulo de fase (Θ) em função da frequência para 7 e 28 dias de idade de cura do grupo amostral CC.

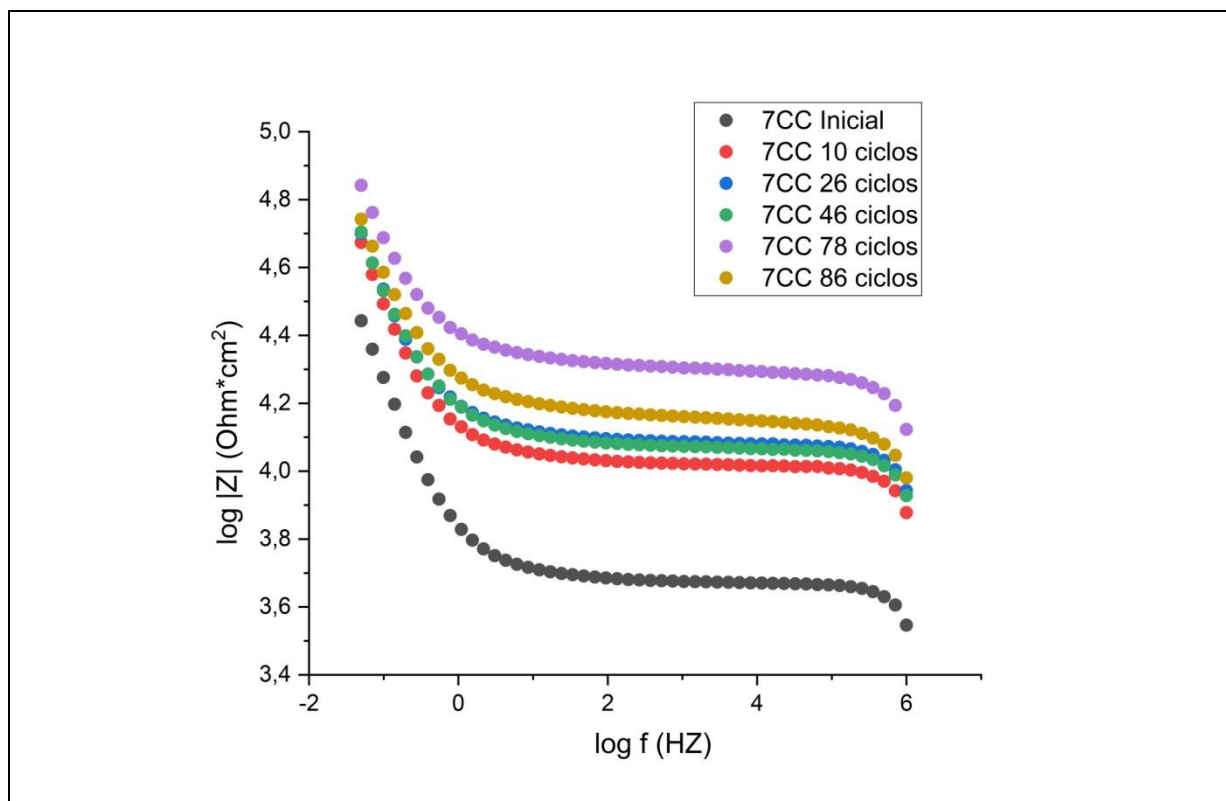


Figura 65 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 7 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

O comportamento dos diagramas de Bode para a idade de cura de 7 dias nos CC com a região de transferência de carga e transferência de massa é semelhante alterando principalmente em uma das constantes de tempo (aumento do módulo da impedância gradual até 78 ciclo e redução nos 86 ciclos).

Isso, novamente, evidencia a alteração da microestrutura devido ao processo de hidratação do concreto CC e degradação do mesmo.

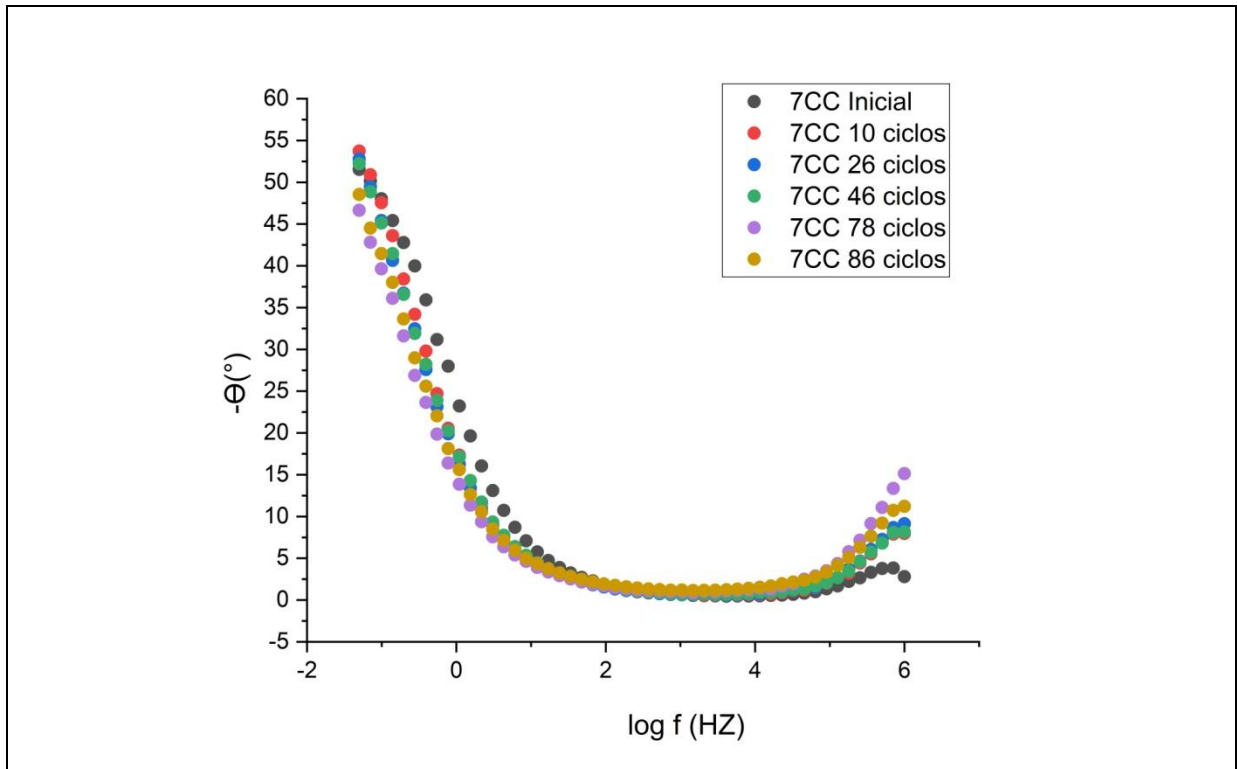


Figura 66 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 7 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

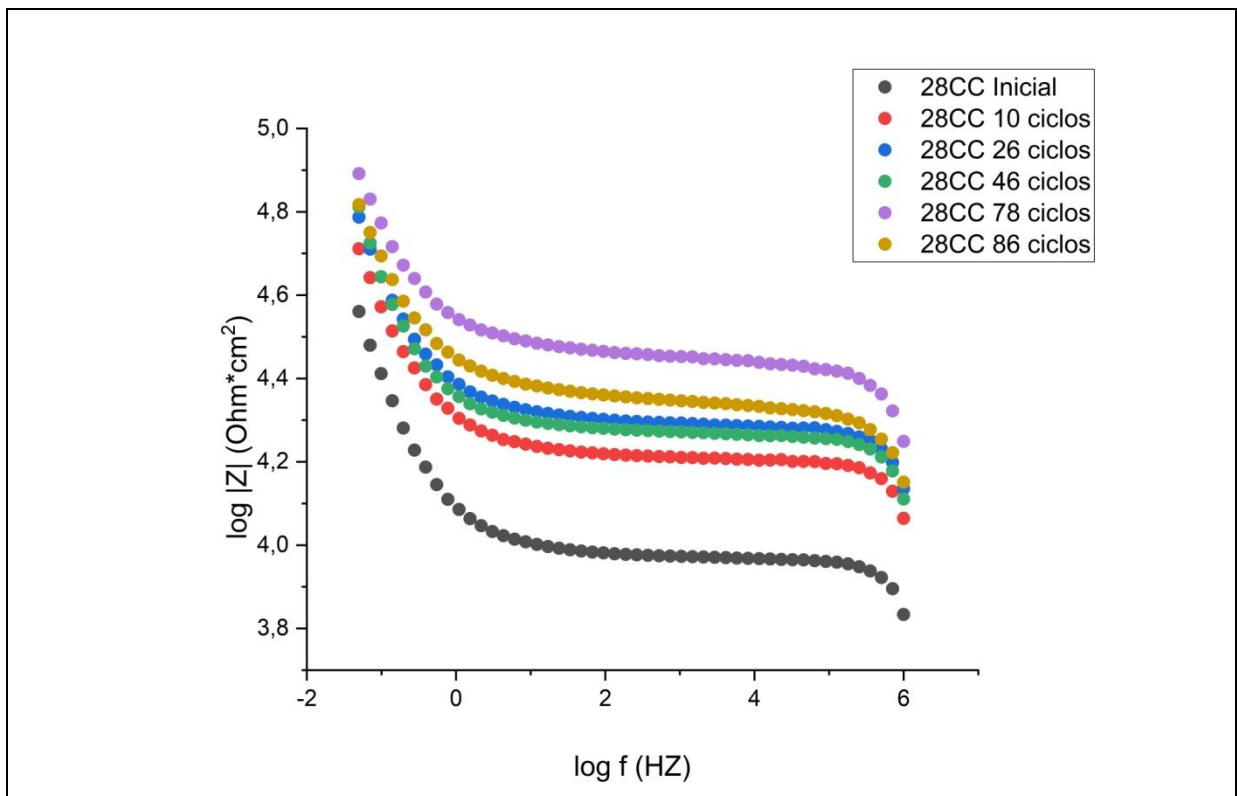


Figura 67– Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 28 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

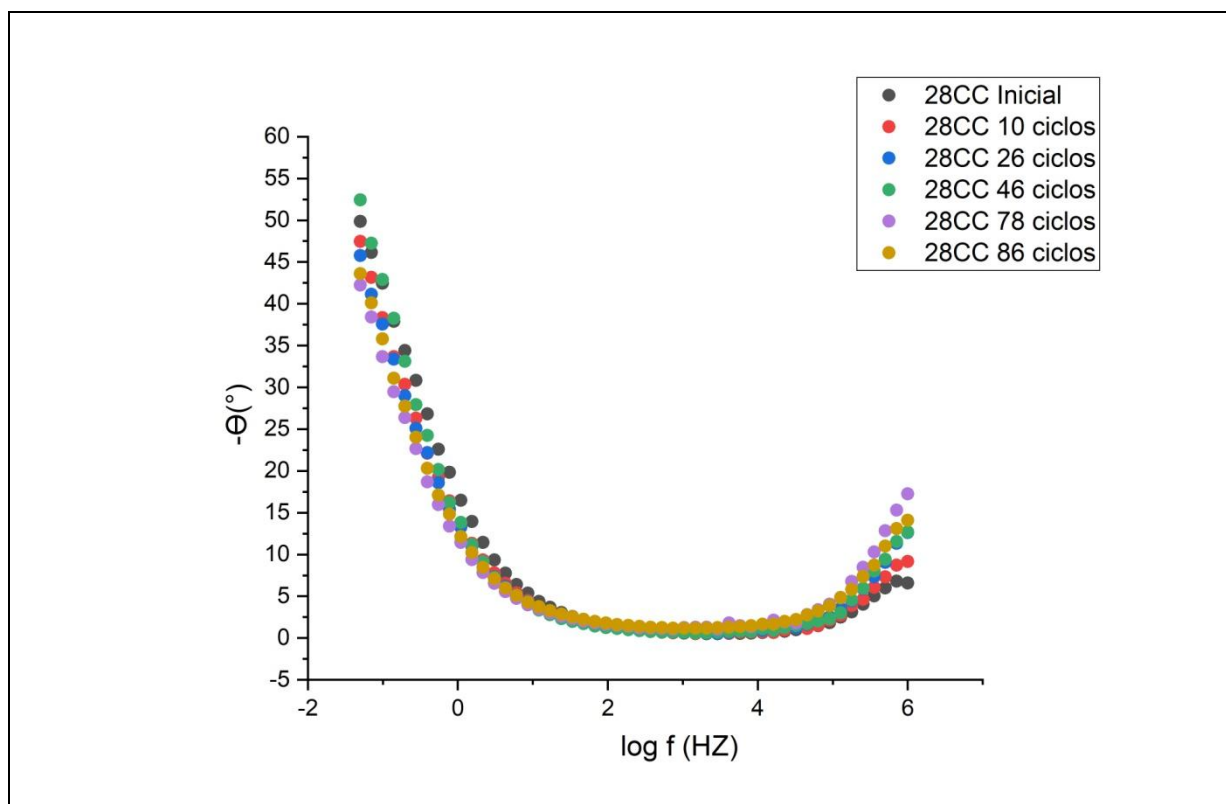


Figura 68– Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto convencional curado aos 28 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

A alteração desta estrutura também está correlacionada ao transporte de íons cloreto pelo processo de difusão (HE e SHI, 2008). O comportamento é semelhante nas outras idades com maiores $\log|Z|$ e menor porosidade (CC) com o aumento da idade de cura. Pelos comportamentos das curvas diagramas de Bode, nas diferentes idades no CC a situação de passividade das barras de aço foi comprovada pelos altos valores de módulo de impedância e altos valores do ângulo de fase máximo.

A resistividade elétrica é uma medida e indicação da conectividade porosa e está relacionada com a penetração de íons.

Na Figura 69, com idade de cura de 28 dias para CC o diagrama de Bode indica que com a idade de cura maior há diminuição no comportamento resistivos do material (ângulo de fase mais próximo de 0°) e aumento no comportamento capacitivo (ângulo de fase mais próximo de 90°) nas faixas de frequência se comparado com as outras idades de cura (3, 5 e 7 dias).

Esta tendência indica um retardo nas reações dos cloretos com as fases do cimento e sua penetração que com a idade de cura apresentou um retardo nas penetrações (ANDRADE, 2014).

As Figuras 70 a 75 mostram os diagramas de Bode módulo de impedância em função da frequência e o ângulo de fase (Θ) em função da frequência para as outras idades de curas dos grupos amostrais para o CAA (CA).

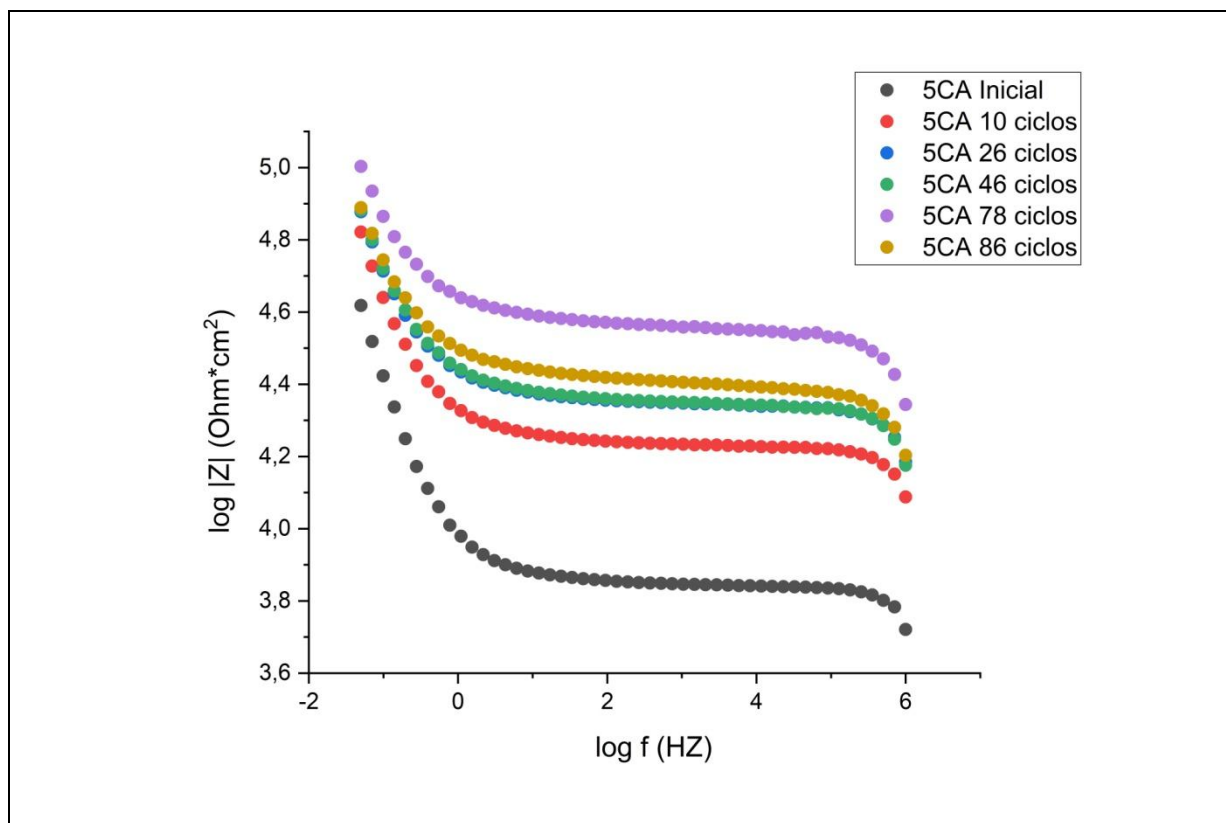


Figura 69 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 5 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

Os resultados dos testes de resistividade elétrica para CAA curados aos 28 dias no estudo de Singh e Singh (2016) indicam que para misturas do concreto auto adensável o tipos de agregados e a resistividade do material têm forte dependência das naturezas e a qualidade dos agregados, pois afeta o grau de saturação de poros do concreto com maiores riscos para a corrosão.

Como nos resultados os agregados foram utilizados os mesmos, a comparação do CC e CAA indicou que o CAA possui alta resistividade em relação ao CC (Figuras 74 e 68). Logo no CC há um movimento de íons fica mais rápido (processo de difusão) sendo reafirmado nos diagramas de Bode Figuras 75 e 69.

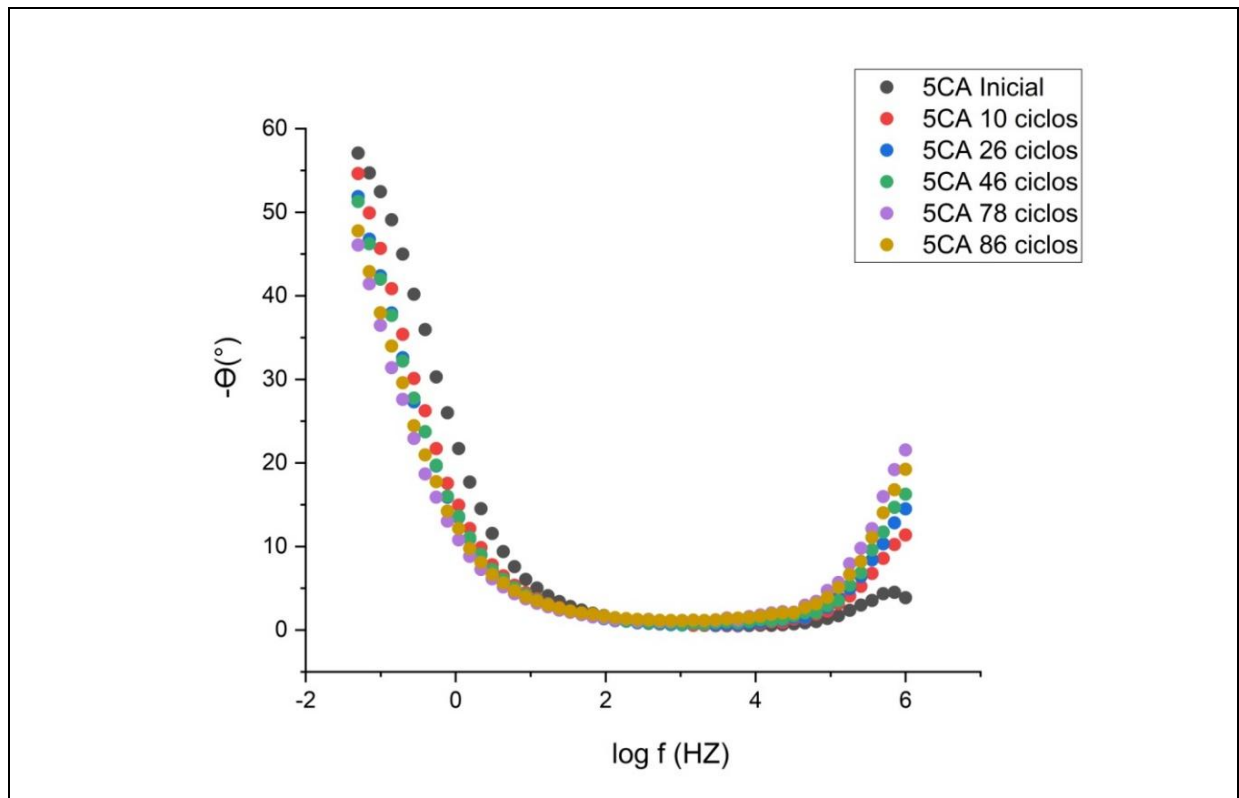


Figura 70 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 5 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

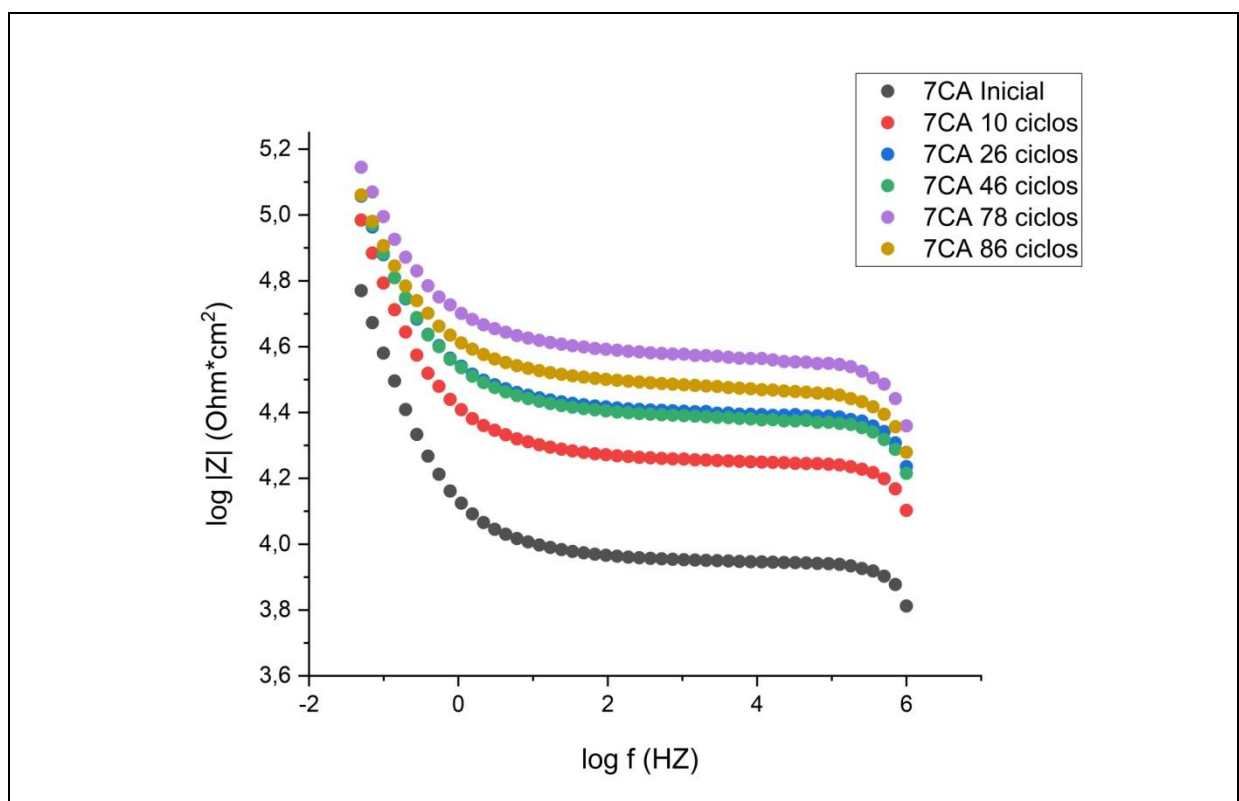


Figura 71 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 7 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

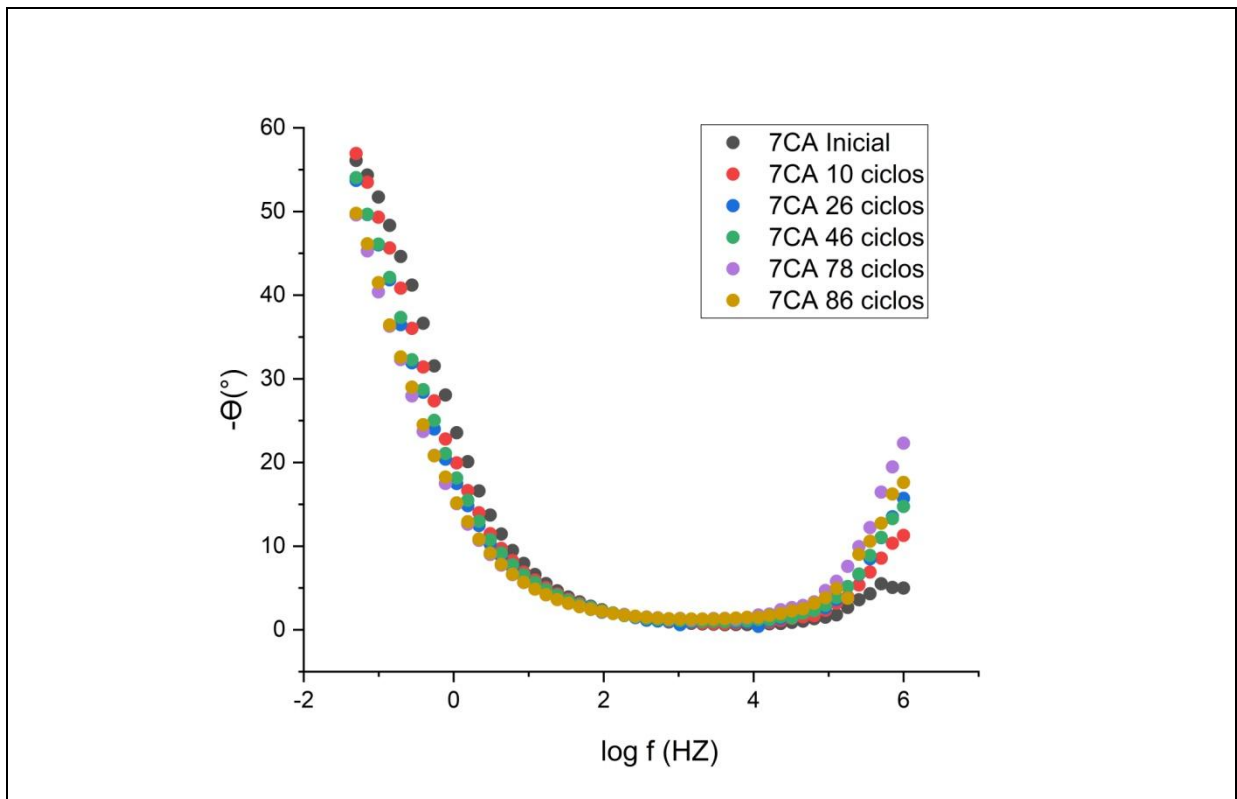


Figura 72 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 7 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

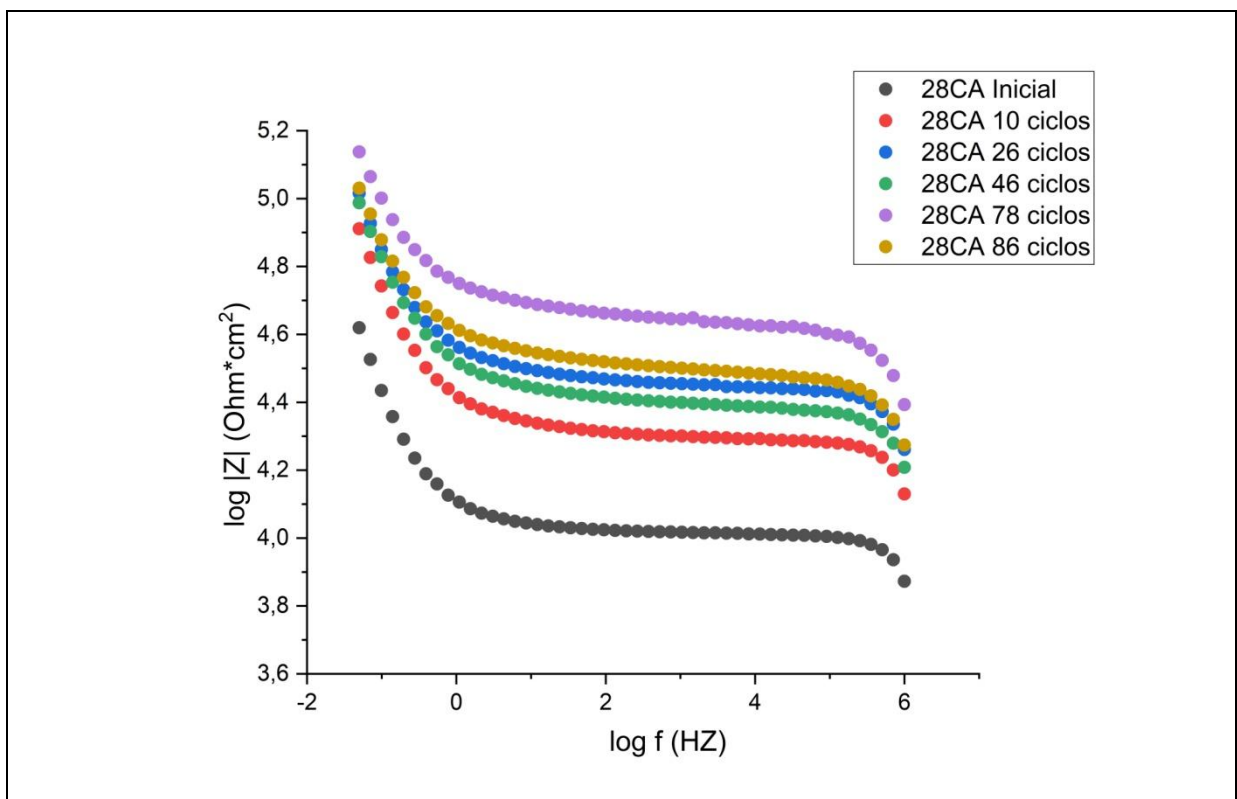


Figura 73 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 28 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

A razão é a presença de micro e macro poros no CC em relação ao CAA nos quais o movimento de íons fica mais rápido (JIANG et al., 2019). Além disso, há presença de maior teor de umidade.

Para o CAA as Figuras 63, 70 a 75 indicaram que o CAA possui menor redução no seu comportamento resistivo (transferência de massa) e maior comportamento capacitivo (transferência de carga) se comparado ao CC.

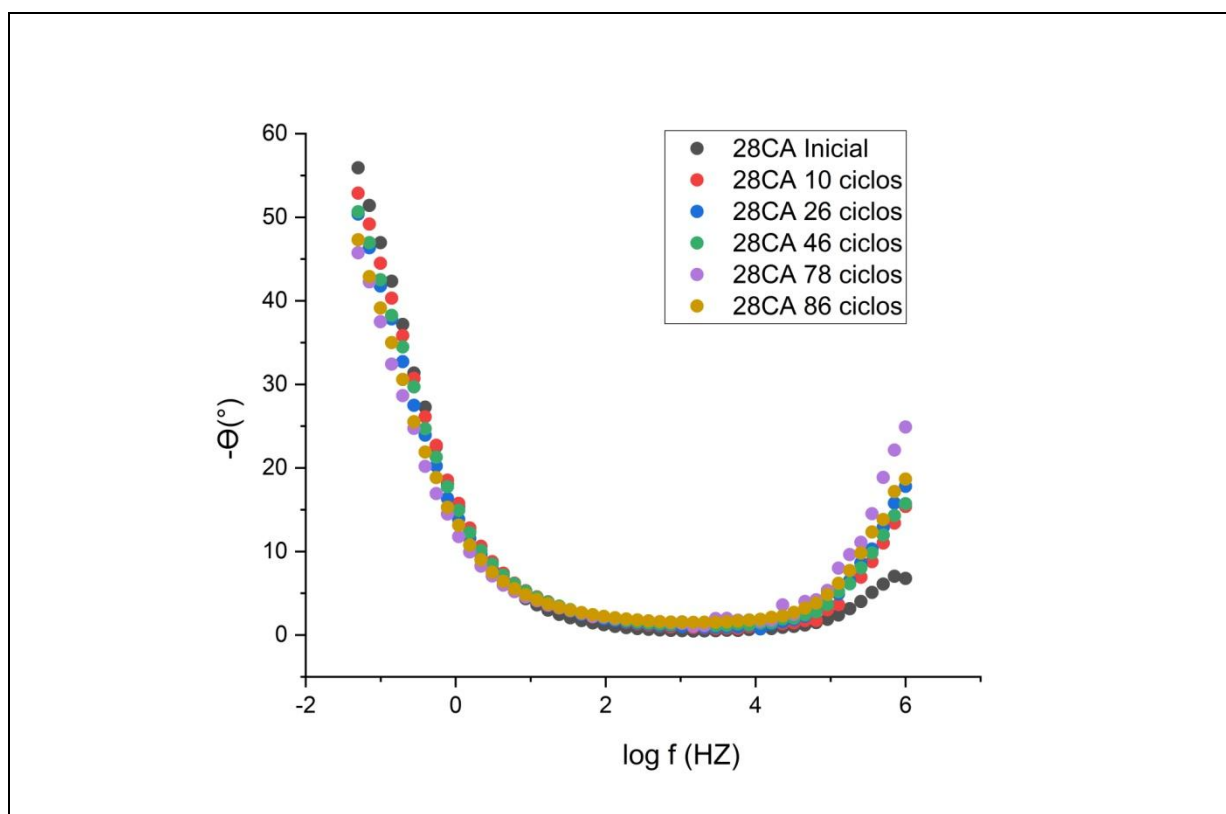


Figura 74 – Diagrama de Bode obtido para a análise de EIE do concreto auto adensável curado aos 28 dias ao longo de aproximadamente 2 anos de processo acelerado (86 ciclos).

Nos diagramas de Bode do CAA (Figuras 63, 70 a 75) verificou-se comportamentos semelhantes nas constantes de tempo em função das faixas de frequência (as curvas apresentam dois extremos bem distintos nas regiões do concreto e interface concreto/aço) onde para o CAA com as menores reduções na resistividade (módulo da impedância) e capacitância do material (região de altas frequências) indica menores riscos a corrosão se comparado com o CC.

Por fim, os diagramas de Bode (Figuras 60 a 75) indicam um CAA mais resistivo que o CC.

Já para ambos os concretos, à medida que as frequências são reduzidas, o comportamento passa a ser mais resistivo, com ângulo tendendo a 0° e após uma frequência de aproximadamente 1Hz o ângulo volta a subir se aproximando de 60° , sendo um comportamento capacitivo, mas não puro (Figura 75 e 69).

Verifica-se que para o CC há uma maior transferência de massa (maior difusão) com maiores valores da constante de Warburg (Tabela 19) e onde a segunda constante de tempo corresponde ao processo redox ou transporte de massa (região de baixa frequência).

A taxa das reações eletroquímicas pode ser limitada pela taxa finita das espécies reagentes e transportadas para a superfície do eletrodo. A corrente elétrica é controlada pela transferência de massa onde o comportamento na região de alta frequência das Figuras não é sempre o esperado devido à resistência da solução, que pode aumentar com os ciclos de exposição (ORAZEM e TRIBOLLET, 2017).

5.2.3 Medida de Penetração de Íons Cloreto

O estudo da penetração de cloretos nos corpos de prova para a avaliação da degradação do material foi realizado nas amostras após o período de 425 dias (46 ciclos) e 665 dias (86 ciclos).

Como a entrada de cloretos no concreto depende de vários fatores e é um processo lento, foram utilizados ciclos para sua aceleração.

A combinação dos ciclos de secagem e molhagem facilita a entrada do cloreto no concreto (o processo de difusão), e acelera o processo em um tempo razoável (CHANDRAMOULI et al, 2010). As amostras foram separadas em grupo: 1, 2 e 3 (medidas em triplicata).

As Figuras 76, 77 e 78 apresentam os grupos de corpos de prova de CC e CAA (CA) para todas as idades de cura submetidas à aspersão da solução colorimétrica (AgNO_3) após 425 dias depois do rompimento das amostras.

Nas Figuras a primeira imagem (a) indica antes da aspersão da solução colorimétrica e (b) após. Os resultados do grupo amostral em triplicata demonstram pequenas variações visuais nos grupos.

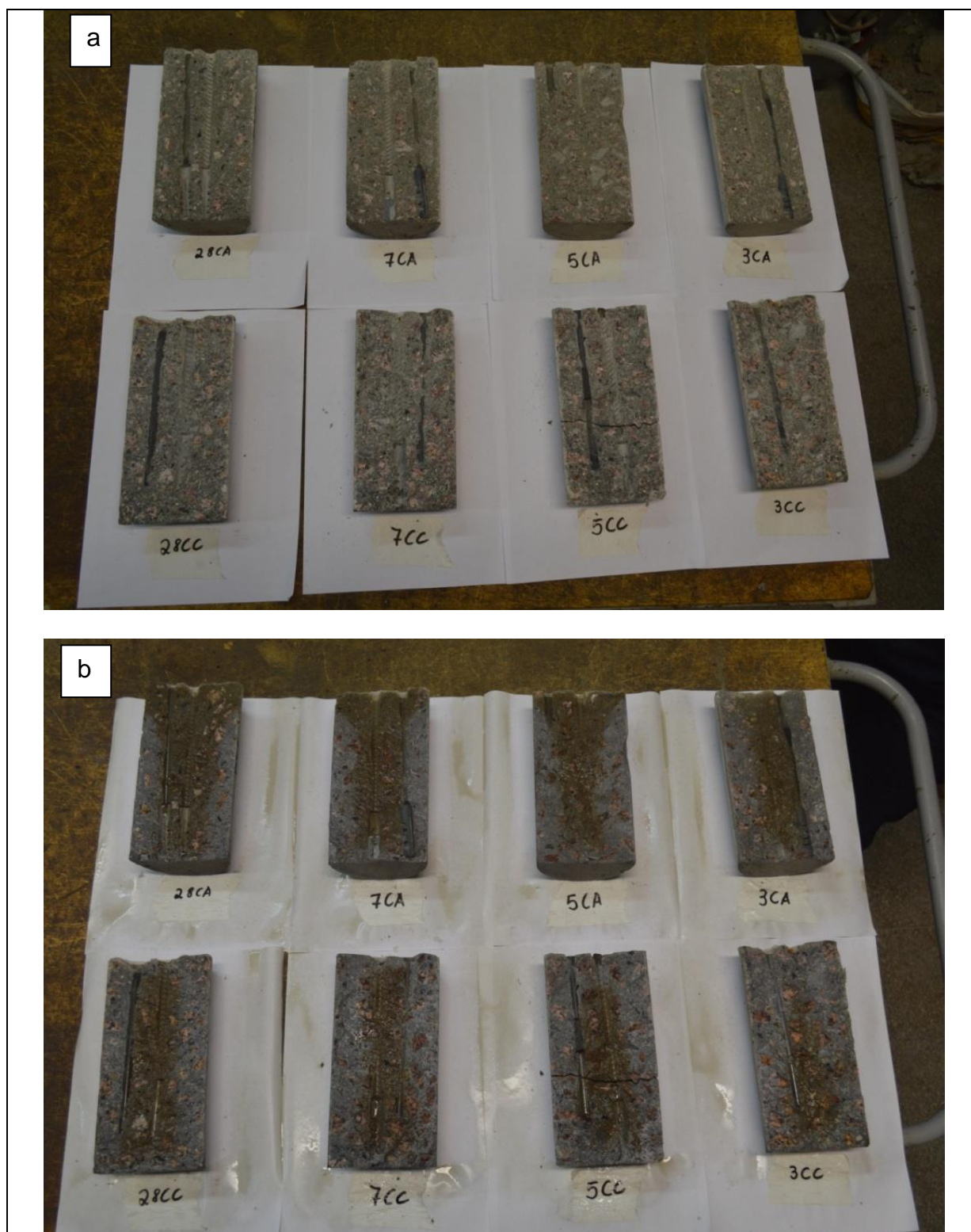


Figura 75 - Corpos de Prova de CAA (CA) (a) e CC (b) exposto a 1 ano de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral para Grupo 1. a) antes e b) depois da aspersão da solução colorimétrica.

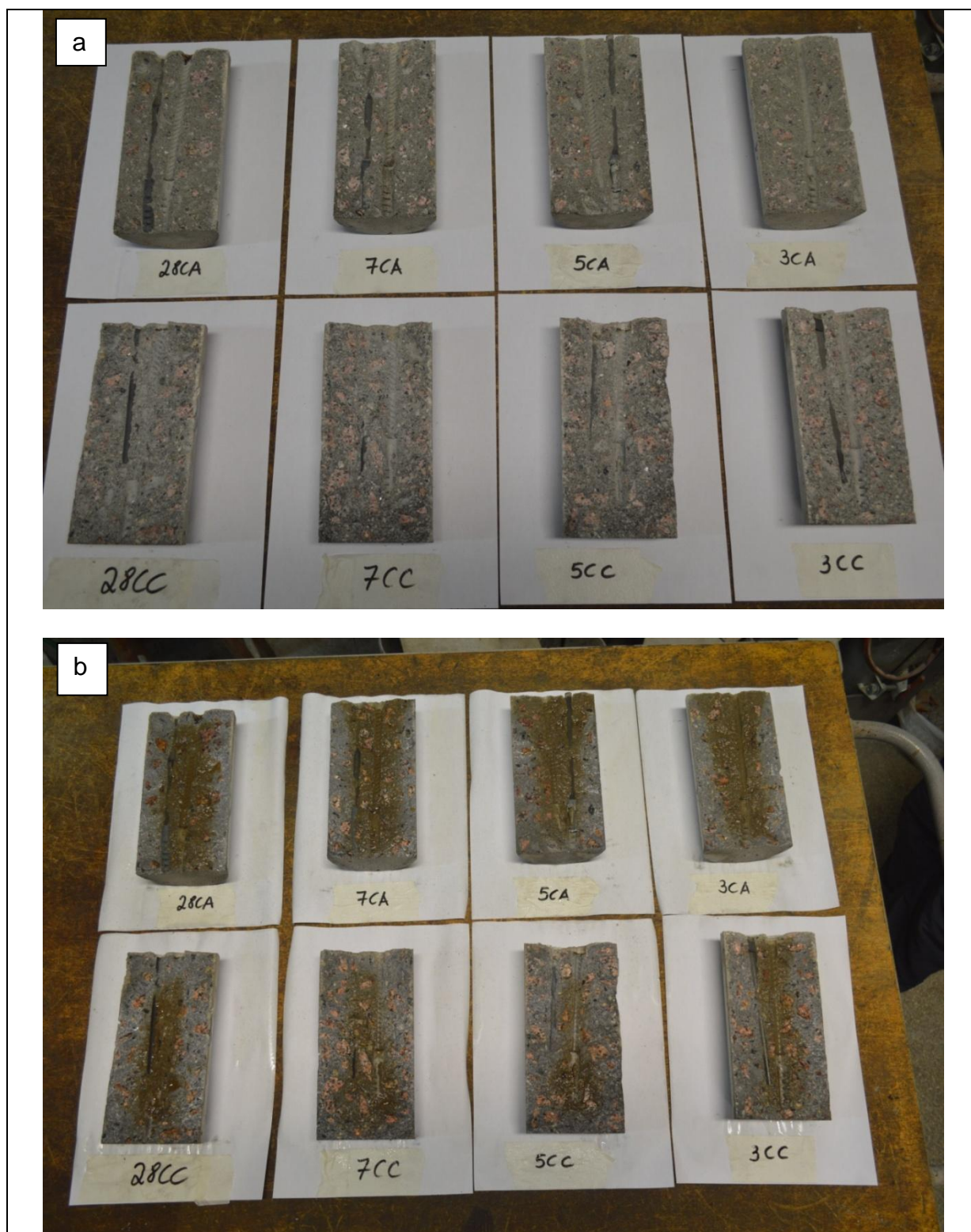


Figura 76 - Corpos de Prova de CAA (CA) (a) e CC (b) exposto a 1 anos de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral para Grupo 2. a) antes e b) depois da aspersão da solução colorimétrica.

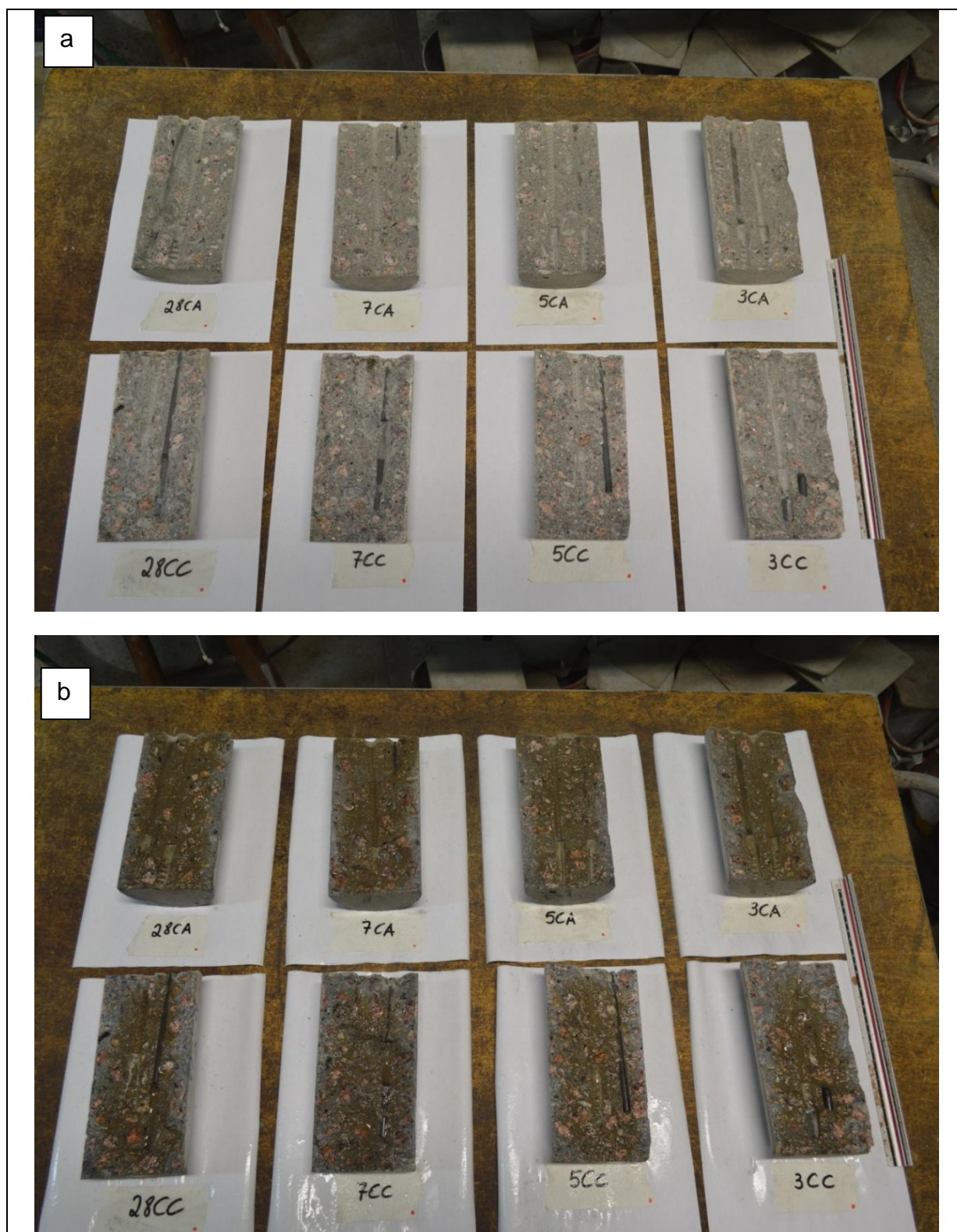


Figura 77 - Corpos de Prova de CAA (CA) (a) e CC (b) exposto a 1 anos de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral para Grupo 3. a) antes e b) depois da aspersão da solução colorimétrica.

As Figuras 79 a 82 apresentam para o Grupo 1 o cálculo descrito na norma ASTM G1:1998.

A média do grupo amostral para 425 dias (1 ano e 2 meses de exposição) é apresentado na Tabela 20.

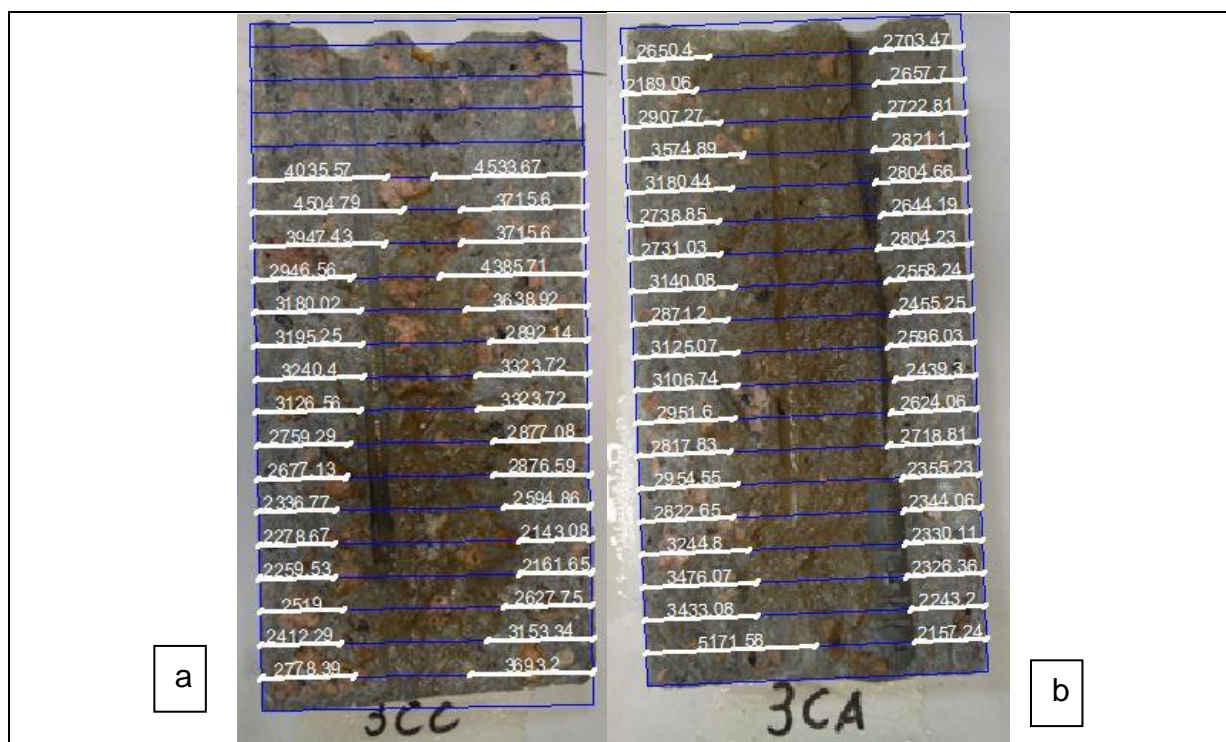


Figura 78 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 3 dias de cura exposto após 425 dias de ciclo do processo acelerado.



Figura 79 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 5 dias de cura exposto após 425 dias de ciclo do processo acelerado.

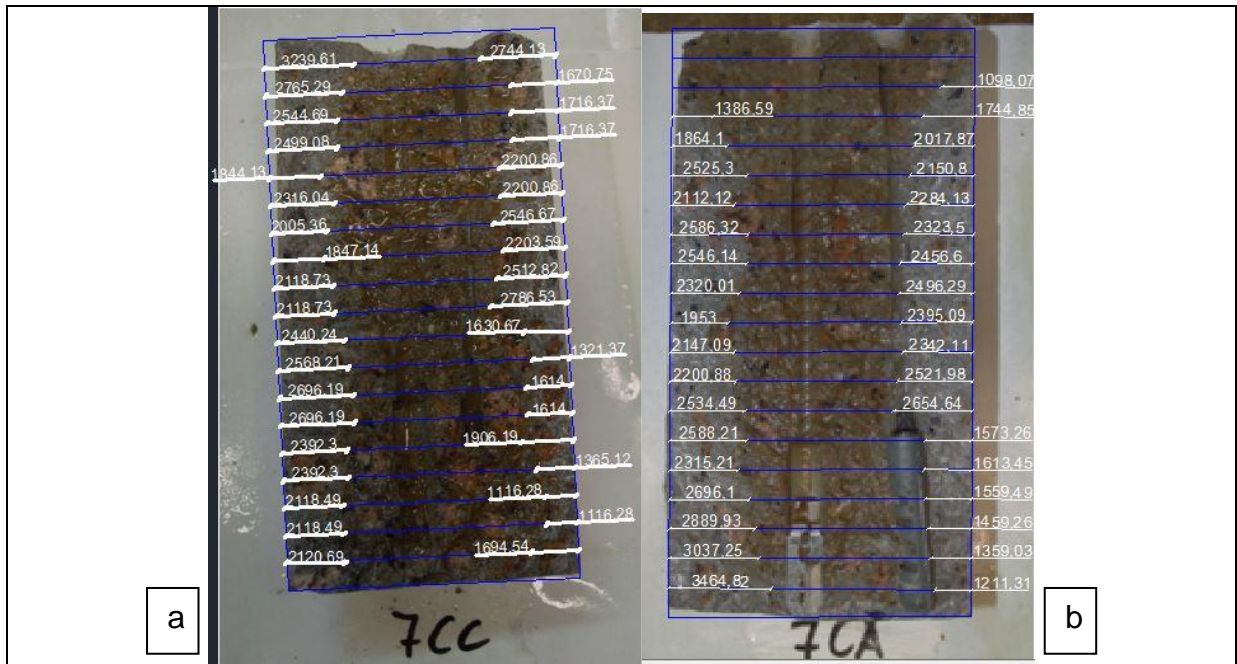


Figura 80 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 7 dias de cura exposto após 425 dias de ciclo do processo acelerado.

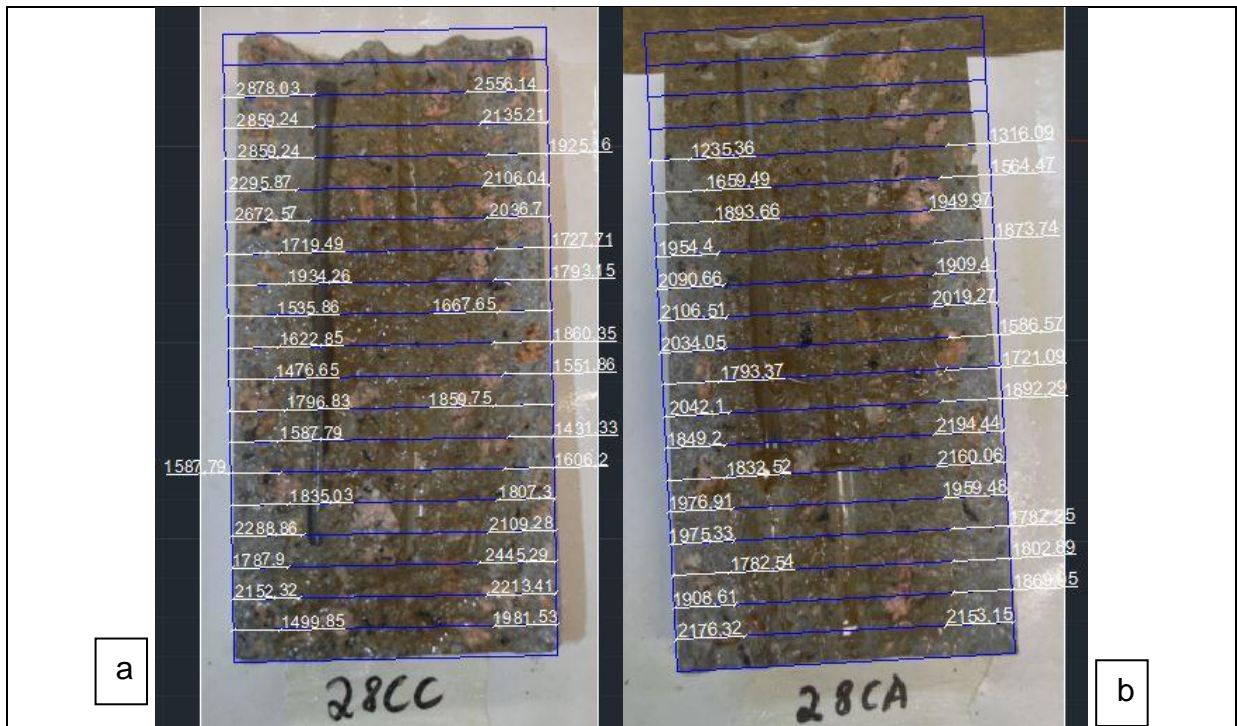


Figura 81 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 28 dias de cura exposto após 425 dias de ciclo do processo acelerado.

Tabela 20 - Resultados da penetração das amostras para 425 dias

Media dos Lados dos corpos de Prova (cm)			
Concreto Convencional - CC			
CP 3 CC	CP 5 CC	CP 7 CC	CP 28 CC
3,3153	3,1657	2,835	2,7957
Concreto Auto Adensável - CAA			
CP 3 CA	CP 5 CA	CP 7 CA	CP 28 CA
2,6721	2,3493	2,1693	1,9357

As Figuras 83 a 84 apresentam para a penetração do íon Cloreto realizadas para 665 dias. A Figura 86 apresentam o resultado da penetração dos íons cloreto para o grupo 1.

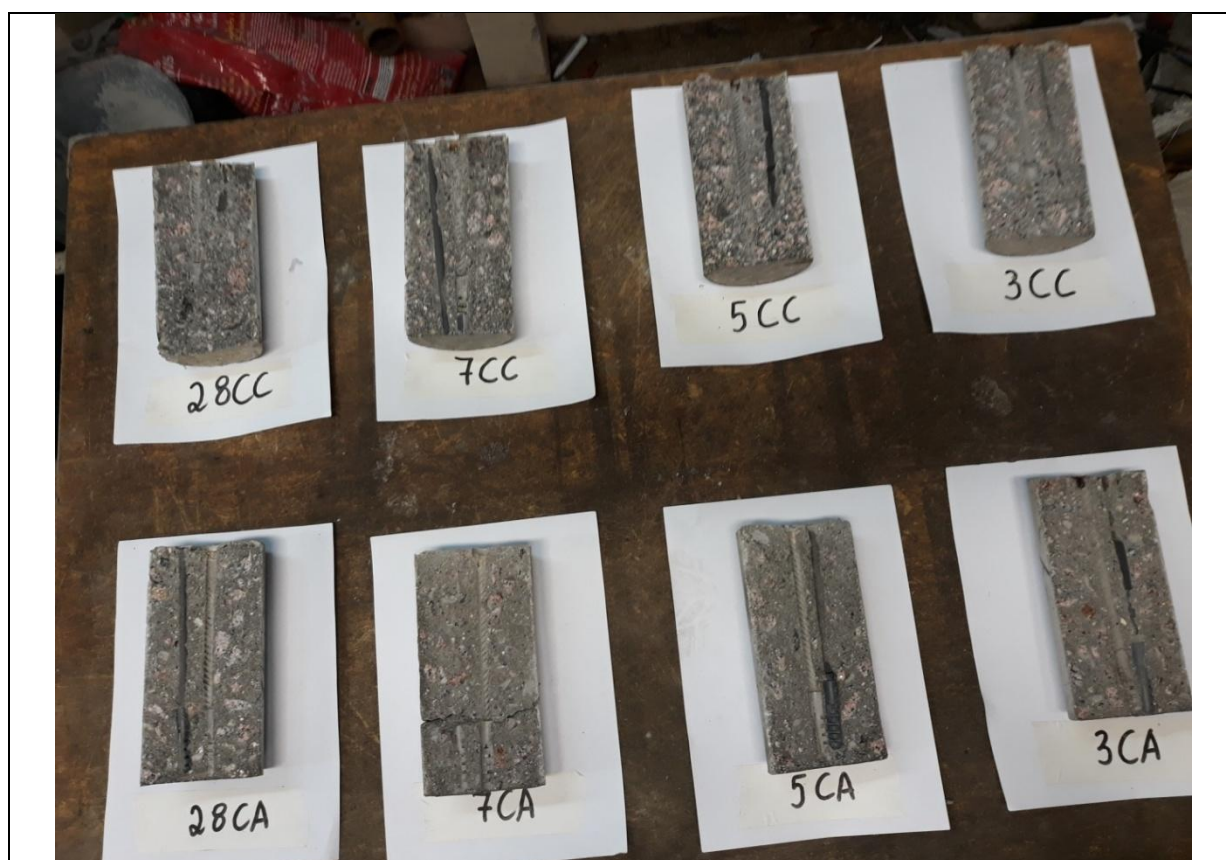


Figura 82 - Corpos de Prova de CAA (CA) e CC exposto a 2 anos de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral.

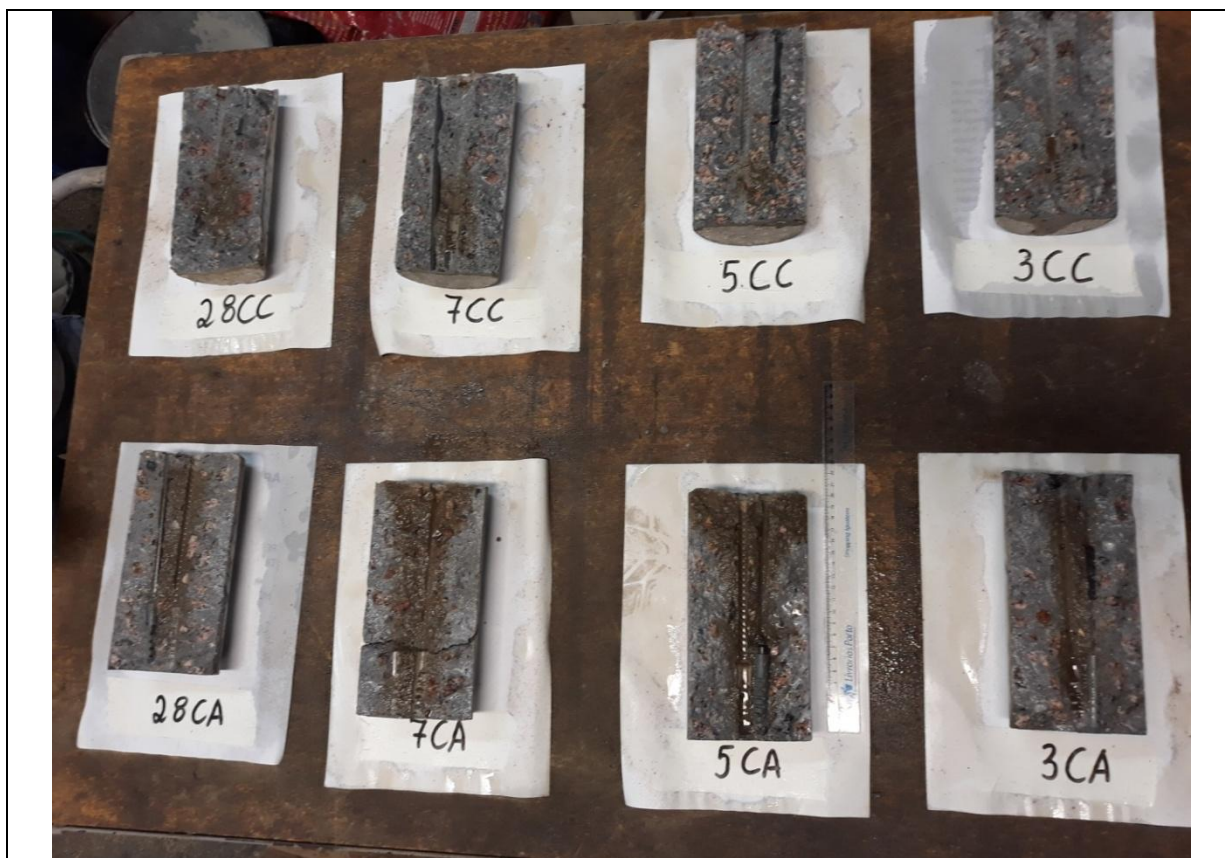


Figura 83 - Corpos de Prova de CAA (CA) e CC exposto a 2 anos de ciclo de secagem e molhagem após rompimento diametral e aspersão da solução colorimétrica.

As Figuras 85 a 88 apresentam para o grupo 1 o cálculo descrito na norma ASTM G1:1998 e sendo a média do grupo amostral para 665 dias de exposição (2 anos) apresentada na Tabela 21.

O resultado encontrado no ensaio de penetração de cloretos para ambos os concretos no período de 1 e 2 anos mostra que a taxa de transporte dos agentes agressivos no material depende do tipo de concreto e tempo de cura, já que que as condições de exposição são as mesmas.

Mesmo com os dois concretos possuindo mesma resistência à compressão e mesma relação água/cimento em sua composição, os resultados de penetração de cloretos apresentam significantes diferenças.

Nos resultados de exposição aos 625 dias, o CC curado por 7 e 28 dias, por exemplo, apresentou penetração de 4,16 cm e 3,55 cm, respectivamente.

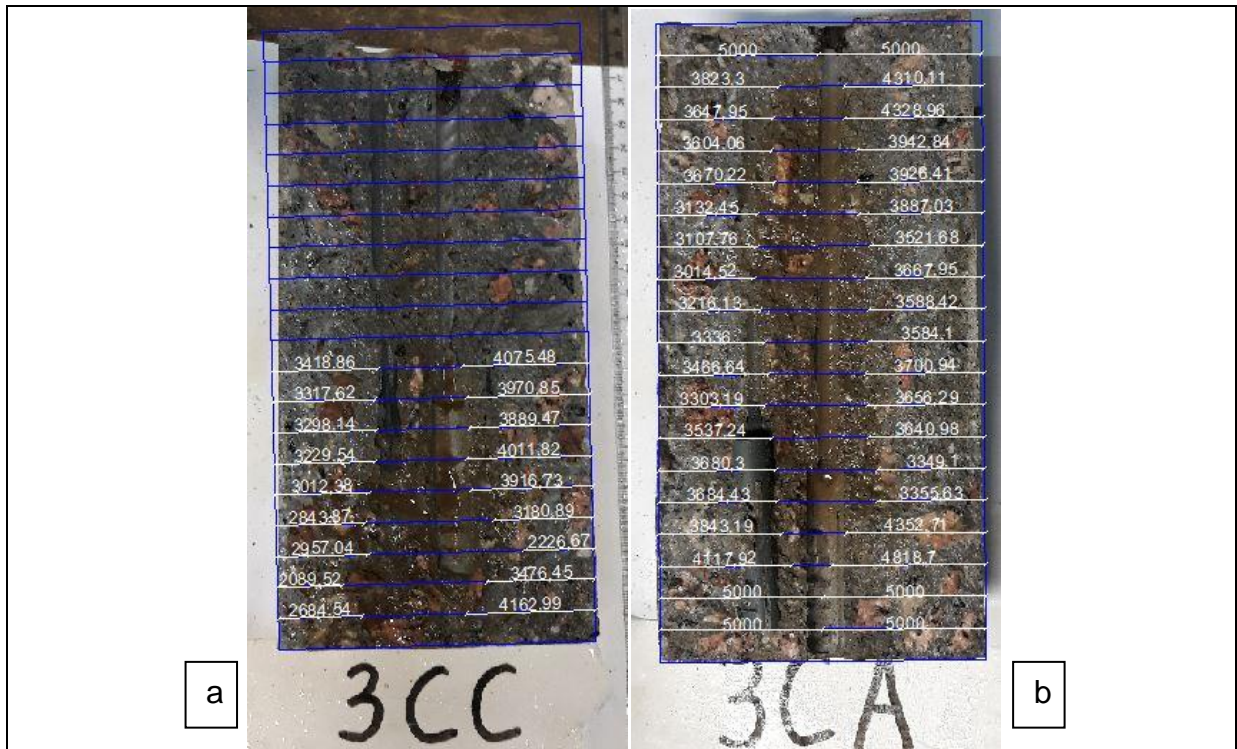


Figura 84 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 3 dias de cura exposto após 665 dias de ciclo do processo acelerado.

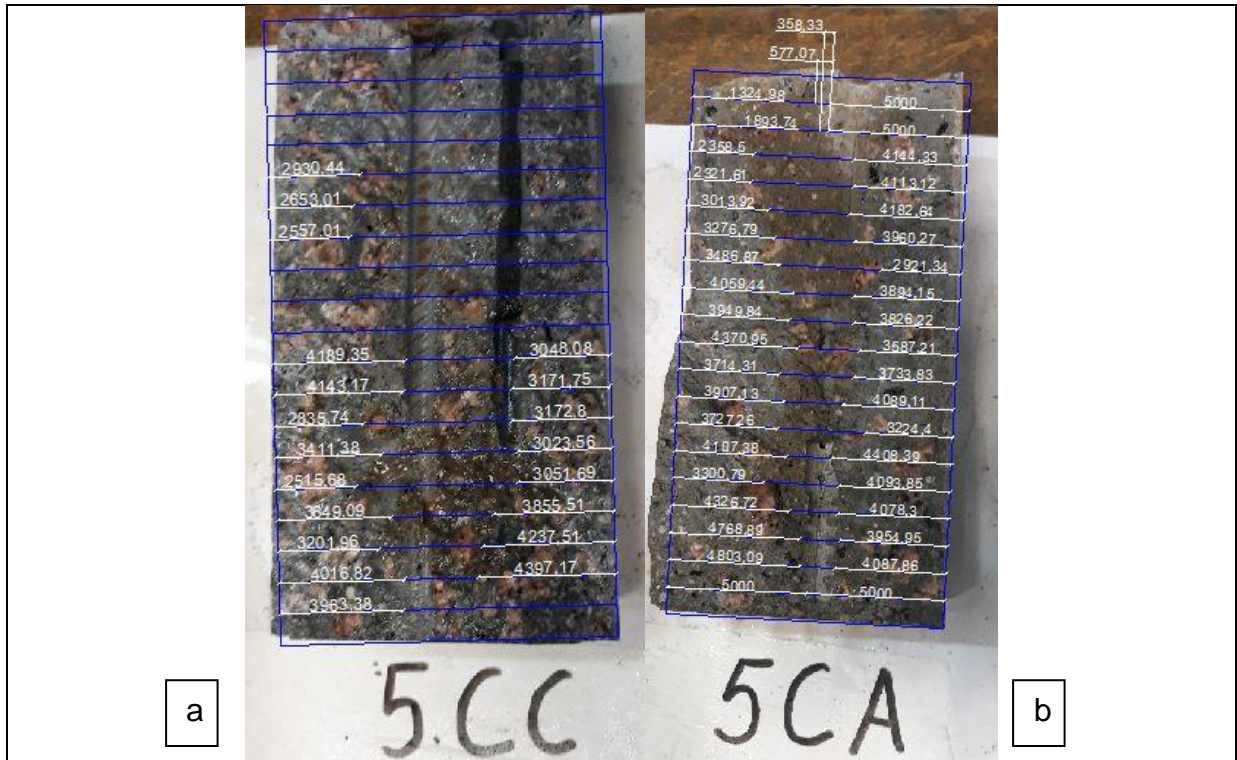


Figura 85 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 5 dias de cura exposto após 665 dias de ciclo do processo acelerado.

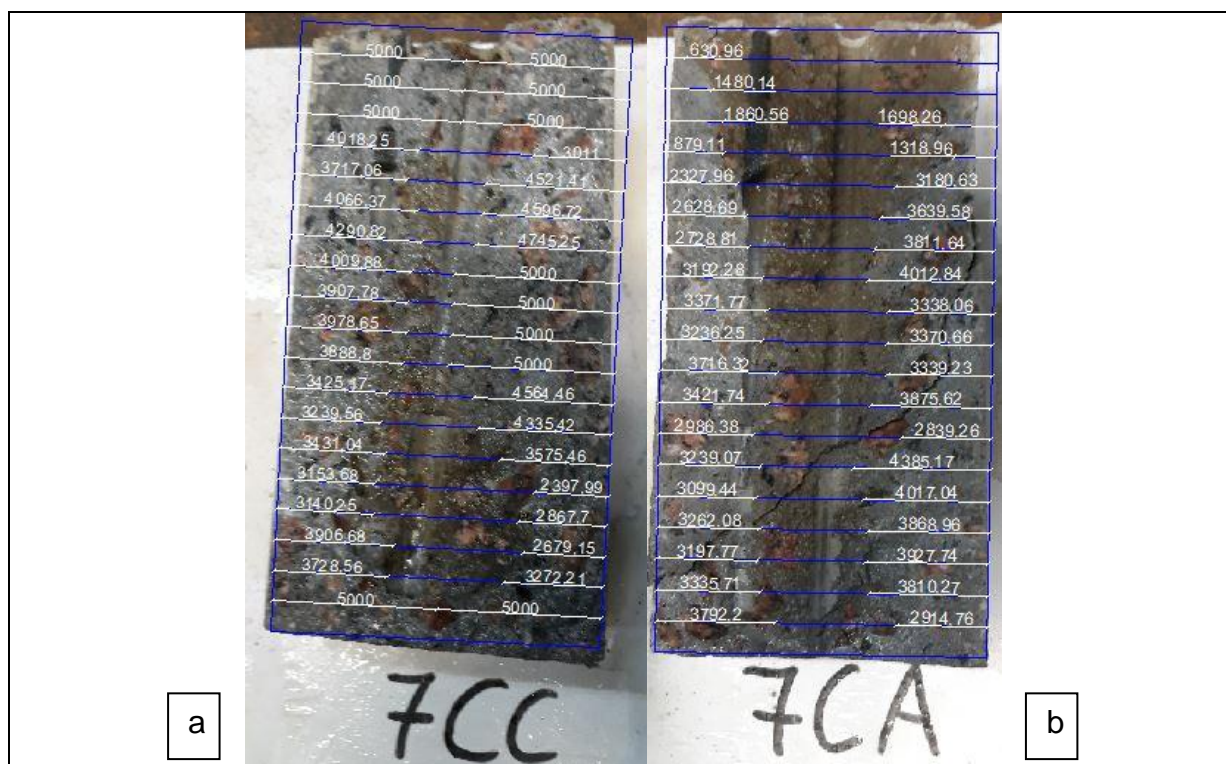


Figura 86 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 7 dias de cura exposto após 665 dias de ciclo do processo acelerado.

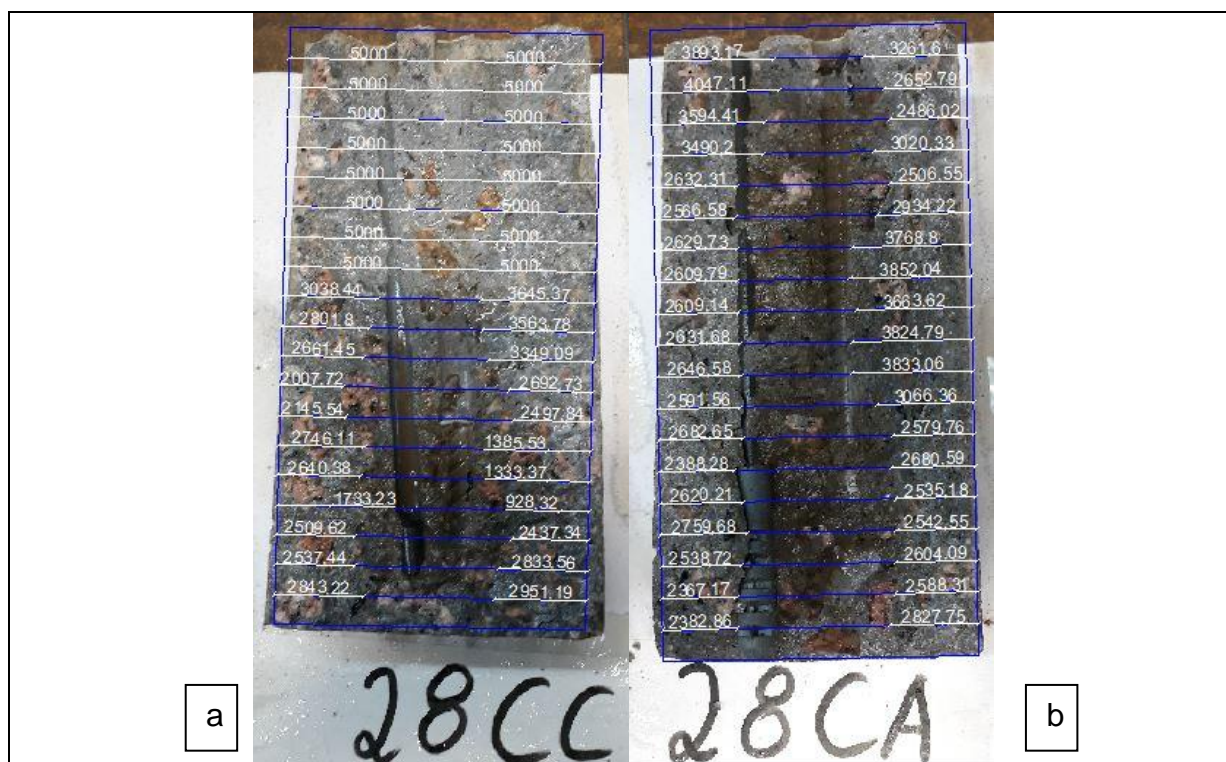


Figura 87 - Corpos de Prova de CC (a) e CAA (b) com 28 dias de cura exposto após 665 dias de ciclo do processo acelerado.

A NRB 6118 (ABNT, 2014) recomenda um cobrimento de 4 cm para classe de agressividade III. Dessa forma, para o CC, o período de exposição acelerado de 2 anos representa o período em que o cloreto atingiria as barras de aço na estrutura.

Como a entrada do cloreto é fortemente influenciada pela sequência dos ciclos e sua secagem e pelo estágio de hidratação do cimento no início e ao longo da exposição, as amostras curadas por 3 dias apresentarem resultados de penetração de cloretos mais críticos (Figura 85) se comparados com os concretos curados por mais longos períodos.

O estudo da penetração de cloretos nos corpos de prova é apresentado na Tabela 21 para 665 dias.

Tabela 21 - Resultados da penetração das amostras para 665 dias

Media dos Lados dos corpos de Prova (cm)			
Concreto Convencional - CC			
CP 3 CC	CP 5 CC	CP 7 CC	CP 28 CC
4,3573	4,3188	4,1664	3,5570
Concreto Auto Adensável - CAA			
CP 3 CA	CP 5 CA	CP 7 CA	CP 28 CA
3,6573	3,4725	2,9207	2,9164

O tipo de cimento empregado também influencia na profundidade dos cloretos. O cimento CP V- ARI utilizado neste estudo possui boas respostas ao desempenho de penetração de íons se comparado com outros cimentos (ANDRADE, 2001). Logo os resultados encontrados nesse trabalho são considerados expressivos para estas condições.

De forma geral o CAA possui uma penetração menor em relação ao CC.

Segundo Samimi et. al, (2019) utilizando concreto auto adensável de mesma classe (40MPa) com relação água/cimento de 0,4 e cura úmida de 7 dias, obteve-se um total de 1,64cm de penetração de cloretos para as amostras em condições de simulação crítica (ciclo de secagem e molhagem) durante o período de 90 dias de exposição.

Em comparação com este estudo, os resultados apresentados de 2,92cm, representam um aumento de 78% de penetração em um período de 665 dias de

exposição, levando em consideração a diferença no tempo de exposição. Logo os resultados comprovam que o CAA possui uma maior resistência a penetração de cloretos do que o CC.

Esta baixa taxa de penetração se deve principalmente, pelo tipo de cimento que no caso de Samini et al. (2019) foi o cimento Portland CP II.

O estudo da penetração de cloretos nos corpos de prova baseados na entrada de cloreto por ciclos de secagem e molhagem em uma solução salina ao longo dos anos é considerado confiável (METHA E MONTEIRO, 2014).

A profundidade de penetração do cloreto diminui com o aumento do tempo de cura conforme a Tabela 20 e 21. A literatura aponta que a migração dos íons cloreto no concreto é claramente influenciada pelas reações e refinamento da pasta e propriedades de transporte (MIR et al, 2020).

Os resultados aqui apresentados confirmam a influência do refinamento dos poros e da penetração dos íons Cl^- no ciclo final.

5.2.4 Determinação da Resistência de Polarização (R_p)

O estudo da resistividade elétrica (Resistência de Polarização – R_p) ao longo dos ciclos de secagem e molhagem nas diferentes idades de cura que representa um indicativo do processo de hidratação e degradação dos corpos de prova CC e CAA, e a evolução da probabilidade de corrosão das barras.

Os resultados das médias de R_p em forma de gráficos de barras ao longo dos ciclos para os corpos de prova de CC e CAA nas diferentes idades de cura são apresentados no Anexo B .

A determinação dos resultados principalmente na região de baixas frequências para o cálculo dos valores de (R_p) e mudança do comportamento do CC e CAA apresentou uma variação nas medidas demonstrando a heterogeneidade do material e a não linearidade do processo.

Os resultados das médias da resistência de polarização para o grupo amostral de CC e CAA (CA) são mostrados nas Figuras 89 e 90.

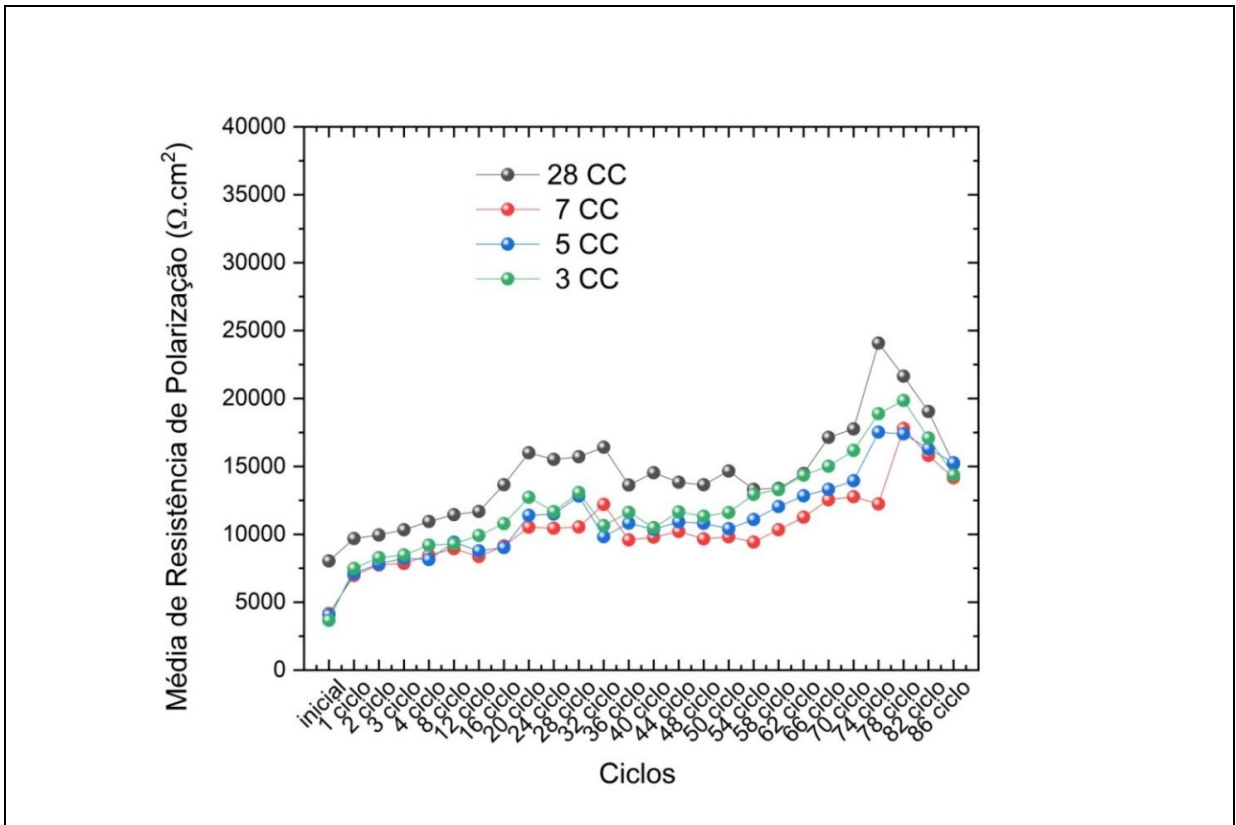


Figura 88 - Média de Resistência de Polarização para o CC aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura ao longo dos ciclo do processo acelerado.

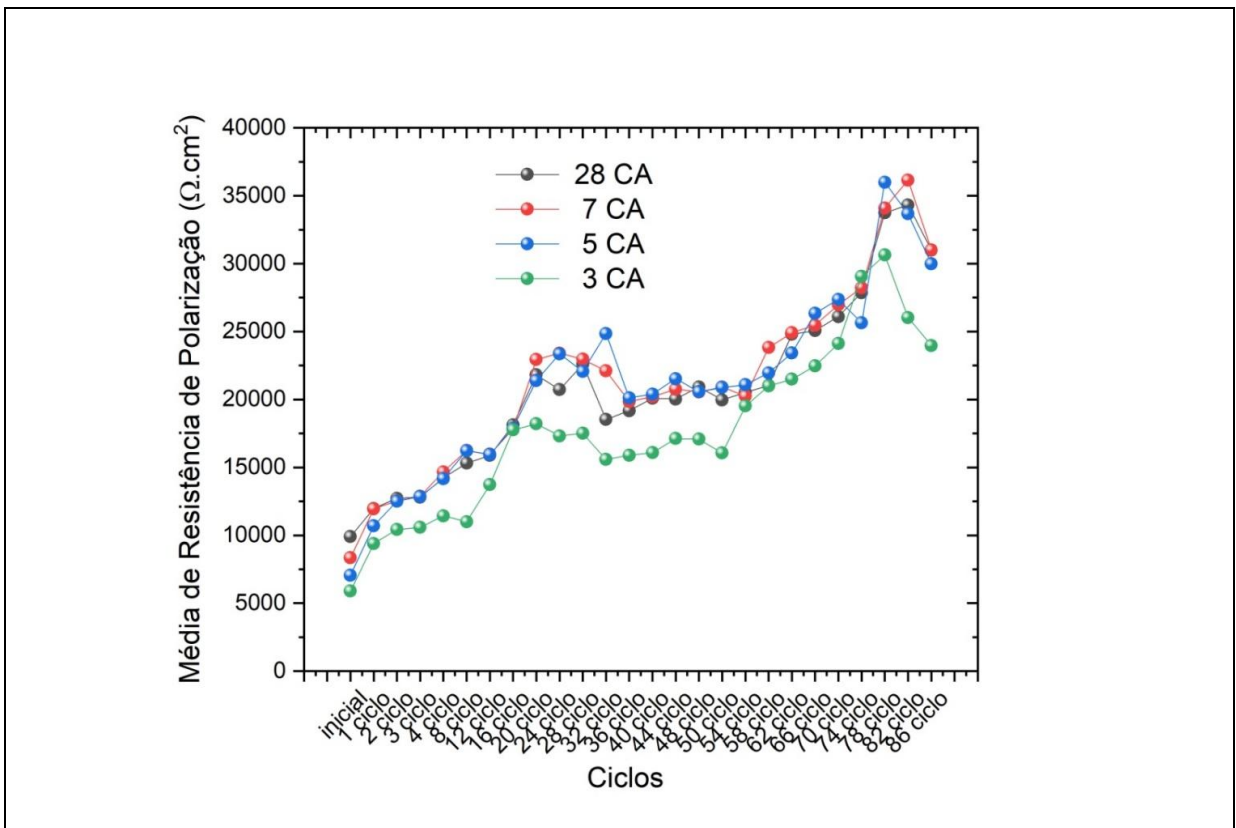


Figura 89 - Média de Resistência de Polarização para o CAA aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura ao longo dos ciclo do processo acelerado.

Os resultados apresentados são as médias dos corpos de prova aferidos e, ao longo dos ciclos há uma constância no seu comportamento, estes resultados podem ser considerados confiáveis possuindo a maior variação nos valores do CC, demonstrando maior heterogeneidade do material se comparado com o CAA.

Analisando os resultados da Figura 89, verifica-se que na idade de cura de 28 dias (28CC) a resistência a polarização é maior dos que nos resultados de 3, 5 e 7 dias, indicando os benefícios da cura prolongada por 28 dias no concreto convencional.

Já no no CAA (Figura 90), os concretos curados por 5,7 e 28 dias apresentam comportamento similar ao longo de todos os ciclos de exposição. Apenas o concreto curado por 3 dias apresentou resistência de polarização inferior às demais idades de cura, demonstrando que para o concreto auto adensável, uma cura de 5 dias, seria similar a cura de 28 dias.

Observa-se que na região de 20 a 40 ciclos (entre 6 a 10 meses) houve um aumento na resistência de polarização nos dois tipos de concreto, provavelmente devido a alterações na microestrutura. De forma geral, observou-se que o valor do R_p do CAA é cerca de 60% superior aos do CC (40 ciclos – 28 dias de cura).

Após 78 ciclos começa a ocorrer uma redução na resistência de polarização do material devido provavelmente relacionada a uma degradação do material ou a maior presença de íons cloreto.

Esses resultados precisavam ser monitorados por prolongados períodos de tempo para que seja possível se estabelecer uma conclusão mais concreta a respeito do comportamento de ambos concretos.

Saraswathy e Song (2006) relataram que há uma forte relação entre a redução da resistência a compressão e a redução da resistência elétrica devido a processos de deterioração.

Como as medidas da resistência elétrica no programa experimental ao longo dos ciclos foram realizadas em amostras úmidas, os valores da resistência elétrica são inferiores que nas condições secas e são consideradas conclusivas em relação ao processo de redução nas últimas idades refletindo sua degradação.

Comparando os resultados da média de resistência a polarização do CAA (Figuras 90) e CC (Figura 89) verificou-se para o CAA uma não linearidade ao longo dos ciclos nas medias se comparadas com o CC.

Para sistemas cimentícios de aço altamente resistivos, como no CAA, há algumas limitações e ruídos nas medidas que são facilmente detectadas nas alterações do seu comportamento (Figura 90) (RENGARAJU et al., 2019).

5.2.5 Determinação da Intensidade de Corrosão (I_{corr})

Dentro do monitoramento do comportamento da resistência das amostras de CC e CAA frente a sua deterioração aos cloretos e corrosão da barra o I_{corr} pode ser calculado a partir dos valores da resistividade elétrica dos concretos nas diferentes idades de cura. A constante de Stern-Geary adotada para amostras sem cloreto na barra foi de $B = 0,052$.

A Tabela 22 apresenta os valores de I_{corr} onde se verifica que a tendência a corrosão das barras de aço no concreto convencional é maior que no concreto auto adensável.

Comparando os resultados da Tabela 22 com os dados de Song e Saraswathy (2007) (Tabela 3), verifica-se que, na sua grande maioria, as amostras de CC se encontram em uma expectativa de corrosão entre 2 a 10 anos enquanto, o CAA a expectativa pode chegar a ter início a partir de 15 anos, dado a redução no valores do I_{corr} . Estes resultados da Tabela 22 são próximos aos resultados encontrados no trabalho de POURSAAE (2010) onde ele afirma que a avaliação quantitativa da taxa de corrosão da barra de aço no concreto armado, apesar de ser fácil de serem obtidas pelos resultados eletroquímicos e ser uma estimativa aproximada da taxa de corrosão, requer experiência.

Tabela 22 - Resultados de I_{corr} das amostras de concreto convencional e auto adensável ao longo dos ciclos.

	Concreto Convencional				Concreto Auto adensável			
	28CC	7CC	5CC	3CC	28CA	7CA	5CA	3CA
Ciclos	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)							
inicial	6,4747	12,4730	12,8070	14,1693	5,2492	6,2367	7,3571	8,8177
1 ciclo	5,3696	7,4569	7,2974	6,9432	4,3415	4,3493	4,8568	5,5322
2 ciclo	5,2242	6,7141	6,6453	6,2779	4,0881	4,1485	4,1572	4,9890
3 ciclo	5,0336	6,6154	6,3116	6,1300	4,0580	4,0356	4,0447	4,9129
4 ciclo	4,7503	6,1489	6,3925	5,6517	3,6590	3,5449	3,6690	4,5471
8 ciclo	4,5425	5,8168	5,5219	5,5929	3,3952	3,2026	3,2028	4,7272
12 ciclo	4,4514	6,2141	5,9215	5,2433	3,2743	3,2565	3,2617	3,7877

	Concreto Convencional				Concreto Auto adensável			
	28CC	7CC	5CC	3CC	28CA	7CA	5CA	3CA
Ciclos	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)							
16 ciclo	3,8091	5,6844	5,7638	4,8232	2,8688	2,9174	2,9077	2,9278
20 ciclo	3,2479	4,9414	4,5604	4,0879	2,3846	2,2660	2,4307	2,8561
24 ciclo	3,3516	4,9756	4,5252	4,4546	2,5097	2,2218	2,2253	3,0029
28 ciclo	3,3090	4,9332	4,0579	3,9790	2,3004	2,2638	2,3572	2,9700
32 ciclo	3,1688	4,2626	5,2958	4,8860	2,8060	2,3521	2,0923	3,3366
36 ciclo	3,8162	5,4223	4,8066	4,4786	2,7118	2,6199	2,5850	3,2725
40 ciclo	3,5783	5,3097	5,0174	4,9573	2,5877	2,5733	2,5489	3,2328
44 ciclo	3,7597	5,0939	4,7610	4,4663	2,5960	2,5054	2,4154	3,0374
48 ciclo	3,8092	5,3807	4,8120	4,5910	2,4854	2,5300	2,5291	3,0455
50 ciclo	3,5482	5,3007	4,9915	4,4813	2,6046	2,4860	2,4902	3,2367
54 ciclo	3,9053	5,5123	4,6885	4,0181	2,5336	2,5681	2,4667	2,6636
58 ciclo	3,8884	5,0294	4,3198	3,9147	2,4725	2,1830	2,3675	2,4769
62 ciclo	3,5927	4,6191	4,0503	3,6241	2,0972	2,0878	2,2208	2,4197
66 ciclo	3,0339	4,1471	3,9053	3,4642	2,0738	2,0422	1,9741	2,3146
70 ciclo	2,9282	4,0741	3,7303	3,2146	1,9925	1,9280	1,9002	2,1562
74 ciclo	2,1600	4,2502	2,9674	2,7545	1,8657	1,8420	2,0276	1,7888
78 ciclo	2,4024	2,9224	2,9887	2,6185	1,5412	1,5255	1,4447	1,6971
82 ciclo	2,7310	3,2921	3,1896	3,0428	1,5153	1,4383	1,5445	1,9977
86 ciclo	3,4268	3,6734	3,4055	3,6164	1,6778	1,6768	1,7344	2,1695

5.2.6 Difusão

5.2.7 Difusividade dos íons de Cloreto – Coeficiente e comportamento difusional

A Figura 91 apresenta o resultado do coeficiente de difusão de íons cloreto para CC nos diferentes tempos de cura analisados (3, 5, 7 e 28 dias) ao longo de dois anos de ciclos.

Para o íon cloreto o coeficiente de difusão no concreto (D_w) é da ordem de 10^{-12} (VEDALAKSHMI et al., 2009; PACK et al., 2010; MERCADO e LORENTE et al., 2012; LIU et al., 2016; LI et al., 2019).

Os dados de D_w foram calculados através das equações 22, 23 e 24.

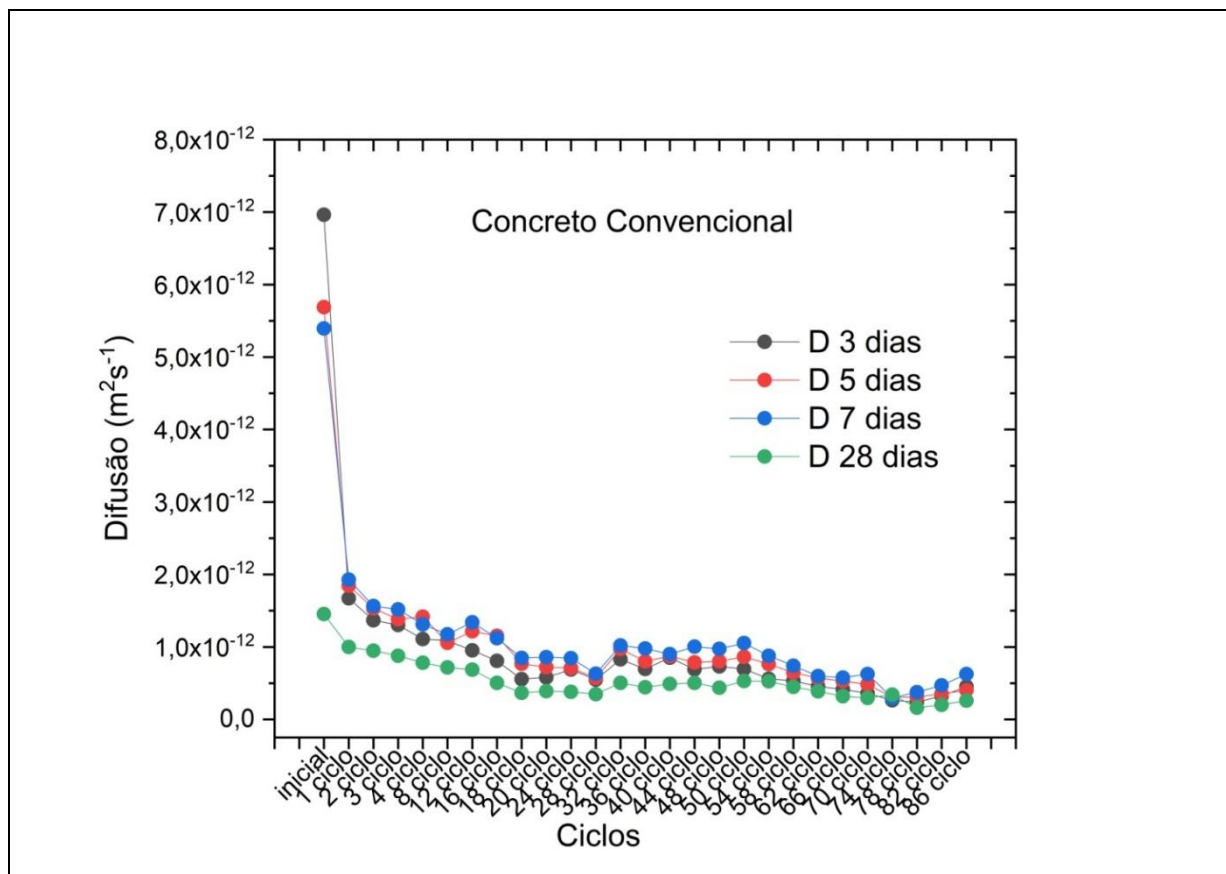


Figura 90 - Coeficiente de Difusão de íons cloreto para o concreto convencional aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura ao longo dos ciclo do processo acelerado.

Para o ciclo inicial verifica-se que as mudanças da estrutura dos poros com seu refinamento e área superficial específica, levando a uma microestrutura compacta, gera o efeito de impedimento físico reduzindo a difusão conforme discutido por Huang et al. (2019).

Logo, conforme apresentado na Figura 91, nos primeiros ciclos verifica-se que há uma grande variação nos resultados, onde para 3 dias de cura tem-se o valor de D_w de $6,96 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, aos 5 dias um valor de coeficiente de difusão de $5,96 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, aos 7 dias um valor de coeficiente de difusão de $5,40 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e aos 28 dias um valor de coeficiente de difusão de $1,45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para o CC. (Figura 91).

Houve, portanto, uma redução de 80% no coeficiente de difusão dos 3 para os 28 dias de cura.

Para o ciclo inicial há uma redução em função da cura do coeficiente de difusão para o CC de aproximadamente 80% de 3 dias para 28 dias de cura, mais uma vez os evidenciando a importância dos 28 dias de cura no CC.

Para os referidos dados, o coeficiente de variação foi aumentando com a idade de cura, onde aos 3 dias temos um coeficiente de variação C.V. de 7,41%, aos 5 dias de 16,68%, aos 7 dias de 19,29% e aos 28 dias de 21,15%. Considerando os dados experimentais e sua dispersão, tratando de um material é heterogêneo os valores são confiáveis (C.V. < 25%).

A Figura 92 apresenta o resultado do coeficiente de difusão de íons cloreto para o CAA ao longo de dois anos de ciclos.

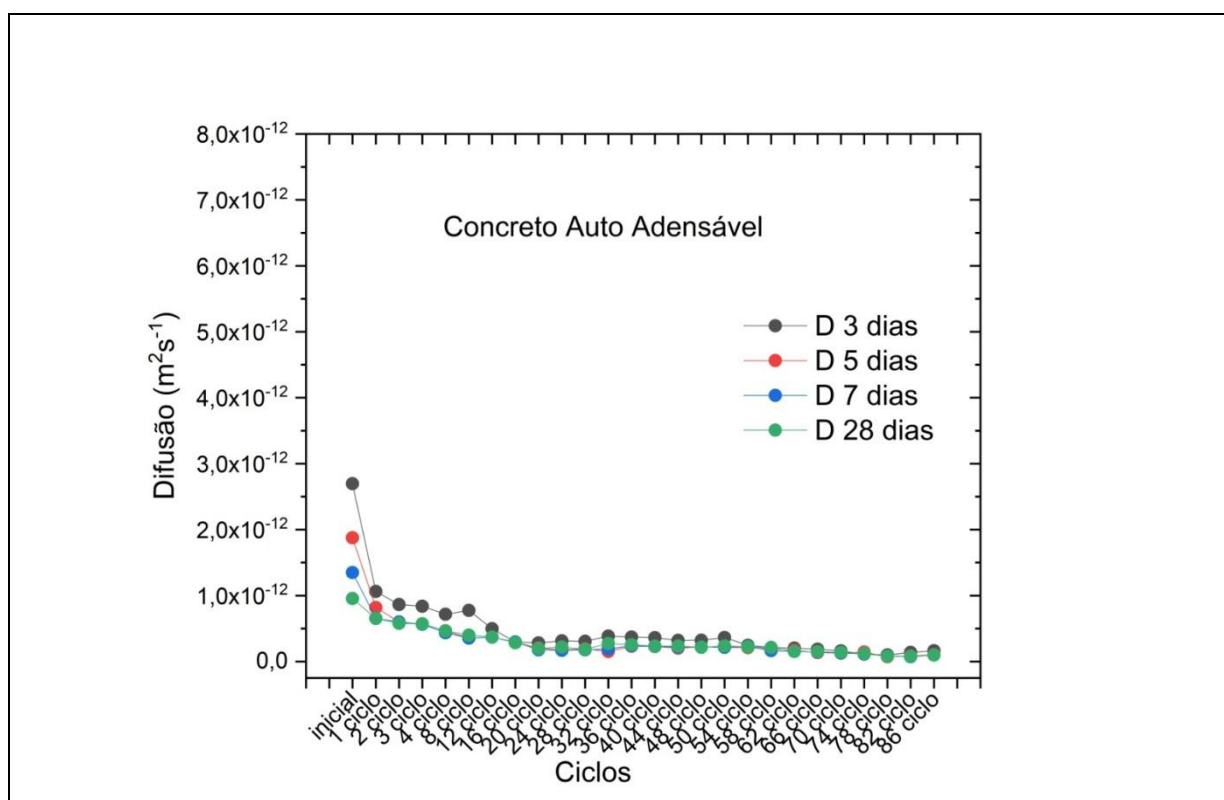


Figura 91 - Coeficiente de Difusão de íons cloreto para o concreto auto adensável aos 3, 5, 7 e 28 dias de cura ao longo dos ciclo do processo acelerado.

As variações nas primeiras idades de exposição não são tão intensas quanto no concreto convencional.

Os resultados encontrados para o coeficiente de difusão de cloretos no CAA (Figura 92) para o ciclo inicial são: para 3 dias de $2,70 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, aos 5 dias de $1,88 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, aos 7 dias de $1,35 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e aos 28 dias de $0,95 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Para estes dados houve uma redução em função da cura de aproximadamente 64% de 3 dias para 28 dias, evidenciando que o coeficiente de difusão é menos afetado pelo tempo de cura no CAA quando comparado ao CC.

Para os dados do CAA nas idades iniciais o coeficiente de variação foram reduzindo com a idade de cura, ao contrário do concreto convencional. Aos 3 dias encontrou-se um coeficiente de variação C.V. de 10,28%, aos 5 dias de 11,25%, aos 7 dias de 6,74% e aos 28 dias de 7,42%. Considerando os dados experimentais, o valor de C.V. é menor que 15%, sendo que os dados representam baixa dispersão e o CAA pode ser considerado mais homogêneo que o CC.

Considerando a variação dos tipos de concreto para a mesma idade de cura temos uma redução no coeficiente de difusão inicial de aproximadamente 61% aos 3 dias, 67% aos 5 dias, 75% aos 7 dias e 34% aos 28 dias quando comparados o CAA com CC, demonstrando que o CAA possui coeficiente de difusão inicial inferior ao CC para todas as idades de cura..

Considerando o processo de envelhecimento de aproximadamente um ano (40 ciclos - 300 dias) os resultados encontrados para D_W do CC são: $0,85 \times 10^{-12}$ m²/s, aos 3 dias de cura, $0,87 \times 10^{-12}$ m²/s, aos 5 dias de cura, $0,90 \times 10^{-12}$ m²/s aos 7 dias de cura e aos 28 dias um valor de D_W de $0,49 \times 10^{-12}$ m²/s.

Em relação a CAA os valores encontrados para o coeficiente de difusão (D_W) são $0,36 \times 10^{-12}$ m²/s aos 3 dias de cura, $0,23 \times 10^{-12}$ m²/s aos 5 dias de cura, $0,23 \times 10^{-12}$ m²/s aos 7 dias de cura e um valor de $0,23 \times 10^{-12}$ m²/s aos 28 dias de cura.

Verifica-se que para o CC as condições de cura possuem grande influência na variação do valor do D_W se comparado 3 aos 28 dias de cura.

Para os dados do coeficiente de difusão do CC em 40 ciclos o coeficiente de variação (C.V.) encontrado é de 14,75%, aos 3 dias, de 20,98%, aos 5 dias 21,69%, aos 7 dias e 25,97% aos 28 dias. O coeficiente de variação para o concreto CAA é de 12,64%, aos 3 dias, de 16,65%, aos 5 dias 7,67%, aos 7 dias e 15,6% aos 28 dias. Novamente se confirma o comportamento da medida do C.V. do CAA em torno de 15% indicando baixa dispersão.

Analisando as Figuras 91 e 92, para as medidas do coeficiente de difusão no ciclo 86 (2 anos) para o CC tem-se o resultado de $0,45 \times 10^{-12}$ m²/s aos 3 dias de cura, $0,40 \times 10^{-12}$ m²/s aos 5 dias de cura, $0,6 \times 10^{-12}$ m²/s aos 7 dias de cura e um valor de $0,26 \times 10^{-12}$ m²/s aos 28 dias. Para CAA o resultado encontrado do coeficiente D_W foi de $0,16 \times 10^{-12}$ m²/s aos 3 dias de cura, $0,10 \times 10^{-12}$ m²/s aos 5 dias de cura, $0,097 \times 10^{-12}$ m²/s aos 7 dias de cura e de $0,097 \times 10^{-12}$ m²/s aos 28 dias.

O coeficiente de variação encontrados para as medidas de D_w para o CC nos 86 ciclos é de 11,41%, aos 3 dias, de 21,05%, aos 5 dias 24,65%, aos 7 dias e 25,31% aos 28 dias. Para o CAA os valores de C.V. nos 86 ciclos são de 11,86%, aos 3 dias, de 15,12%, aos 5 dias 5,84%, aos 7 dias e 11,5% aos 28 dias.

Comparando os dados finais do CAA encontramos uma difusão para os 28 dias de cura 62,7%, aproximadamente, menor que do CC. Aos 3 dias de cura uma diferença entre os tipos de concreto de 64 %.

Verifica-se em todos os casos que o efeito da cura para o CC é mais significativo que para o CAA.

Os concreto auto adensáveis comparados com os convencionais possuem em sua grande maioria (<50%), devido a sua estrutura porosa mais refinada e melhor empacotamento das partículas, graus de absorção e permeabilidade menores (MINDESS, 2019). No caso do estudo, onde o coeficiente de difusão indica a taxa do transporte de massa representando uma relação com sua permeabilidade, e sendo uma medida proporcional a velocidade na qual o íons se difunde no concreto, os valores do D_w semelhantes para o CAA (Figura 92) nas maiores idades de exposição reforçam este resultado.

Os resultados encontrados após 2 anos de ciclos representam variações no coeficiente de difusão do íon cloreto ainda mais expressivas quando comparado CC e CAA (diferença de aproximadamente 60%).

O cálculo difusional, através da impedância de Warburg, não considerando o transporte de íons acelerado pela aplicação de gradientes de potenciais elétricos, fornece a conclusão que o CAA é mais resistente ao transporte de íons cloretos do que CC correspondente com mesma relação água/cimento e classe de resistência mecânica.

Os resultados do trabalho foram comparados com os dados do coeficiente de difusão efetivo de cloreto do modelo holístico proposto por Shafikhani e Chidiac (2020) onde o modelo inclui condições de porosidade e hidratação dos materiais para dados de um ano.

Os resultados comprovam que a difusividade da pasta de cimento diminui exponencialmente com o grau de hidratação, e que quando a relação água/cimento aumenta esta relação não é tão considerável (SHAFIKHANI e CHIDIAC (2020).

No trabalho de SHAFIKHANI e CHIDIAC (2020) a medida encontrada para a difusividade do concreto foi de $0,36 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ desenvolvida a partir de um modelo

holístico que no presente trabalho corresponde ao valor encontrado no final do primeiro ano de exposição (40 ciclos) para CAA curado por 3 dias

Os resultados da difusividade de cloretos do CAA (Figura 92) após um ano não foram considerados menores expressivamente com as diferentes idades de cura se comparado com CC.

Isto se dá, provavelmente, devido poucas alterações na porosidade das amostras de CAA após este período e a taxa de ligação do íon cloreto e o seu transporte no processo de difusão (LI et al., 2015).

Os resultados apresentados nas Figuras 95 e 96 que representam o coeficiente de difusão de íons cloreto de CC e CAA foram realizadas nas mesmas condições e datas. Sabe-se que a difusão do concreto está relacionada às condições que as amostras estão sendo submetidas (CASTRO, RINCÓN E FIGUEIREDO, 2001).

Desta forma, os dados condizem com os encontrados na literatura, resultando em um CAA com menor difusividade dos íons cloretos em relação ao CC.

As respostas do coeficiente de difusão como indicador de durabilidade indica uma melhora nas propriedades de transporte (D_w) para ambos os concretos.

Esta medida está intimamente ligada a resistência à penetração de agentes agressivos. Logo o calculo do D_w através da técnica de EIE e do coeficiente de Warburg (σ_w) confirma a durabilidade superior do CAA neste estudo.

A Tabela 23 apresenta os resultados por ciclo e idade do coeficiente de difusão D_w para o CC.

Os resultados demonstram que o coeficiente de variação aumenta muito com a idade de cura, mesmo com a redução do coeficiente.

A dispersão dos resultados do transporte de íons no material é devido a sua dispersão na porosidade das amostras.

A Tabela 24 apresenta os resultados por ciclo e idade do coeficiente de difusão D_w para o CAA.

Tabela 23 - Resultados de D_w das amostras de concreto convencional ao longo dos ciclos.

Concreto Convencional								
Ciclos	3 dias		5 dias		7 dias		28 dias	
	$D_w \cdot 10^{-12}$ m ² /s	C.V. (%)	$D_w \cdot 10^{-12}$ m ² /s	C.V. (%)	$D_w \cdot 10^{-12}$ m ² /s	C.V. (%)	$D_w \cdot 10^{-12}$ m ² /s	C.V. (%)
Inicial	6,9623	7,4124	5,6879	16,6836	5,3951	19,2873	1,4538	21,1460
1 ciclo	1,6718	8,7218	1,8467	17,4693	1,9283	19,2312	0,9999	22,0358
2 ciclo	1,3667	8,7094	1,5314	17,6091	1,5633	18,7681	0,9464	22,9351
3 ciclo	1,3031	9,4462	1,3815	17,8974	1,5176	19,7240	0,8786	23,2511
4 ciclo	1,1077	9,3888	1,4171	18,1714	1,3112	19,1055	0,7825	25,3996
8 ciclo	1,0847	10,4069	1,0574	32,5455	1,1733	20,9938	0,7156	24,8391
12 ciclo	0,9534	11,5087	1,2160	20,7321	1,3391	21,3104	0,6872	25,2829
16 ciclo	0,8067	9,3479	1,1521	21,2655	1,1205	21,5678	0,5032	26,5117
20 ciclo	0,5795	13,3769	0,7212	20,6883	0,8585	22,0889	0,3895	25,8111
24 ciclo	0,6881	10,9391	0,7101	21,1693	0,8439	22,9601	0,3797	26,8759
28 ciclo	0,5490	12,3399	0,5710	21,3883	0,6301	22,2916	0,3482	27,9675
32 ciclo	0,8279	10,7362	0,9726	20,8370	1,0196	22,4919	0,5050	25,5543
36 ciclo	0,6956	13,6223	0,8012	20,4648	0,9777	21,7130	0,4440	26,1589
40 ciclo	0,8522	14,7506	0,8730	20,9836	0,8998	21,6918	0,4902	25,9733
44 ciclo	0,6918	11,1501	0,7860	19,6986	1,0040	21,1164	0,5032	25,9292
48 ciclo	0,7309	11,5778	0,8030	21,0028	0,9744	20,6865	0,4366	25,4090
50 ciclo	0,6964	11,3027	0,8640	20,6605	1,0537	20,2253	0,5289	25,7956
54 ciclo	0,5599	10,2850	0,7623	20,0527	0,8772	20,6417	0,5243	24,6952
58 ciclo	0,5314	11,3774	0,6471	20,4323	0,7399	20,8117	0,4476	25,5326
62 ciclo	0,4555	9,7270	0,5689	21,0576	0,5964	21,4442	0,3874	27,2559
66 ciclo	0,4162	10,9036	0,5289	21,6639	0,5756	20,1896	0,3192	25,1016
70 ciclo	0,3584	9,8251	0,4826	21,5395	0,6264	20,3632	0,2973	24,8838
74 ciclo	0,2631	9,8700	0,3054	21,1938	0,2962	20,8729	0,3407	24,9020
78 ciclo	0,2378	10,8542	0,3098	20,9479	0,3758	22,0967	0,1618	25,7173
82 ciclo	0,3211	10,3800	0,3528	21,6803	0,4680	20,7487	0,2002	25,1766
86 ciclo	0,4535	11,4082	0,4022	21,0531	0,6247	24,6577	0,2586	25,3124

Tabela 24 - Resultados de D_w das amostras de concreto auto adensável ao longo dos ciclos.

Concreto Auto Adensável								
Ciclos	3 dias		5 dias		7 dias		28 dias	
	$D_w 10^{-12}$ m ² /s	C.V. (%)	$D_w 10^{-12}$ m ² /s	C.V. (%)	$D_w 10^{-12}$ m ² /s	C.V. (%)	$D_w 10^{-12}$ m ² /s	C.V. (%)
Inicial	2,6963	10,2824	1,8770	11,2547	1,3489	6,7412	0,9555	7,4239
1 ciclo	1,0614	10,9698	0,8180	12,6960	0,6560	6,7744	0,6536	8,9862
2 ciclo	0,8631	10,4436	0,5993	13,1783	0,5968	6,6175	0,5796	8,7663
3 ciclo	0,8370	10,5549	0,5673	13,3297	0,5648	6,7844	0,5711	9,3477
4 ciclo	0,7170	10,7909	0,4668	13,7415	0,4358	6,9264	0,4643	10,0289
8 ciclo	0,7749	34,9169	0,3557	15,0723	0,3557	7,1974	0,3998	10,5064
12 ciclo	0,4975	11,7535	0,3689	15,1595	0,3678	6,8382	0,3718	10,1836
16 ciclo	0,2973	11,9797	0,2932	15,3560	0,2952	6,8130	0,2854	11,7795
20 ciclo	0,2829	12,7745	0,2049	14,8641	0,1781	5,8594	0,1972	11,9253
24 ciclo	0,3127	10,9099	0,1717	18,3360	0,1712	8,2987	0,2184	12,6137
28 ciclo	0,3059	11,7807	0,1927	14,1431	0,1777	7,0220	0,1835	11,2817
32 ciclo	0,3861	11,4244	0,1518	16,6206	0,1919	7,7936	0,2731	12,9599
36 ciclo	0,3714	9,5684	0,2317	15,9909	0,2380	7,1482	0,2550	13,7857
40 ciclo	0,3624	12,6419	0,2253	16,6488	0,2296	7,6779	0,2322	15,6073
44 ciclo	0,3199	12,1400	0,2023	16,9721	0,2177	7,5963	0,2337	14,3527
48 ciclo	0,3217	12,9041	0,2218	16,0897	0,2220	6,4468	0,2142	14,4739
50 ciclo	0,3633	13,4212	0,2150	17,5931	0,2143	8,6454	0,2353	13,7921
54 ciclo	0,2460	13,7181	0,2110	16,0052	0,2287	7,3165	0,2226	14,5593
58 ciclo	0,2128	12,6108	0,1944	16,1867	0,1653	7,6183	0,2120	12,8707
62 ciclo	0,2030	12,7941	0,1710	16,3214	0,1512	7,4717	0,1525	13,4493
66 ciclo	0,1858	12,4387	0,1351	16,4190	0,1446	7,5703	0,1491	13,0449
70 ciclo	0,1612	13,0947	0,1252	15,1657	0,1289	7,7963	0,1377	12,5521
74 ciclo	0,1110	10,9387	0,1426	16,3193	0,1177	5,8199	0,1207	14,1880
78 ciclo	0,0999	13,3142	0,0724	16,2540	0,0807	7,8164	0,0824	13,8826
82 ciclo	0,1384	13,5729	0,0827	14,9632	0,0717	5,8556	0,0796	14,4748
86 ciclo	0,1632	11,8642	0,1043	15,1246	0,0975	5,8433	0,0976	11,5037

Os resultados demonstram que o coeficiente de variação é menor em relação ao CC com menores coeficientes de difusão por ciclo e idade de cura.

Em uma análise unidimensional maiores coeficientes de difusão indica redução nas propriedades mecânicas e de durabilidade (HASSANI et al., 2020). Neste estudo, comparando a profundidade de penetração do íon cloreto do CAA em relação ao CC os resultados menores do coeficiente de difusão estão de acordo com menores resultados da penetrações. Em relação a idade de cura, tem-se menores penetrações na idade de 28 dias de cura para valores próximos de D_w para 5, 7 e 28 dias de cura.

Verificou-se que nos últimos ciclos (Tabela 23 e 24) há um aumento no coeficiente de difusão gerado provavelmente, por um aumento na permeabilidade relacionado com o aumento do tamanho dos poros e microfissuras causadas pela entrada do agente agressivo com o tempo. Isto indica a redução das condições de durabilidade do material.

Para avaliar os resultados do coeficiente de difusão de cloretos (variável dependente) em ambos os concretos nos testes experimentais foram realizados uma análise de variância multifatorial (ANOVA) considerando os fatores cura em quatro categorias e tipo de concreto em duas. A Tabela 25 apresenta fatores analisados na análise de variância multifatorial (ANOVA) para o coeficiente de cloretos para 86 ciclos (aproximadamente 2 anos de ciclos de secagem e molhagem).

Em adição, foram realizados testes de comparação de médias Honestly Significantly Different (HSD) de Tukey a 1% de probabilidade de erro.

Tabela 25 - Análise de variância multifatorial (ANOVA) para coeficiente de difusão de cloretos para 86 ciclos.

Efeitos Principais	Razão F	Valor- P
A: Concreto	73,07	0,0000
B: Cura	2,48	0,0690
Interações		
AB	3,56	0,0191

Os valores de P testam a significância estatística de cada um dos fatores para o coeficiente difusional de íons cloreto. Como os valores de 2P são menores que

0,05 esses fatores têm um efeito estatisticamente significativo na difusão, com um nível de confiança de 95,0%.

Os efeitos encontrados para o coeficiente de cloretos confirmam que para o tipo de concreto há uma grande variabilidade nas amostras. A Tabela 26 apresenta as interações encontradas para os fatores analisados.

Tabela 26 – Interações da Análise de variância multifatorial (ANOVA) para coeficiente de difusão de cloretos para 86 ciclos

Tipo de Concreto	Idade de Cura			
	3 dias	5 dias	7 dias	28 dias
CC	Ba	Ba	Bb	Ba
CAA	Ab	Aab	Aa	Aab

As letras iguais, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não possuem diferença significativa de acordo com o teste HSD de Tukey ($p < 0,01$).

Na Tabela 26, apresentam-se as comparações múltiplas entre os tipo de concreto, em razão a idade de cura (3, 5 7 e 28 dias) respeitando-se às interações que se mostraram significativas, segundo a ANOVA multifatorial.

Os dados indicam que, de um modo geral, para o coeficiente de difusão os valores do CC são superiores para todas as idades de cura em relação ao CAA.

A idade de cura de 7 dias possui maior valor do D_w nas amostras de CC. Já para o CAA o valor de D_w é superior para a idade de cura de 3 dias. Em relação às outras idades de cura para CC e CAA as médias se mostram estatisticamente iguais.

A análise múltipla mostra interações significativas, onde a cura tem influência no processo de difusão do grupo amostral.

No CC o valor da maior transferência de massa, ou seja, maior coeficiente difusional, se dá aos 7 dias de cura, isto porque provavelmente, devido ao aumento da resistência da solução pelo maior transporte dos íons cloretos (ORAZEM e TRIBOLLET, 2017).

Para o CAA o coeficiente de difusão foi maior aos 3 dias de cura por ser a menor idade do processo que foi confirmado nos resultados dos diagramas de Nyquist e Bode.

5.2.8 Caracterização da porosidade

A avaliação da porosidade foi feita primeiramente através da taxa de absorção por imersão, índice de massa e massa específica determinada através da norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 2009) para CC e CAA aos 28 dias de cura.

Os resultados são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados de Absorção de água, Índice de Vazios e Massa Específica

	CC	CAA
Absorção de água por imersão (%)		
Media	5,4394	5,6012
Desvio Padrão	0,1180	0,2774
Coeficiente de Variação	2,1686	4,9520
Índice de Vazios (%)		
Media	12,0539	11,9988
Desvio Padrão	0,2393	0,5170
Coeficiente de Variação	1,9848	4,3087
Massa Específica Real (g/cm³)		
Media	2,5199	2,4349
Desvio Padrão	0,0031	0,0336
Coeficiente de Variação	0,1240	1,3812

A massa específica real menor no CAA indica que as amostras do CAA possuem menor massa por volume sendo uma propriedade física importante nas propriedades dos fluidos. O CAA possui menor massa do fluido por volume da amostra.

Segundo a ABNT: NBR 9778 (ABNT, 2009), a absorção de água, expressa em porcentagem, representa a porosidade do concreto, devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco. Pelos resultados da absorção de água por imersão, apesar da porosidade dos dois tipos de concretos serem muito próximos aos 28 dias de cura, o CAA possui valores inferiores ao CC. Verifica-se que se pode classificar o concreto com uma qualidade média de acordo com os critérios propostos pela CEB 192 (1989).

Em relação ao índice de vazios, os resultados para CC e CAA são praticamente iguais aos da absorção, dada a relação direta entre estas duas variáveis. Como se trata de amostras com a mesma resistência mecânica, esses valores são próximos para os dois concretos.

No que diz respeito à massa específica, foi observado que o CC possui uma massa específica 3,7% maior em relação ao CAA.

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade baseado na norma NBR 9779 (ABNT, 2012) são apresentados na Figura 93.

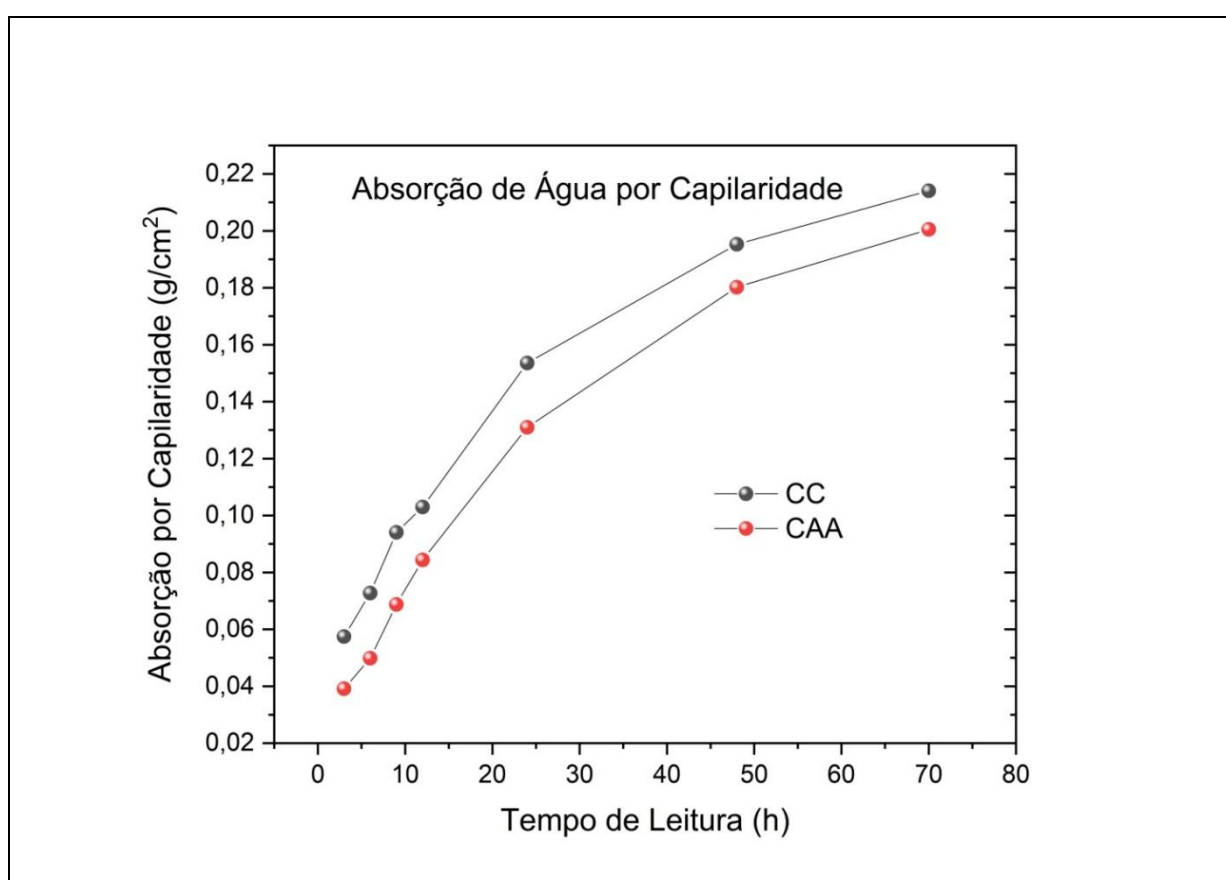


Figura 92 - Curva de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

Os resultados da Curva de absorção de água por capilaridade são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados de Absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

CC		3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h	70 h
	Média	0,0575	0,0727	0,0941	0,1030	0,1536	0,1953	0,2141
	Desvio Padrão	0,0070	0,0083	0,0083	0,0124	0,0268	0,0398	0,0322
	Coeficiente de Variação	12,1442	11,4499	8,8538	12,0219	17,4395	20,4006	15,0359
CAA								
	Média	0,0392	0,0498	0,0688	0,0844	0,1310	0,1802	0,2005
	Desvio Padrão	0,0095	0,0119	0,0086	0,0113	0,0061	0,0018	0,0050
	Coeficiente de variação	24,1451	23,9467	12,4398	13,3416	4,6396	0,9994	2,4693

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade indicam que o CC possui maior porosidade e permeabilidade. Sabe-se que a maior taxa de absorção de água por capilaridade entre materiais cimentícios indica maior interconectividade dos poros do concreto e conseqüentemente a maior porosidade e capacidade de permeabilidade (COPPIO et al., 2019).

A medição em 72 horas mostra que as absorções em função do tempo de exposição ao filete de água possuem o mesmo comportamento em ambos os concretos apenas confirmando que o CAA é menos poroso, que já foi verificado nos coeficientes de difusão.

As amostras foram ensaiadas sem submetê-las nos ciclos de secagem e molhagem, ou seja, sem causar pelos ciclos o processo de degradação no concreto.

Logo as características e o comportamento capilar podem ser usados como referência, onde houve uma significativa alteração na porosidade, ou seja, uma diminuição dos poros capilares pela substituição do tipo de concreto sem modificações nas condições.

O comportamento do CAA produzidos com cimento Portland CPV-ARI são próximos ao comportamento do CAA de referência do trabalho de SANTOS (2016).

Os resultados de absorção total, índice de vazios e massa específica dos CAA quando sob cura ambiente a 28°C são aproximadamente, 4%, 9% e 2,5 g/cm³ para um concreto com fcj de 80 MPa aos 28 dias de cura.

O aumento observado neste estudo de 40% e 30% da absorção total e índice dos vazios, respectivamente, em relação ao estudo de Santos (2016),

provavelmente é devido ao dobro da resistência mecânica das amostras de concreto no trabalho de Santos (2016). A massa específica deste estudo não sofreu grandes variações em relação ao trabalho de Santos (2016) mesmo com grandes mudanças na resistência mecânica. Esse resultado reflete o efeito filler no CAA que favorece a compacidade da mistura, diminuindo assim os vazios permeáveis contidos no material.

Os resultados da análise de adsorção de nitrogênio (B.E.T) para o grupo amostral são apresentados na Tabela 29.

As amostras foram ensaiadas após aproximadamente um ano (445 dias) das amostras estarem submetidas ao processo de aceleração, logo apresenta o efeito dos ciclos de secagem e molhagem e o efeito da penetração dos íons cloreto.

Tabela 29 – Resultados de análise de adsorção de nitrogênio (BET) para os tipos de concreto e diferentes idades de cura

	Idade de Cura	BET Área Superficial (m²/g)	Tamanho de Poro (Å^o)
Concreto convencional	3 dias (1C)	3,3450	219,92
	5 dias (2C)	7,6656	216,82
	7 dias (3C)	7,4910	133,26
	28 dias (4C)	3,1255	216,09
Concreto Auto adensável	3 dias (5A)	3,8363	228,89
	5 dias (6A)	4,0055	206,96
	7 dias (7A)	5,2085	187,87
	28 dias (8A)	1,7416	281,21

Os resultados da Tabela 29 apresentados para a obtenção da superfície específica do CC e CAA nas diferentes idades de cura cooperaram para os resultados encontrados nos dados eletroquímicos e coeficiente de difusão, onde no CC a menor área superficial é aos 28 dias, sendo esta redução aproximadamente 60% em relação a cura de 7 dias.

Se compararmos os resultados do B.E.T de 28 dias para 3 dias de cura no CC verifica-se que a redução é menor, em torno de a 8%.

Esses dados confirmam os resultados encontrados para D_w no CC onde para as amostras aos 28 dias de cura tem-se o menor coeficiente de difusão do que nas amostras de 5 e 7 dias, sendo estas levemente superiores aos três dias (44 ciclos).

Além disso, os resultados do B.E.T para o CAA (Tabela 29) demonstra que após um ano do processo de aceleração, os maiores resultados da área superficial são encontrados na cura de 7 dias e os menores aos 28 dias de cura.

Algumas alterações nos resultados do D_w podem ser devido ao tipo de cura, sendo a cura úmida. No procedimento de cura da norma diretiva NBR 5738 (ABNT, 2015) os corpos de prova cilíndricos de concreto são armazenados até o momento do ensaio em solução saturada de hidróxido de cálcio a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Este procedimento recomendado foi executado nos quatro grupos amostrais. O hidróxido de cálcio presente na solução altera a cinética e termodinâmica da reação de hidratação, onde o meio de agressão pode alterar possíveis mudanças em longo prazo no volume sólido (SHAH et al., 2018).

Este resultado demonstra que a porosidade e o seu inverso (relação sólido/espaco) estão relacionados à resistência e a permeabilidade do material.

Analisando o comportamento da resistência elétrica (R_p) para o CC (Figura 89) nos 44 ciclos, verificamos que para o CC o valor do R_p superior é para a idade de cura de 28 dias, sendo para as curas 3, 5 e 7 dias valores bem próximos indicando alteração em sua microestrutura e permeabilidade na idade de 28 dias.

Já para o CAA (Figura 90) no mesmo período (44 ciclos - 1 ano) a resistência elétrica dos 5, 7 e 28 dias de cura são semelhantes diferenciando apenas os de 3 dias, que possui menor área superficial (Tabela 29).

O comportamento do CC e CAA nas idades de cura para a resistência (Figura 89 e 90) após o período de 1 ano de ciclos de aceleração (44 ciclos) pode ser devido há alteração em sua porosidade. Sabe-se que em vazios não saturados há uma aceleração na difusão sob um gradiente de concentração e umidade (BU e WEISS, 2014).

Outra explicação está na correlação positiva entre o transporte de água (parâmetros k e C) e o raio de poro e uma correlação negativa com a área de superfície específica. A relação entre permeabilidade e estrutura de poros pode ser descrita pela equação Carmen-Kozeny que expressa a permeabilidade em função

do tamanho dos poros (BEAR, 1988; DULLIEN, 1992), onde a permeabilidade é inversamente proporcional a área superficial específica (DEL CURA, 2006).

O menor tamanho de poro é encontrado com a cura aos 7 dias (Tabela 30) para CC e CAA. Alterações no tamanho do poro aos 28 dias indica modificações na morfologia dos concretos, que não é evidencia no coeficiente de difusão (D_w).

As tortuosidades e constrições limitam o poro efetivo e o espaço disponível para transporte de massa. As diferenças relacionadas nas estruturas dos poros e as capacidades de transporte de massa distintas nos CC e CAA reforçam a conclusão da variação de acordo com a idade de cura (WIEDENMANN, et al., 2013).

5.2.9 Caracterização do Caráter Cristalino

Nesta etapa do trabalho serão apresentados os difratogramas do concreto convencional e concreto auto adensável para 3, 5, 7 e 28 dias de cura após 665 dias de processo de aceleração das amostras (2 anos de ciclos).

As amostras dos concreto CC e CAA para as análises do caracter cristalino foram retiradas a meia altura dos corpos de prova, em torno de 1 cm de profundidade.

A Figura 94 apresenta o difratograma para a cura de 3 dias para ambos os concretos.

O CAA mostra a presença de hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio, magnésio, sulfato de potássio, dolomita, entre outros produtos de hidratação do cimento como a etringita, aluminato tricálcio, silicato dicálcio e silicato tricálcio. No CC, além das fases de hidratação do cimento e produtos do clínquer, encontramos a fase cloroaluminato de cálcio (Sal de Friedel), resultado da adição do sal (NaCl) à solução onde os corpos de prova ficaram imersos, formado através da ligação hidratos na presença de Cl^- .

A presença destes cloretos no cimento acaba por corroer a barra de aço embutido no concreto e possui nestes compostos uma influência mais negativa no material do que o cloreto de potássio (KCL) ou cloreto de sódio (NaCl) (ZHU et al, 2009).

Para as demais idades de cura (Figuras 95, 96 e 97) não há evidência da formação de fases relacionadas a algum hidrato de NaCl no CC.

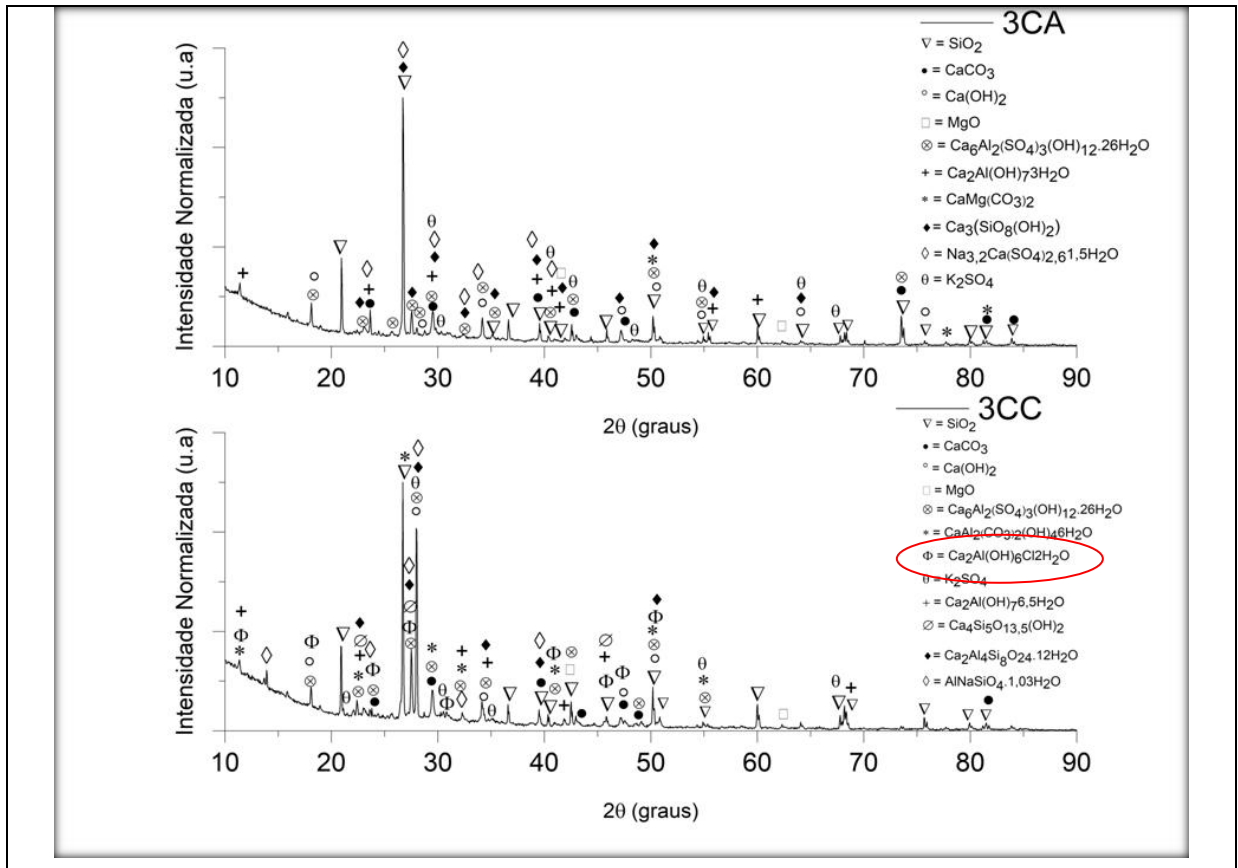


Figura 93 - Difratoograma de Raio X comparativo dos concretos CAA (CA) e CC 3 dias de Cura 2 anos de Ciclos.

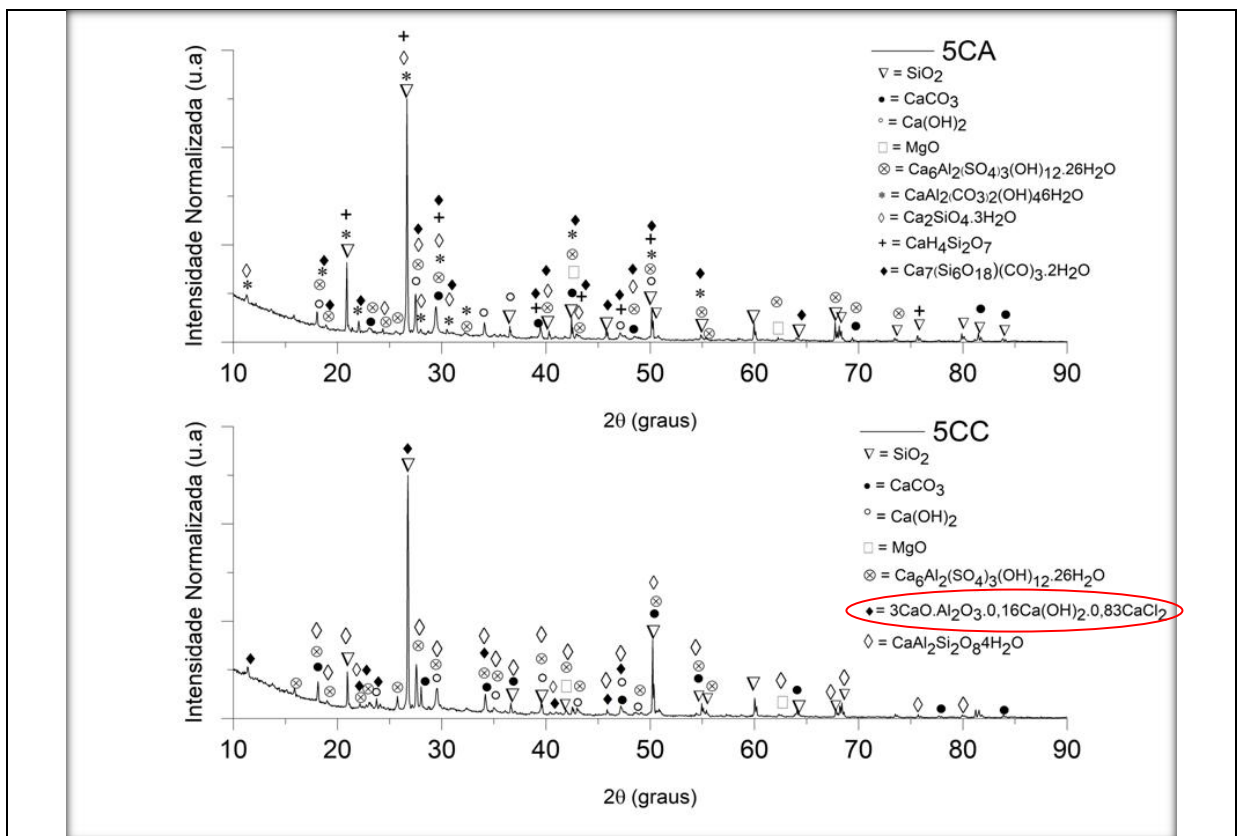


Figura 94 - Difratoograma de raio X comparativo dos concretos CAA (CA) e CC 5 dias de Cura 2 anos de Ciclos.

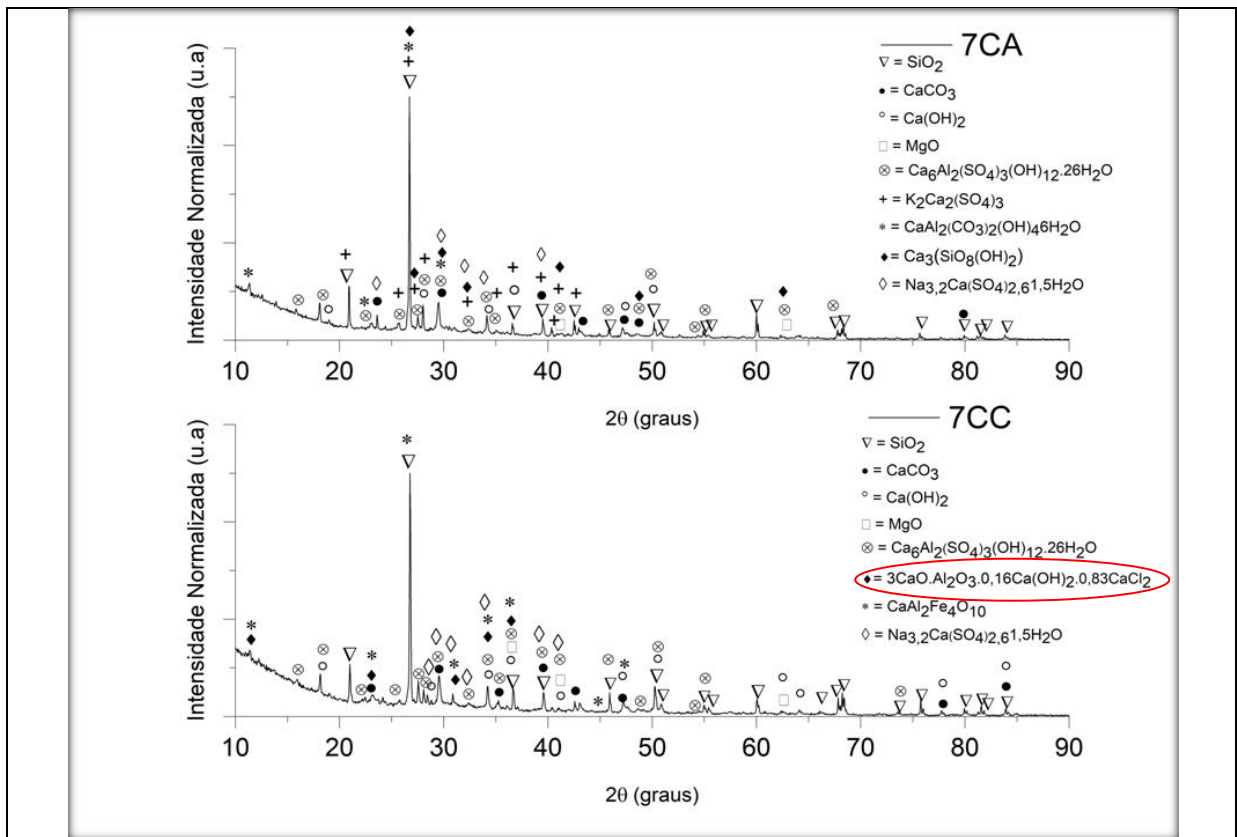


Figura 95 - Difratoograma de raio X comparativo dos concretos CAA (CA) e CC 7 dias de Cura 2 anos de Ciclos.

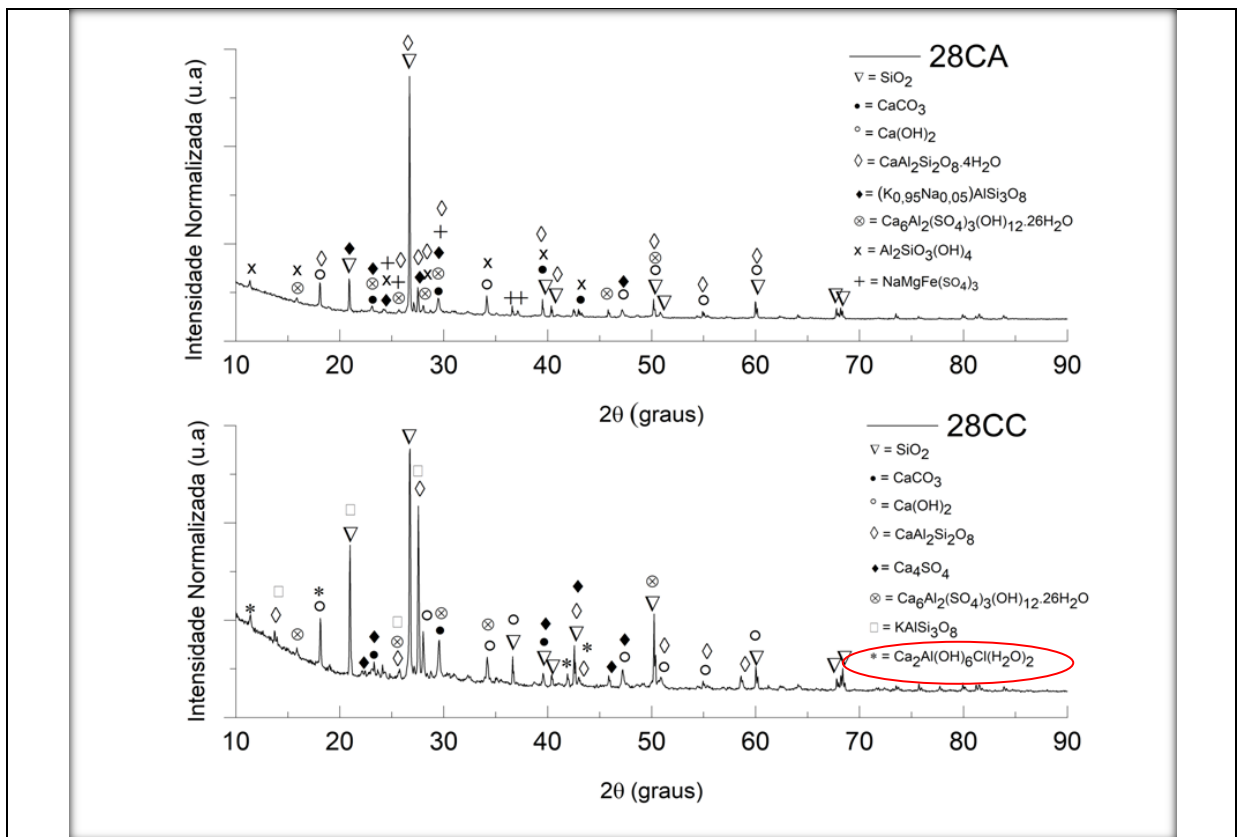


Figura 96 - Difratoograma de raio X comparativo dos concretos CAA (CA) e CC 28 dias de Cura 2 anos de Ciclos.

Os íons cloreto em materiais à base de cimento podem ser imobilizados por ligação química, com a formação de sais de cloroaluminato, onde a quantidade de sais de cloroaluminato reflete a quantidade de íons cloreto ligados (Chen et al, 2020; LIU et al, 2020).

O resultado indica que no CC há a formação de cloroaluminatos independente do tempo de cura para o período de exposição de dois anos aproximadamente. Os poros conectados neste concreto provavelmente propiciaram o transporte de íons cloreto e sua fixação do cloreto (WANG et al., 2017; YANG et al., 2020).

Analisando a migração dos íons cloreto no interior das amostras de CAA, através do cálculo do coeficiente de difusão, verifica-se que a redução de porosidade no material afeta o transporte destes íons ao interior da amostra. O aumento na taxa de cimento e possível diminuição na tortuosidade corroboram com a redução da presença dos mesmos, resultando em um maior desempenho do material no que tange a redução do teor de cloretos e fixação do mesmo, uma vez que o canal livre para o transporte dos íons, dada as referidas modificações, é bloqueado (JERÔNIMO E MEIRA, 2018).

A tortuosidade é um parâmetro complexo, geralmente descrito como um espaço poroso percolante que controla as propriedades de transporte em pastas de cimento. Condutividade elétrica menor indica uma tortuosidade maior, ou seja, um caminho mais longo o pode causar menores movimentos de vários íons no material. No entanto, esta relação não apresenta total confiabilidade em seus resultados (GHODDOUSI, e SAADABADI, 2018).

Logo a redução do coeficiente de difusão dos íons cloreto e ausência de sal de Friedel no CAA não pode estar relacionada a sua menor tortuosidade.

A resposta do transporte de massa pode ser na influência das substâncias químicas presentes no concreto, como o aditivo superplastificante, que não permitiram, no período analisado, a formação do sal de Friedel. Ou no volume de poros reduzido onde o canal para o transporte de íons foi bloqueado.

Para a análise quantitativa da quantidade presente de ion Cl^- insolúvel como a formação de sal de Friedel foi utilizado a medida de intensidade dos padrões de DRX (UM, 2019).

O efeito da ligação do cloreto pode ser considerado um problema na difusividade, onde a incorporação desta prevê a entrada do íon no concreto (LI et al., 2019).

Nas Figuras 94 a 97 os resultados dos padrões de difração referentes a formação de sais de cloroaluminato foram apresentados. Com isso, foi realizado o refinamento dos parâmetros estruturais pelo método de Rietveld com objetivo de verificar a intensidade dos padrões apresentados bem como o seu comportamento em diferentes ângulos de difração (RIETVELD, 1967).

O tamanho de cristalito foi determinado utilizando a equação de Sherrer (h) (Equação 39) para obtenção de uma análise qualitativa dos sais de cloroaluminato.

$$h = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (39)$$

Onde λ é o comprimento de onda dos raios-x, θ o ângulo de espalhamento, β é a largura a meia altura dos padrões de difração no gráfico e k o fator de forma do cristalito, sendo o mesmo considerado esférico.

Os dados de largura a meia altura, assim como a posição dos padrões de difração foram obtidos experimentalmente com auxílio de software gráfico Origin (Originlab 2018).

A Tabela 30 apresenta a distâncias interplanares (2θ) e o tamanho de cristalito para o CC nas diferentes idades de curas.

Tabela 30 – Posição dos Padrões de Difração e tamanho de cristalito do plano

		2θ	Cristalito		2θ	Cristalito	
3CC	1	4,3837	0,41122	5CC	1	9,05587	0,756899
	2	18,09432	68,25937		2	22,14	0,755758
	3	25,6386	3,236382		3	23,04	1,360165
	4	27,42812	1,702182		4	23,8	2,767945
	5	28,58524	2,456783		5	26,74927	69,04919
	6	40,3406	153,5159		6	34,1867	42,31027
	7	44,37617	5,891097		7	39,69822	0,219143
	8	44,3764	0,19302		8	45,87148	893,9129
	9	54,05633	0,339958		9	47,22331	38,36007
7CC		2θ	Cristalito	28CC		2θ	Cristalito
	1	5,26947	0,448315		1	11,4	0,113129
	2	26,77338	59,92637		2	18,12	3,133093
	3	30,87316	102,342		3	41,9	3,723877
	4	34,18	0,684909		4	43,01	4,226266
	5	36,63	0,152581				

Os resultados demonstram que à medida que aumenta a idade de cura das amostras diminui a quantidade de posições de padrões de difração com a presença sais de cloroaluminato. Para os corpos de prova com idade de cura de 28 dias apresenta-se um número menor de padrões de difração se comparado com os outros corpos de prova com três dias de cura.

Para padrões de difrações próximos o tamanho do cristalito aumenta, indicando uma diminuição de intensidade, ou seja, quanto mais cristalino, menor a largura/meia altura com menor penetração de cloretos no grupo amostral.

5.2.10 Análise Química e Morfológica

5.2.10.1 Análise Química

A partir da técnica do EDS, acoplada no MEV, obtém-se as Figuras 98 a 105 realizada nas amostras após 665 dias (2 anos de ciclos) de exposição a solução salina para os dois tipos de concreto e diferentes idades de cura.

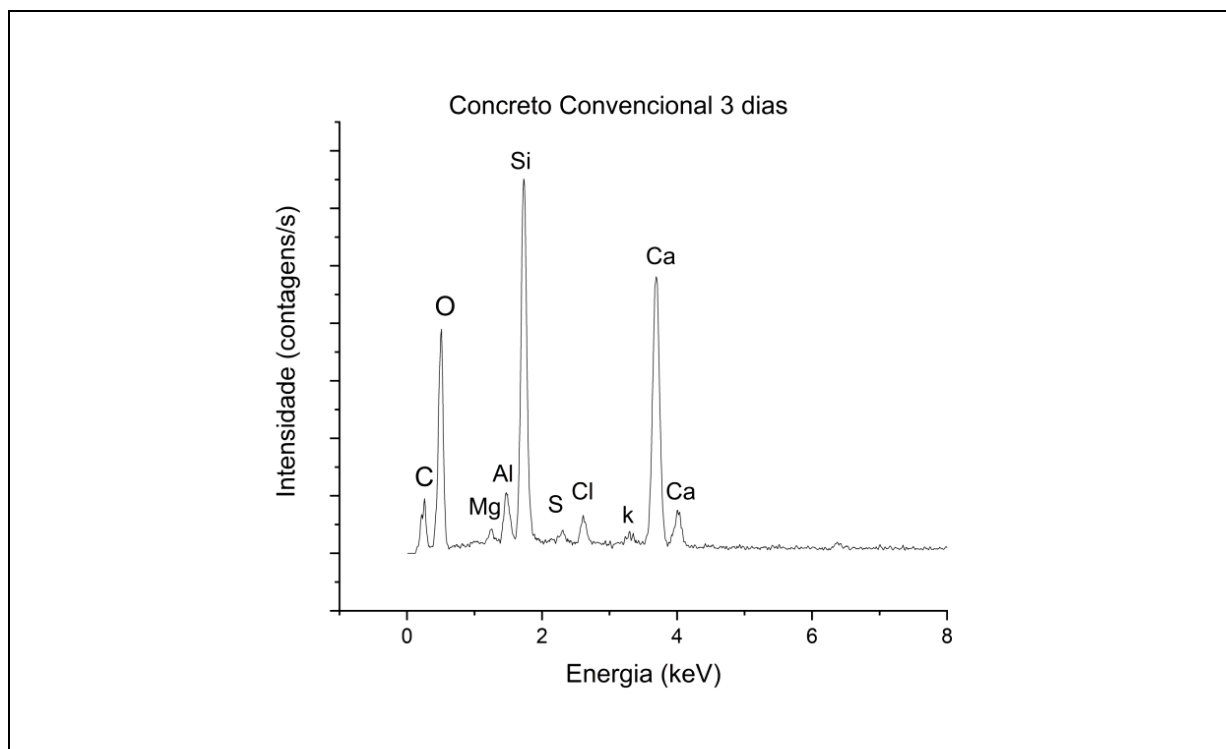


Figura 97 - Composição Química do CC aos 3 dias de Cura 2 anos de Ciclos

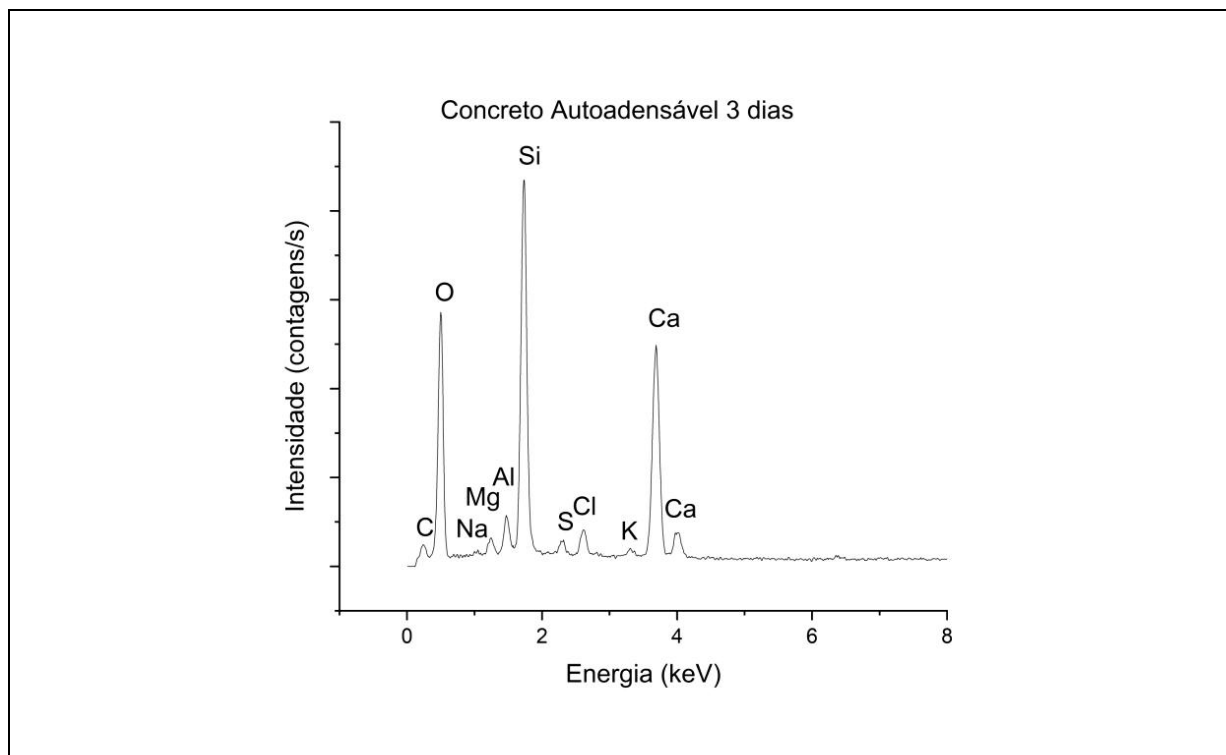


Figura 98 - Composição Química do CAA aos 3 dias de Cura 2 anos de ciclos.

A composição química elementar do CC e CAA para 3 dias de cura após o processo de aceleração é praticamente a mesma: C, O, Mg, Al, Si, S, Cl, e Ca, apenas diferindo com um pequeno pico de Na.

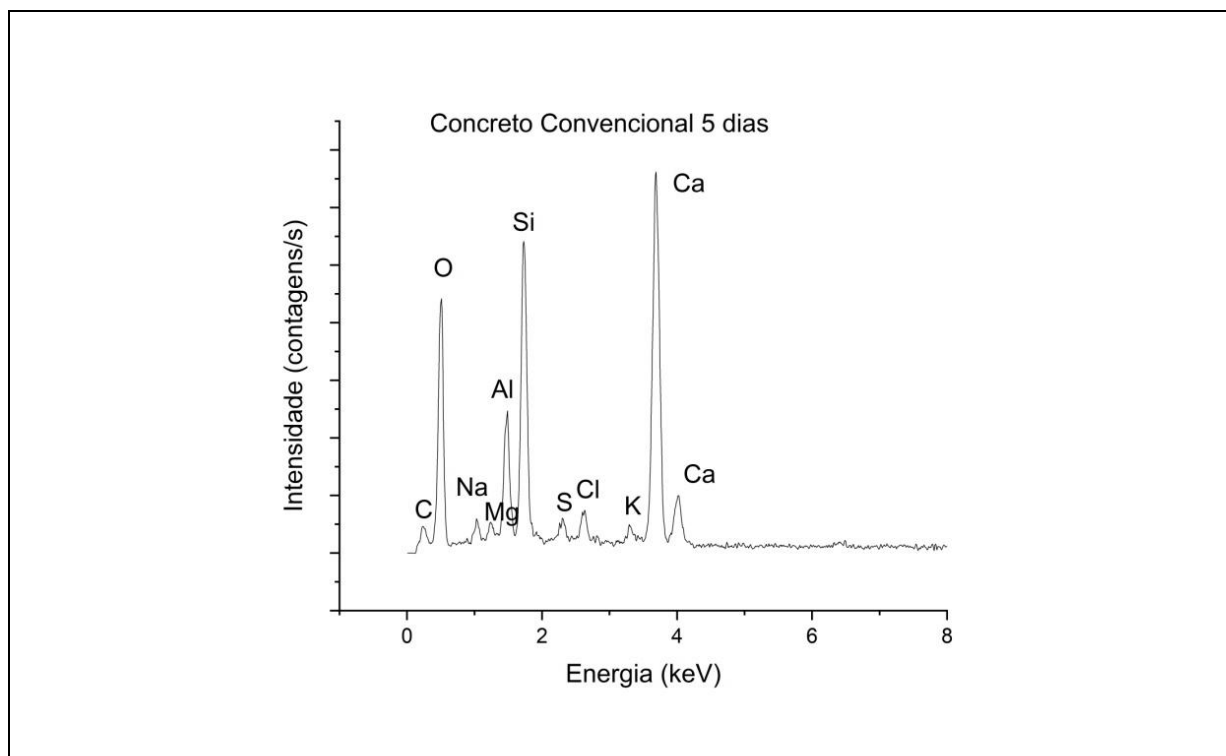


Figura 99 - Composição Química do CC aos 5 dias de Cura 2 anos de ciclos.

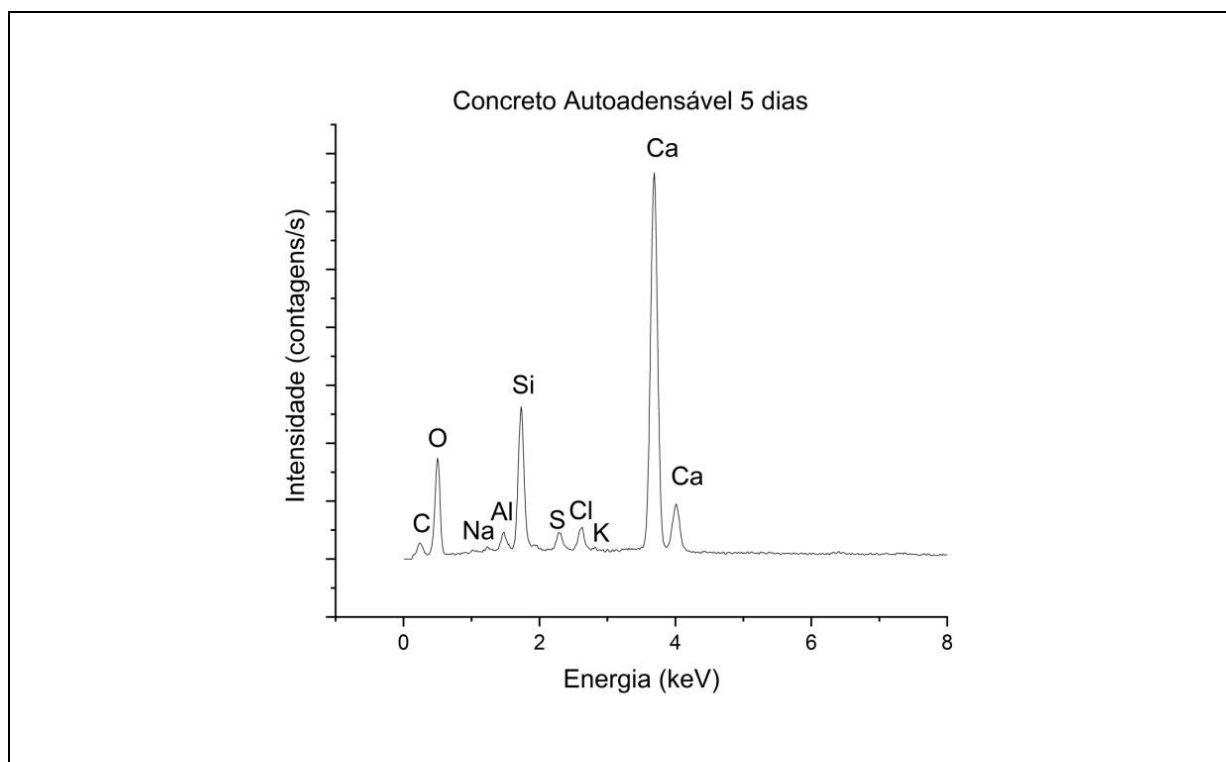


Figura 100 - Composição Química do CAA aos 5 dias de Cura 2 anos de ciclos.

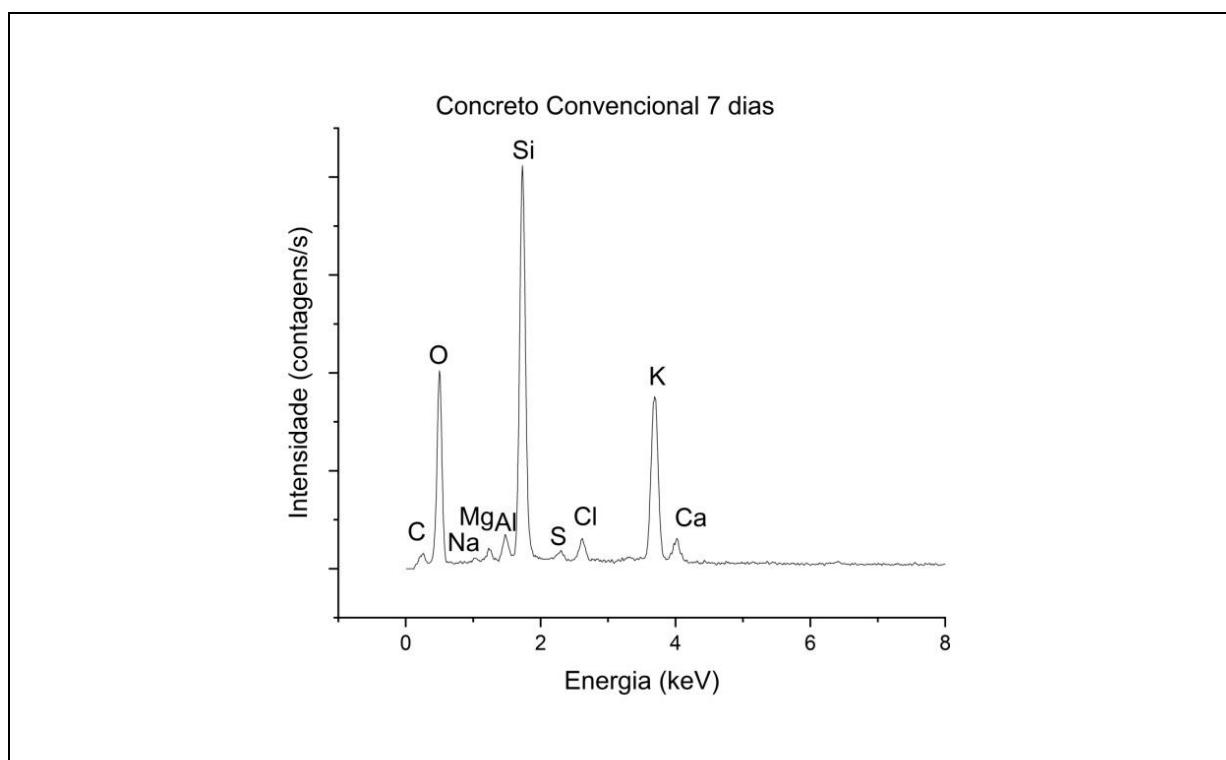


Figura 101 - Composição Química do CC aos 7 dias de Cura 2 anos de ciclos.

Verifica-se que o elemento sódio, devido à baixa percentagem presente nas amostras seu pico não aparece em alguns espectros.

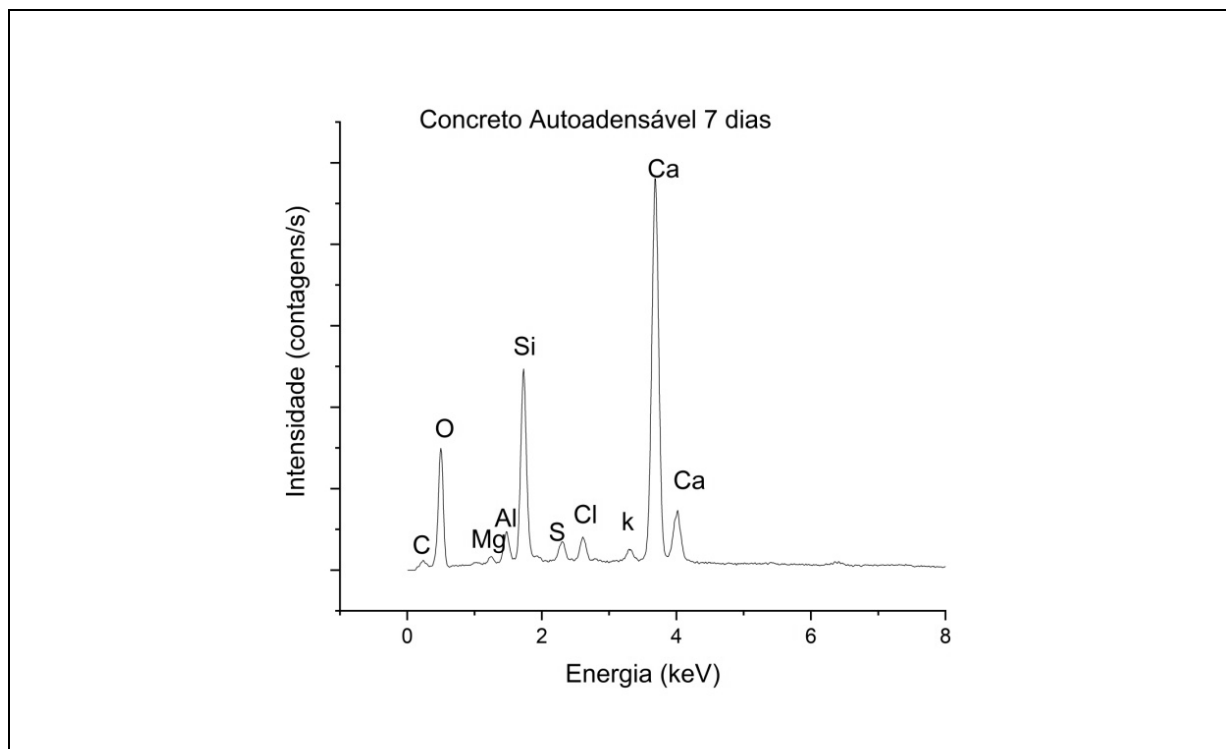


Figura 102 - Composição Química do CAA aos 7 dias de Cura 2 anos de ciclos.

Comparando as Figuras 98 a 103, verifica-se que o pico de cálcio se torna mais expressivo com aumento da idade de cura no CAA em relação ao pico de silício que no CC é o elemento com maior intensidade.

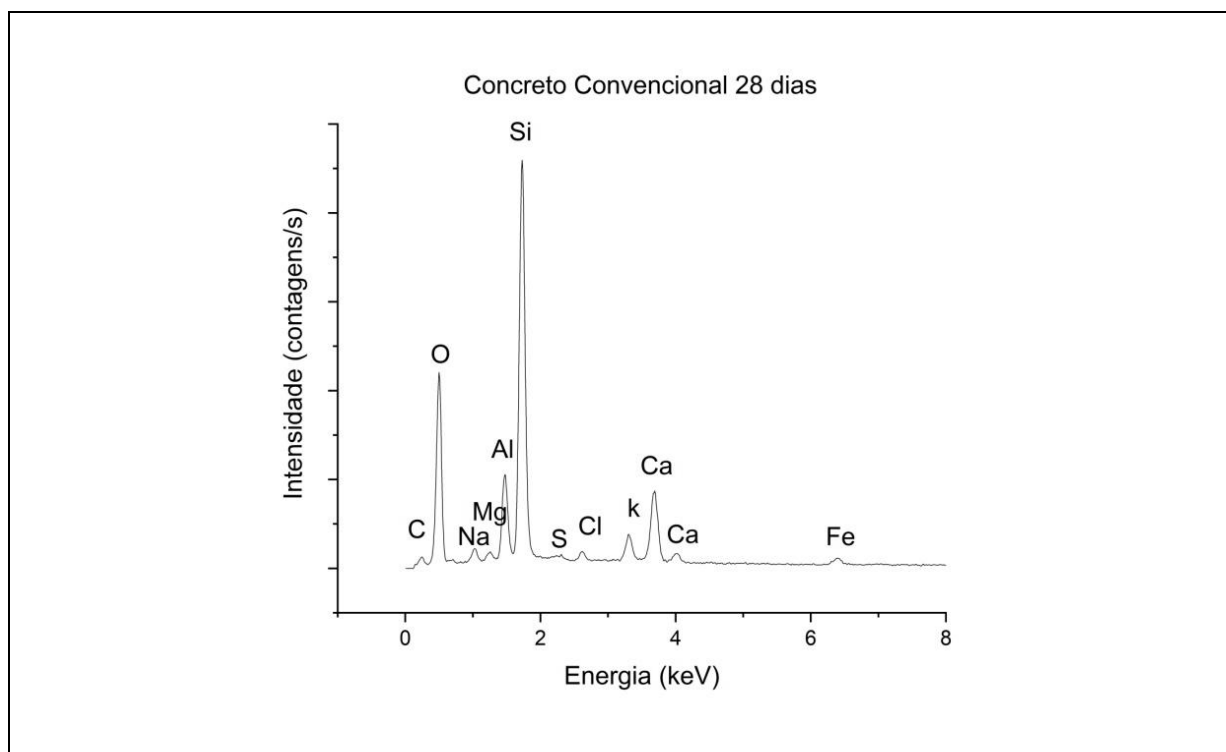


Figura 103 - Composição Química do CC aos 28 dias de Cura 2 anos de ciclos.

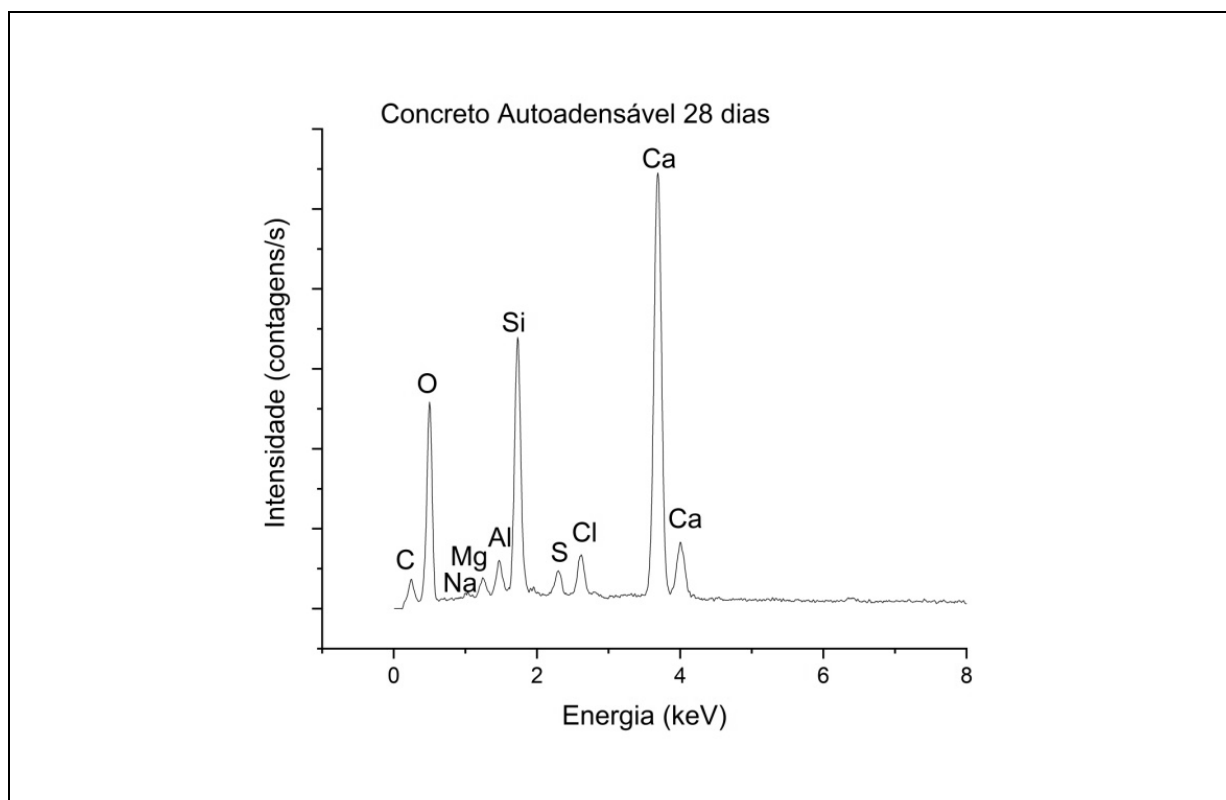


Figura 104 - Composição Química do CAA aos 28 dias de Cura 2 anos de Ciclos

A varredura de superfície do EDS foi realizada para a distribuição elementar onde nas Figuras 98 a 105 demonstram a presença dos íons cloreto nas amostras.

Em comparação com os dados do DRX, nas amostras de CAA a fase formada com o cloreto, fase de cloroaluminato (sal de Friedel), não é consolidada devido a provável não ocorrência de ligação química do cloreto no material.

Foi relatado que esta ligação está relacionada a formação da fase de cloroaluminato, onde os íons cloreto podem ser efetivamente imobilizados como resultado da formação da fase FS. A ligação física do cloreto está relacionada à estrutura e quantidade de Gel C - S - H. A relação dos íons Ca/Si afeta a capacidade de ligação do cloreto no material e, geralmente, quanto menor a relação Ca/Si menor a capacidade de formação do cloroaluminato (LIU et al., 2020).

A resposta da presença e concentração dos cloretos pode também ser confirmada pelos métodos químicos, método colorimétrico onde os perfis demonstram a presença do Cl^- .

Métodos químicos úmidos, como o colorimétrico, são mais frequentemente empregados para determinar as concentrações de cloreto nos materiais obtido através da retificação de perfis onde os íons podem se acumular na camada difusa da C-S-H não sendo adsorvido diretamente nas fases, ele se comportará de maneira

semelhante aos íons adsorvidos competitivamente (PLUSQUELLEC e NONAT, 2016).

As concentrações de Ca aumentam no CAA. Sabe-se que o coeficiente de migração dos íons Cl^- são mais baixos no CAA que no CC. HEMSTAD (2020) menciona que a química da solução de poros desempenha um papel importante na condutividade elétrica dos íons além do pH da solução. Como as amostras foram submetidas às mesmas condições, verifica-se que o aumento de Ca na distribuição elementar pode ter grande influência na não formação do sal de Friedel.

Em termos de fixação de cloretos, três aspectos devem ser considerados: ligação física, ligação química e resistência à migração (QU et al., 2018). A ligação física pode ser explicada onde o cloreto é adsorvido fisicamente por produtos de hidratação com enorme área de superfície. A ligação química envolve as reações entre os íons de cloreto e fase monosulfato tipo AFm para formar os sais de Friedel (cloroaluminatos). A resistência à migração pode ser alcançada através do refinamento da estrutura de poros bloqueando a migração do canal – comportamento difusional (WANG et al, 2013).

No comportamento difusional de íons cloreto (processo físico de penetração) no concreto imerso em soluções salinas, sabe-se que o tipo de cátion possui grande influência nas capacidades de ligação do cloreto, que diminuem na ordem $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+ \approx \text{K}$, enquanto os coeficientes de difusão diminuem na ordem $\text{K}^+ \approx \text{Na}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} \approx \text{Na}$. Além disso, a capacidade de ligação do cloreto no concreto no processo de difusão natural é um processo complexo onde os tipos de cátions e a duração do contato tem significativa importância.

Como a penetração de íons cloreto através do concreto é um processo lento e não pode ser determinado diretamente em um curto espaço de tempo, a técnica de resistividade elétrica possui proporções e resultados confiáveis para a correlação da resistência do material a entrada do cloreto (BJEGOVIĆ et al. 2015).

As medidas do R_p é uma avaliação em função da porosidade e da composição química da solução nos poros revelando diferenças entre as condições de cura como verifica-se nos resultados (Figura 89 e 90).

O transporte de íons cloreto na pasta de cimento deve continuar com o tempo, pois embora a difusão de íons seja um processo muito lento, ocorre continuamente com o tempo, onde as alterações na microestrutura começam a ocorrer, resultando na redução do coeficiente de difusão do íon cloreto.

5.2.10.2 Análise Morfológica

Para as amostras iniciais de CC e CAA aos 28 dias de cura (idade referência normatizada), foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura e microanálise EDS.

A Figura 106 e 107 refere-se ao CC enquanto a Figura 108 e 109 ao CAA.

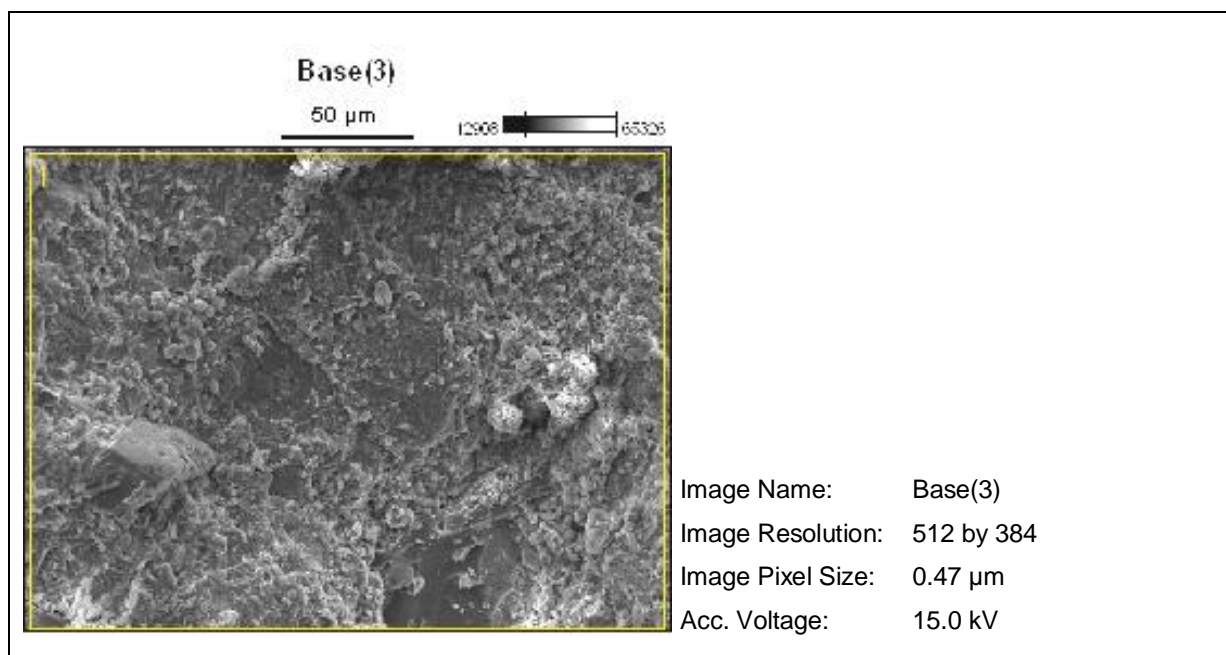


Figura 105 - Micrografia do CC aos 28 dias de Cura Idade Inicial.

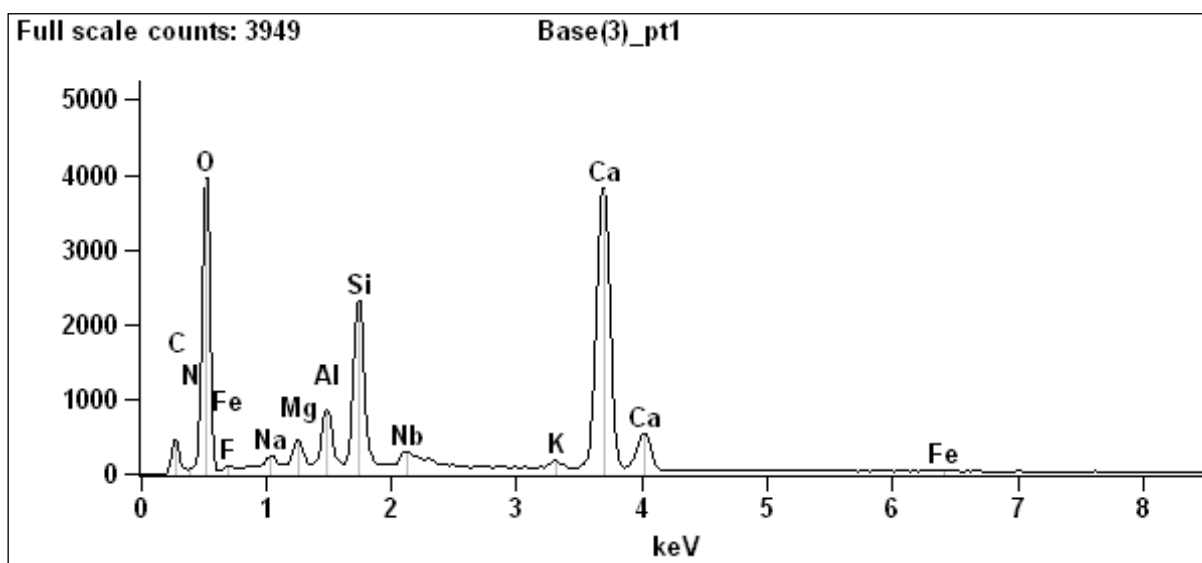


Figura 106 - EDS correspondente a Micrografia do CC aos 28 dias de Cura Idade Inicial.

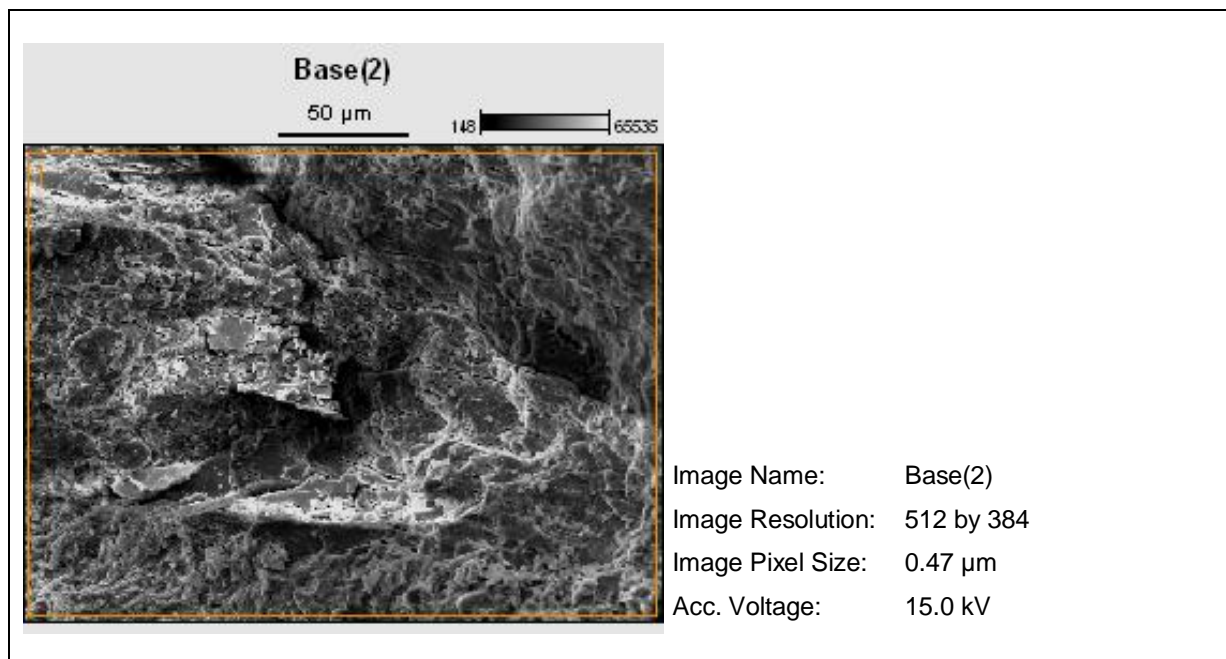


Figura 107 - Micrografia do CAA aos 28 dias de Cura Idade Inicial.

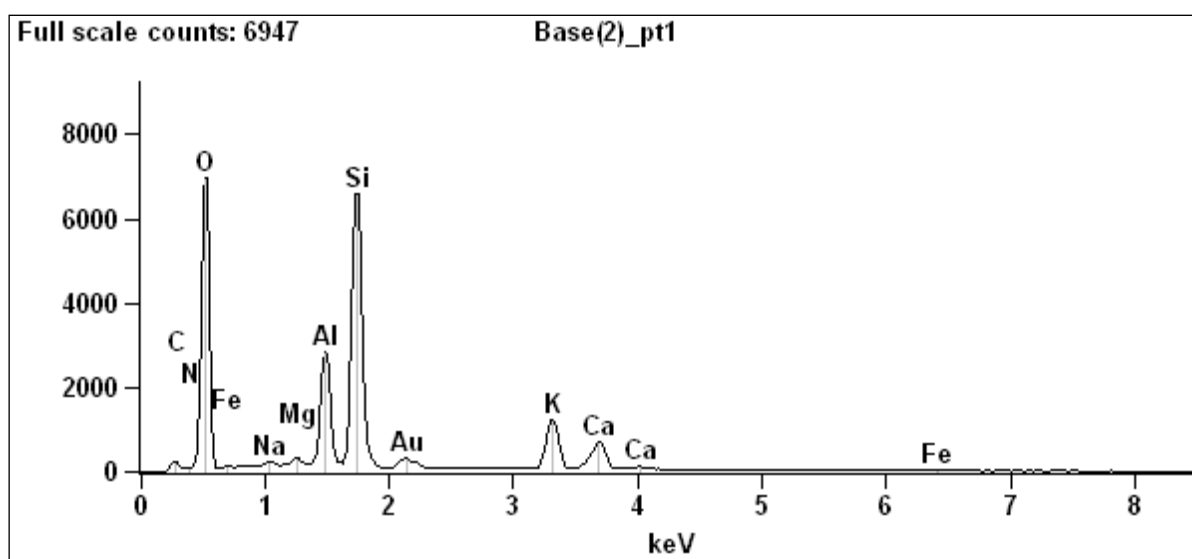


Figura 108 - EDS correspondente a Micrografia do CAA aos 28 dias de Cura Idade Inicial.

Comparando as Figuras 107 e 109 verifica-se a ausência do cloro, que nos EDS da idade de 2 anos são presentes em todas as amostras de CC. Em 28 dias de cura, o número de cristais angulares de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) na pasta e a forma desenvolvida de gel C-S-H estão presente no espaço poroso, com uma massa mais densa e menos porosa no CAA. A distribuição de estrutura dos poros é irregular e complexa no CC (Figura 106).

Na imagem a mudança de coloração mostra locais da onde o cimento ainda não está hidratado, havendo mais material não hidratado no CC (Figura 106).

A porosidade obtida por análise de imagem (MEV) teve a mesma ordem de magnitude tanto no CC como no CAA, onde geralmente para o CAA deveria ser mais baixa a porosidade.

Porém, sabe-se que as observações por MEV não possuem uma resolução suficientemente fina para quantificar porosidade (FARES et al., 2010).

A composição química das amostras de CC e CA aos 28 dias de cura são mostrados na Tabela 31.

Tabela 31 - Composição química do concreto convencional (CC) e do concreto com aditivo (CAA) % de peso

Óxidos	CC (% em peso)	CAA (% em peso)
SiO₂	32,34	33,55
CaO	30,76	32,73
K₂O	16,68	14,86
Al₂O₃	15,10	14,36
Fe₂O₃	4,59	3,94
TiO₂	0,24	0,23
SrO	0,12	0,12
MnO	0,09	0,09
SO₃	0,04	0,08
ZrO₂	0,03	0,04
Rb₂O	0,02	0,02
ZnO	-	0,01
CO₂	0,01	-

Na análise química existiu quimicamente diferenças entre os compostos gerados aos 28 dias, apesar de se tratar de concretos executados com a mesma matéria prima. Esta diferença provavelmente se dá pela presença do aditivo, dos finos e da mudança de reologia do material. Verificou-se alterações principalmente no óxido de cálcio e óxido de potássio.

A inibição natural do concreto evitando a quebra do filme de passivação nas barras na presença de cloreto está relacionada entre outros fatores, a sua composição química, principalmente a concentração de óxido de cálcio (CaO) (GLASS et al. ,2000). Observa-se na Tabela 31 que a porcentagem do óxido de cálcio é maior no CAA.

Como foram produzidas as amostras de CC e CAA com os mesmos materiais na mesma relação água/cimento e condição de cura para atingir a grau de

resistência mecânica de f_{cj} 40 MPa, sabe-se que as condições de resistividade elétrica e processo difusional apresentam resultados diferenciados devido as diferentes condições de transporte de íons, e não as propriedades dos materiais que compõem ambos os concretos estudados.

As Figuras 110 a 117 apresentam as micrografias do concreto convencional e concreto auto adensável para 3, 5, 7 e 28 dias de cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

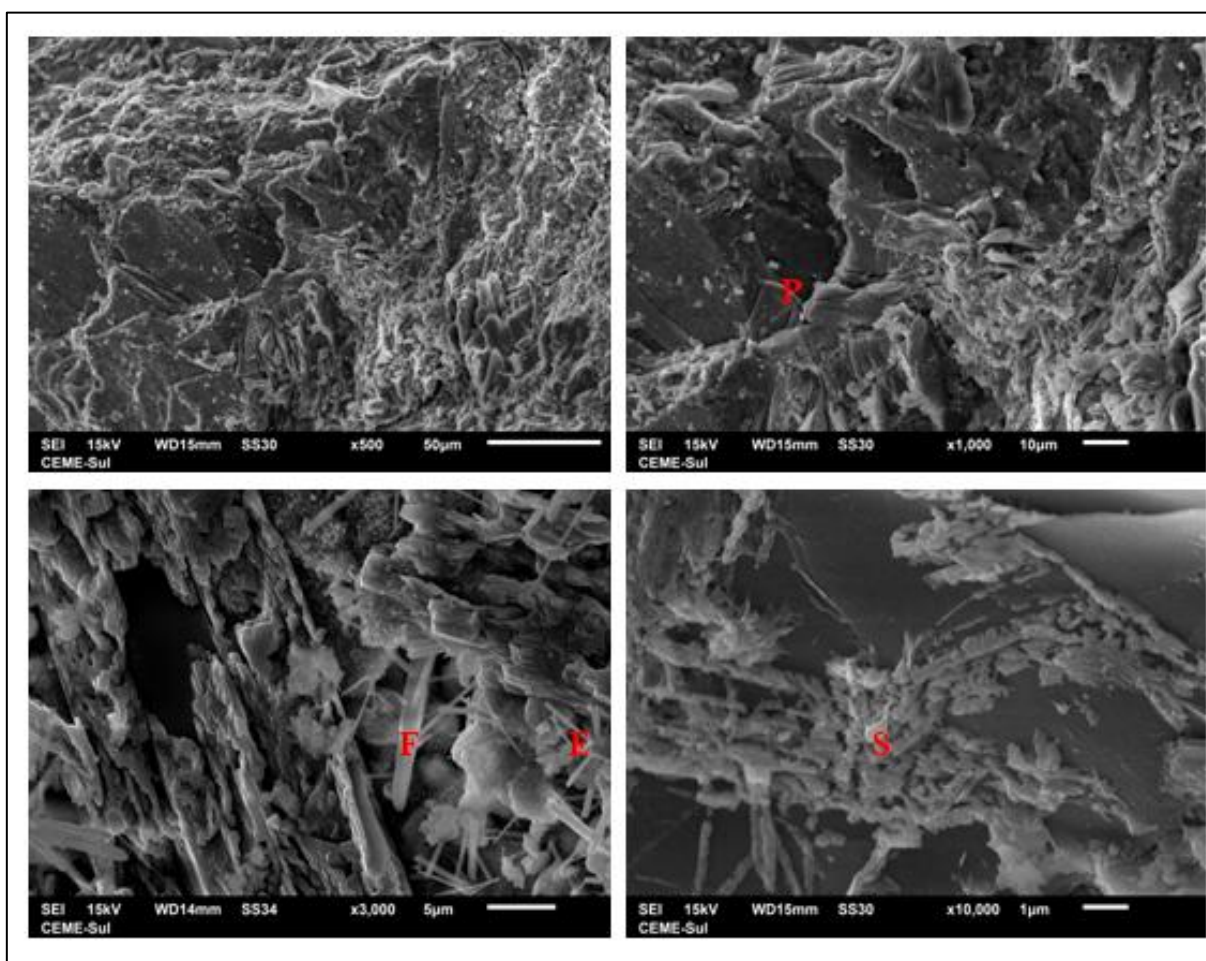


Figura 109 - Micrografia do CC aos 3 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

As imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresentam as fases de etringita (E) ($(Ca_6.Al_2.(SO_4)_3.(OH)_{12}.26(H_2O))$), portandita (P) ($Ca(OH)_2$), e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (S), além da formação do sal de friedel (F) (MELO E MELO, 2009; LUO et al., 2003; GUIRGUIS et al., 2018; SMRATI E PRADHAN, 2019).

A incorporação dos íons cloreto no concreto promovendo a formação do sal de Friedel altera a sua tortuosidade, deixando os mais tortuosos e com porosidade descontínua (WEE E SURYAVANSHI, 2000).

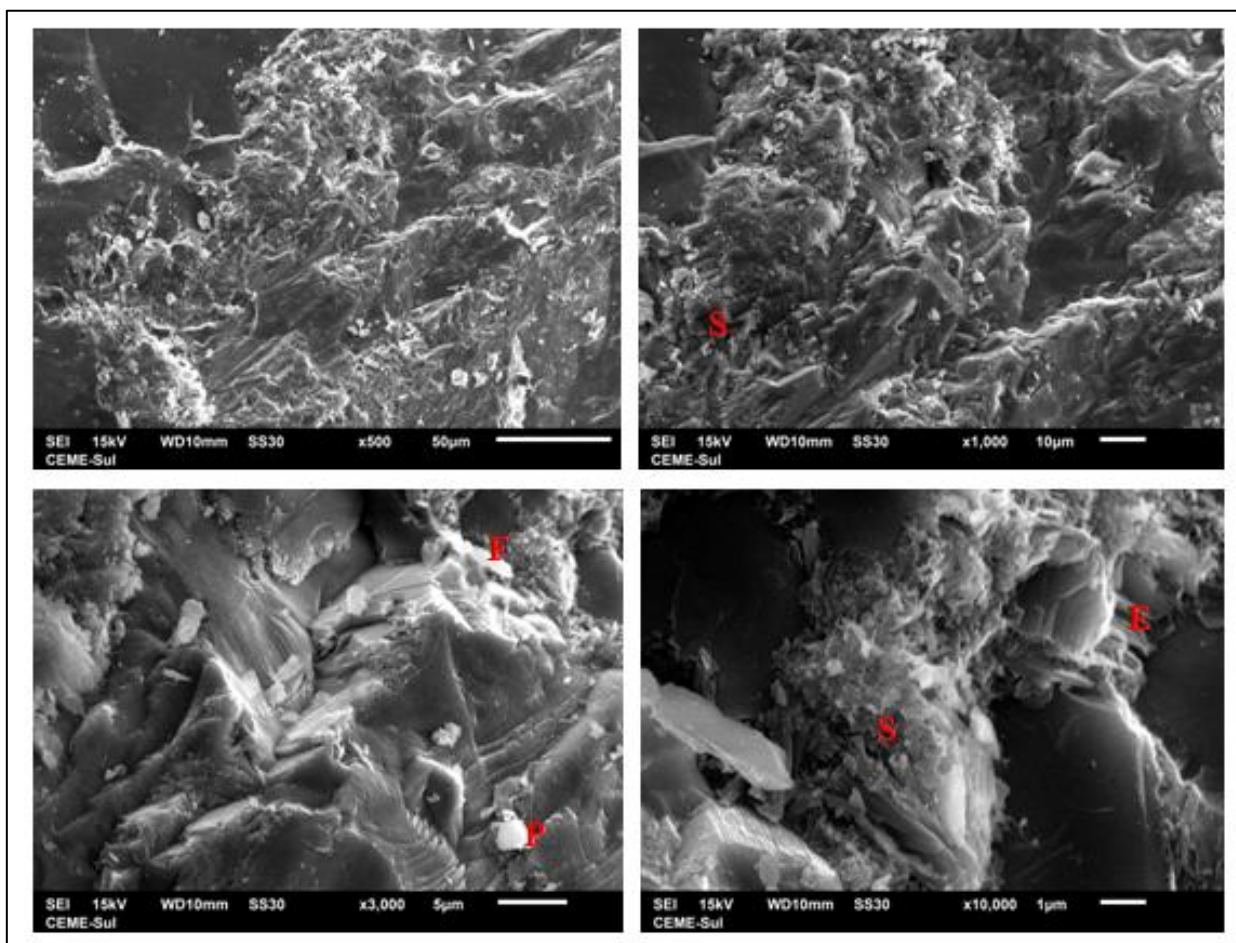


Figura 110 - Micrografia do CC aos 5 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

Por outro lado, os danos provocados pela migração de íons cloreto no concreto e o estresse expansivo do sal de Friedel levam a uma difusão não-linear de íons cloreto, onde novos estudos mostram que danos à corrosão podem ocorrer no concreto devido a formação de sal de Friedel durante o processo de difusão (XU et al., 2020).

A mudança na estrutura dos poros afeta o comportamento da migração dos íons cloreto e os danos contínuos com a formação do sal afetando o coeficiente de difusão de íons cloreto. Além disso, a formação de sal de Friedel consiste em um processo de fixação dos cloretos não os deixando livres para ficarem na forma de íons dispersos na água do poro do concreto.

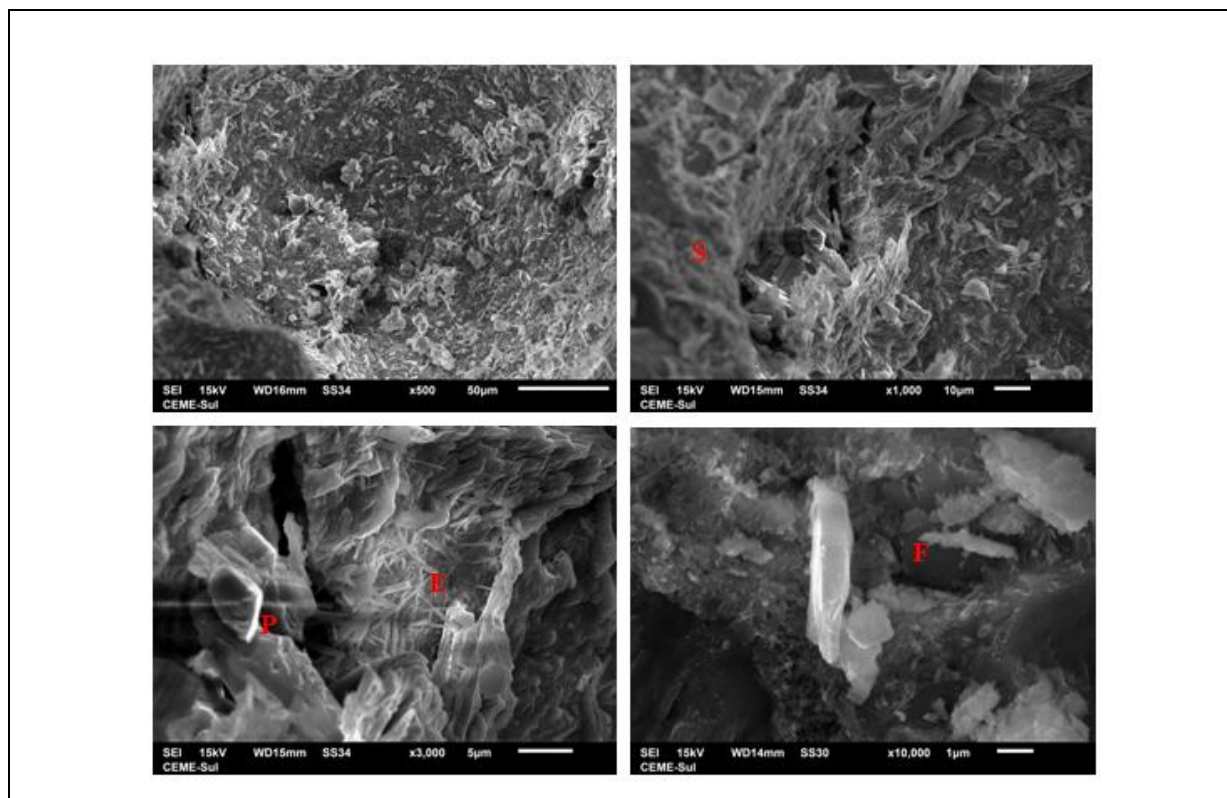


Figura 111 - Micrografia do CC aos 7 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

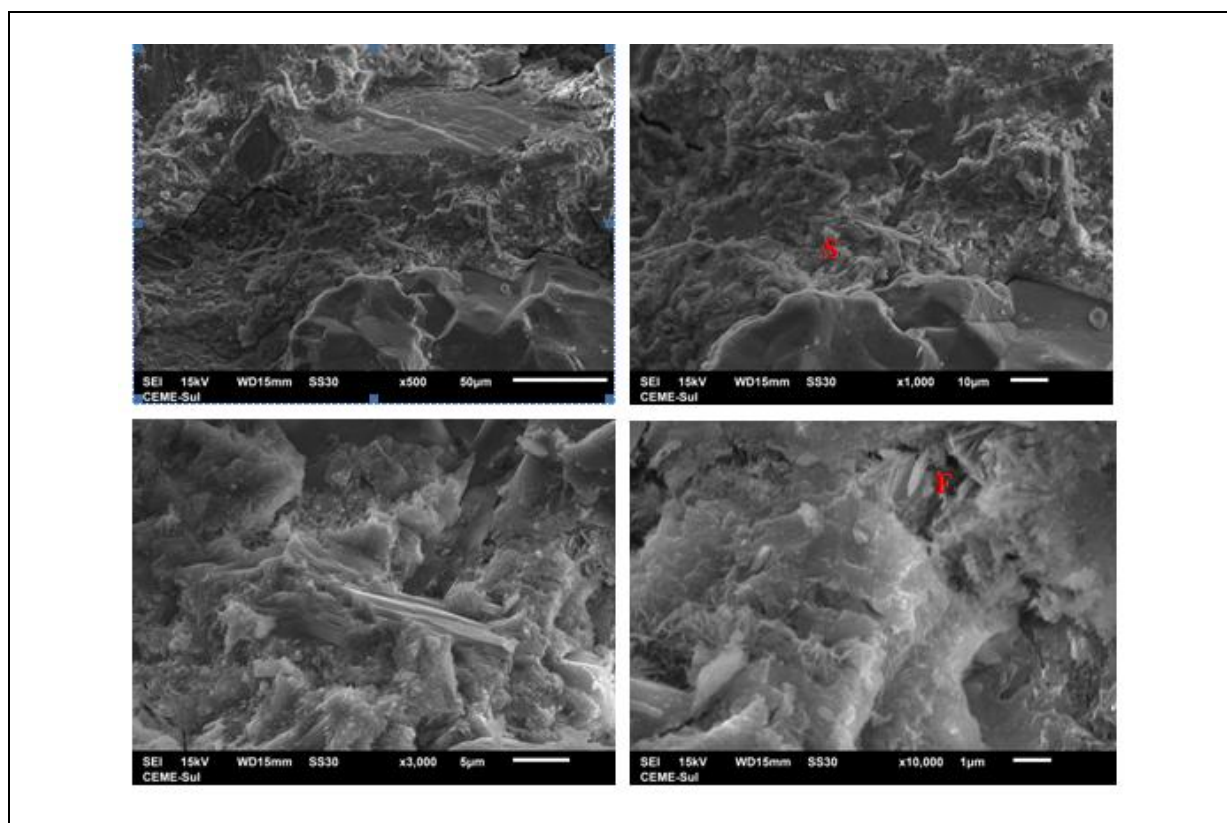


Figura 112 - Micrografia do CC aos 28 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

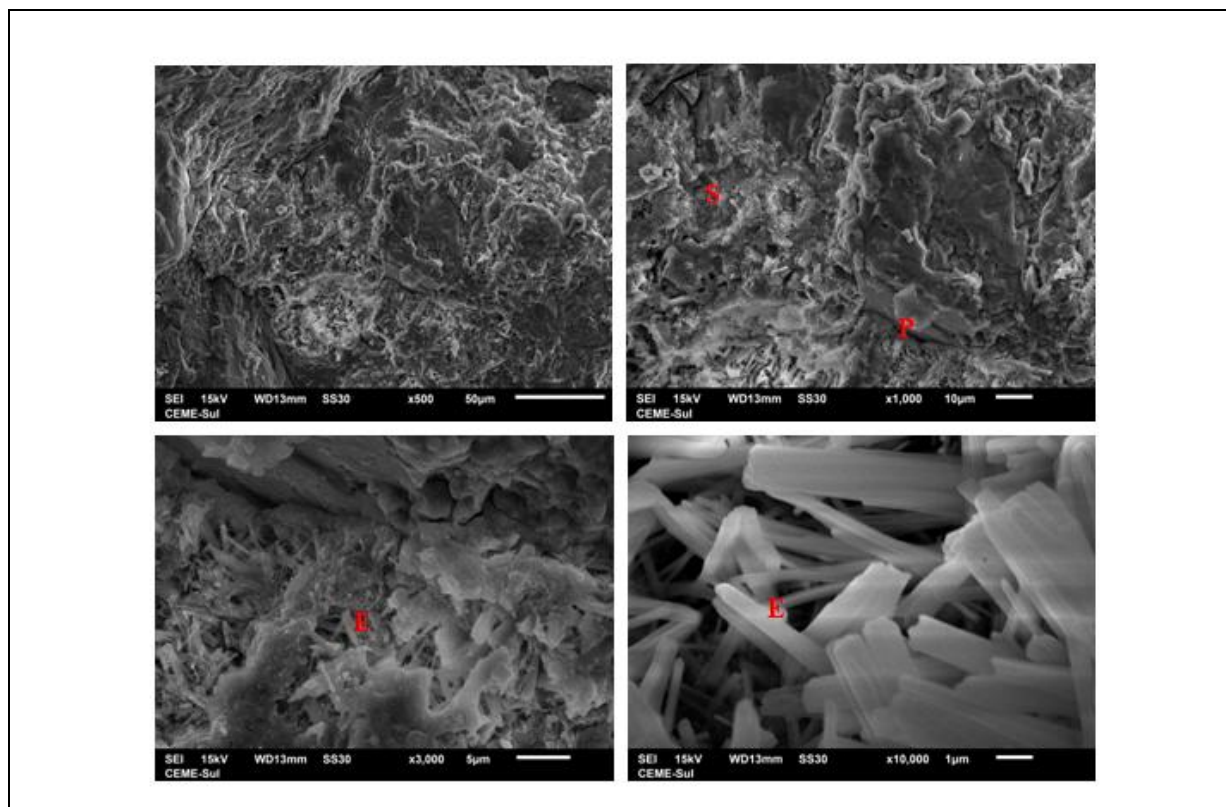


Figura 113 - Micrografia do CAA aos 3 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

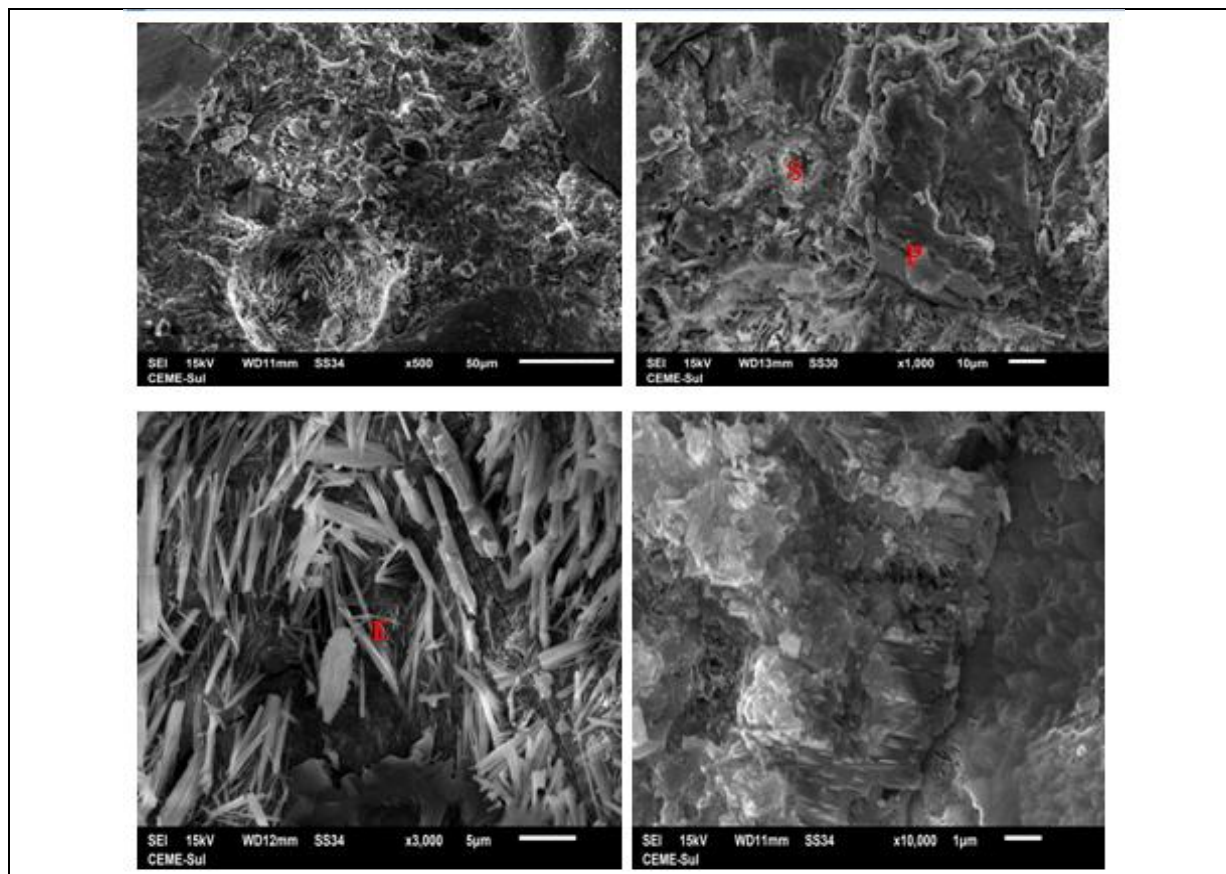


Figura 114 - Micrografia do CAA aos 5 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

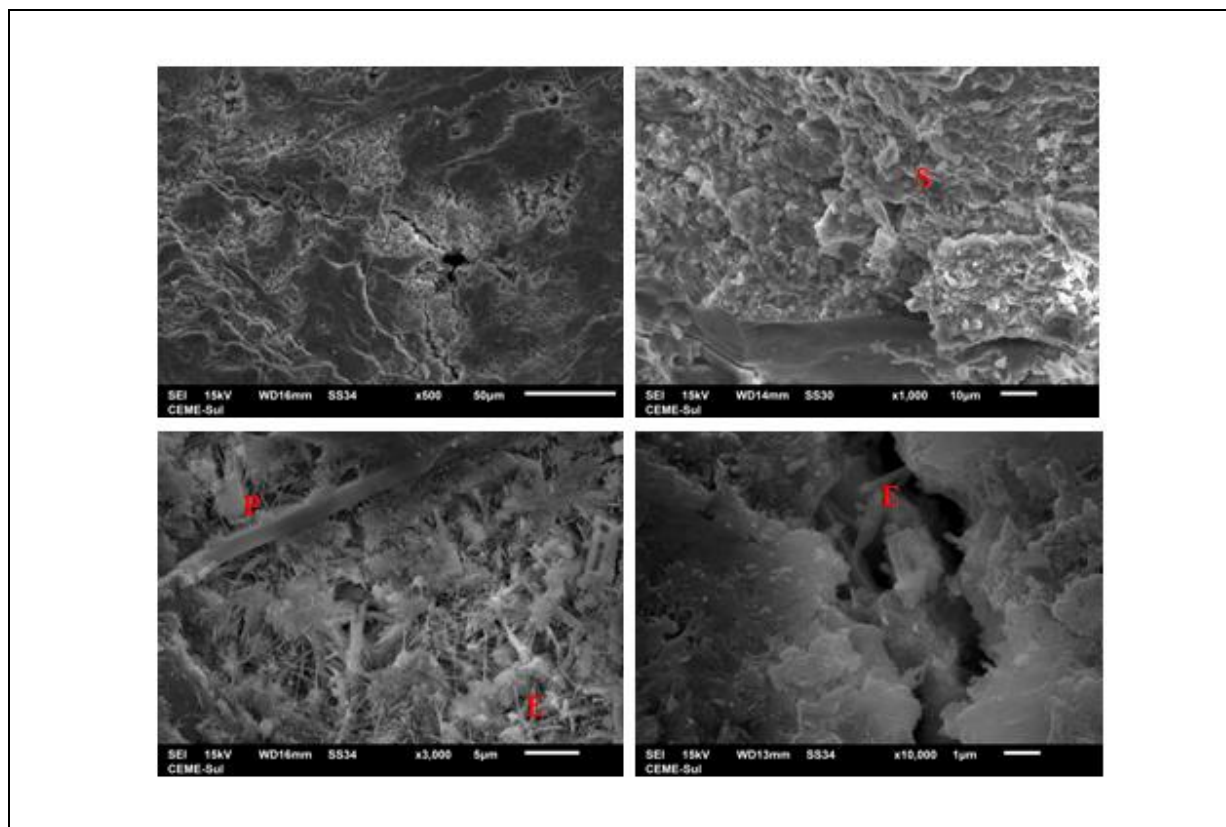


Figura 115 - Micrografia do CAA aos 7 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

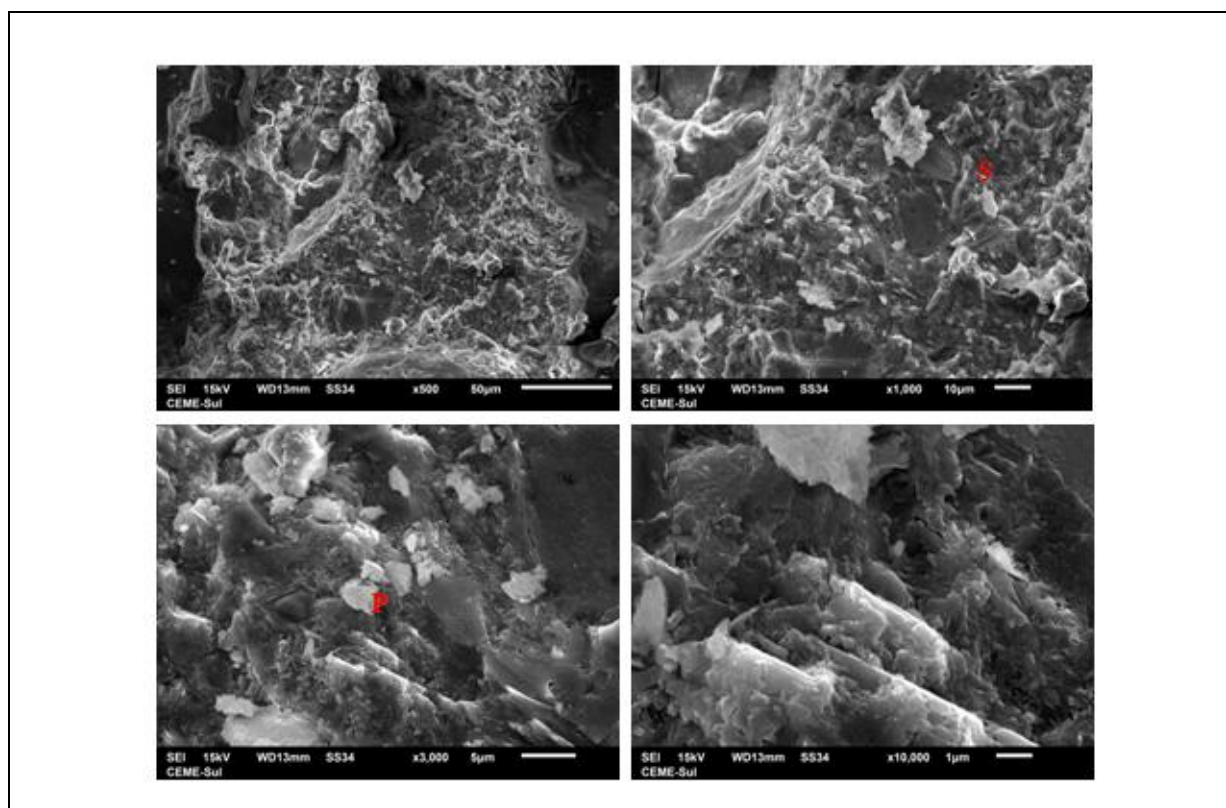


Figura 116 - Micrografia do CAA aos 28 dias de Cura após 665 dias de ciclos das amostras (2 anos de ciclos).

As análises dos resultados das micrografias mostram, após 2 anos de ciclo de secagem e molhagem, uma microestrutura densa com as fases dos produtos de hidratação do cimento. Os resultados confirmam a presença do sal de Friedel apenas no CC na idade de 665 dias de processo de aceleração.

A influência dos íons cloreto é atribuída ao efeito da ligação química na forma de sal onde há o preenchimento dos poros da etringita primária e uma perda de massa nas menores idades de cura (JAIN E PRADHAN, 2020).

Verifica-se que nas idades de cura de 3 dias do CC (Figura 110) há a presença do sal de Friedel (F) não presente no CAA (Figura 114). Logo apesar da penetração do cloreto no CAA pelos ciclos de secagem e molhagem ele não se ligou quimicamente as fases de hidratação do cimento promovendo a perda de massa.

O limite do cloreto que indica o cobrimento da barra no concreto está relacionado ao acúmulo do íon com o tempo (KENNY, E KATZ, 2019).

Os resultados do EDS verifica-se a presença dos íons cloreto livres em todas as idades dos dois tipos de concreto, mas as imagens confirmam que nem nas primeiras idades de cura para CAA houve fixação do Cl^- .

Os poros formados em ciclos de secagem e molhagem com o tempo de exposição aumenta significativamente a profundidade da difusão de cloretos nos concretos (SUN et al., 2020). Provavelmente devido a este fato após o 78 ciclos (Figura 630 e 61) houve redução na resistência elétrica.

Além disso, módulo elástico de amostras de concreto com cloreto são reduzidos nos estágios elásticos onde há picos de sal de Friedel sabendo que há expansão, rachaduras e destruição da estrutura (Chen et al (2020) . Logo novamente corroborando com os resultados encontrados no estudo eletroquímico após o período de dois anos de ciclos.

Por fim, comprova-se que tanto no CAA como no CC houve redução na durabilidade e dano no material mesmo no CAA não apresentar a formação da fase sal de Friedel. Provavelmente devido a alterações na porosidade pela penetração do íon Cl^- .

6 Conclusão

O presente estudo buscou avaliar por EIE os mecanismos de degradação em corpos de prova de CC e CAA expostos ao ataque de cloretos, para melhor analisar a influência dos mesmos nas condições de durabilidade de estruturas em concreto armado.

Os parâmetros de resistividade elétrica, taxa de corrosão, coeficiente de difusão dos íons cloreto, e avanço da penetração em corpos de prova também foram investigados. Para garantia da penetração dos cloretos nas amostras, que costuma ser um processo lento, foram utilizados testes acelerados de ciclos de secagem / molhagem nas amostras ao longo do período total de dois anos. Foram investigados diferentes tempos de cura em ambos os concretos.

Comparando os resultados dos dois tipos de concreto frente à idade de cura e sua resistividade elétrica, este estudo verificou que o CC e o CAA apresentaram comportamentos diferentes, mesmo sob as mesmas condições de exposição ao meio, classe de resistência mecânica e fator água/cimento. À medida que o tempo de exposição avança, os corpos de prova do CAA apresentaram melhores resultados para as medidas de resistividade elétricas em todas as idades de cura.

Para o CC, comparando o comportamento nos dois anos, verifica-se que os resultados da resistividade elétrica da idade de cura de 28 dias são superiores se comparados a outras idades (3, 5 e 7 dias). Já para o CAA, as idades de cura superiores a 3 dias possuem comportamentos semelhantes, devido provavelmente à sua microestrutura, apresentando poros de menores tamanhos desde as idades iniciais de cura. Portanto, conclui-se que, apesar de terem sido produzidos com o mesmo tipo de cimento e mesma relação água/cimento, para o CC a idade de cura influencia na resposta aos ataques de cloretos, enquanto que para o CAA, o tempo de cura não demonstrou distinção tão significativa na resposta do material.

As respostas encontradas nos materiais estudados e submetidos ao processo acelerado de ciclo de secagem e molhagem indicam que existe uma maior resistência ao processo físico de transferência de carga, ou seja, uma menor taxa de corrosão no CAA em relação ao CC. O valor da resistividade elétrica encontrado no estudo do CAA foi cerca de 60% superior ao CC para a idade de cura de 28 dias após 1 ano de ensaios.

As análises eletroquímicas apresentaram ao longo do estudo variações no CAA para o grupo amostral. Isto devido a serem altamente resistivos gerando limitações nas medidas com ruídos facilmente detectados, mas sem alterações estatisticamente significantes. Além disso, os finos do CAA preencheram os poros e tem um efeito impermeabilizante com um loop capacitivo na região de alta frequência no espectro de impedância, sendo apontado como uma resposta dielétrica do material à base de cimento.

Os resultados das análises de porosidade e transporte de íons confirmam a maior homogeneidade do CAA em relação ao CC. Os dados de porosidade para ambos os concretos não possuem altas variações para a mesma idade de cura. No entanto, foi verificada modificações na permeabilidade dos cloretos, provavelmente devido a maior capilaridade no CC.

No CC, o coeficiente de difusão foi superior aos encontrados no CAA. Isto evidencia a maior transferência de massa (maior difusão) com maiores valores da constante de Warburg no estudo eletroquímico.

Nos primeiros ciclos, há grandes mudanças nos valores encontrados no coeficiente de difusão dos íons cloretos para CC, refletindo as mudanças em sua estrutura. Esses valores para CC começam a se tornar mais constantes a partir de um ano de exposição. Após os dois anos, os valores da idade de cura de 7 anos foram superiores para o coeficiente de difusão dos íons cloretos demonstrando sua heterogeneidade.

Para os resultados do CAA nas primeiras idades o coeficiente de variação do coeficiente de difusão dos íons cloretos foram reduzidos com a idade de cura, ao contrário do CC, e essas medidas se tornaram aproximadamente constantes após cerca de 4 meses.

Outro dado importante em relação à durabilidade é a intensidade de corrosão calculada das amostras de concreto. Os resultados das amostras evidenciam que a intensidade de corrosão no CC apresenta uma expectativa de início do processo de corrosão entre 2 a 10 anos, enquanto que nas amostras de CAA a expectativa de início da corrosão é de 15 anos. Este fato aponta uma durabilidade maior no CAA.

Em relação ao acúmulo dos íons de cloreto nas amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem, há evidência da redução da resistência elétrica de ambos os concretos nos ciclos finais de exposição. Após 78 ciclos de exposição,

começa a ocorrer uma redução na resistividade elétrica do material, devido provavelmente, à uma degradação significativa do mesmo.

Alterações na porosidade em decorrência de reações químicas entre as substâncias presentes no meio com o material cimentício, também promoveram penetração não homogênea dos resultados.

O resultado da penetração indica que no CC possui baixa resistência a penetração dos íons cloreto, enquanto o CAA apresenta um melhor desempenho em todas as idades de cura. Para o CC, a resposta dos dados após dois anos de exposição indicam resultados de penetração superiores aos limites normatizados para o cobrimento das barras para todas as idades de cura, com exceção da cura de 28 dias.

Além disso, no CC os resultados comprovaram a formação de sal de Friedel, independente da idade de cura, para o período de exposição de dois anos do experimento, indicando a fixação dos cloretos. No CAA isto não foi verificado.

Os resultados eletroquímicos foram confirmados nos estudos da porosidade e da composição química. A presença da solução salina nos poros e alterações na sua microestrutura revelam diferenças entre o tempo de cura e tipo de concreto, que foram comprovados estatisticamente pela análise multivariada (ANOVA).

A idade de cura influenciou os processos de degradação com maior intensidade no CC do que no CAA. Apesar da resistividade elétrica após dois anos ser reduzida em ambos os concretos, os íons cloreto no CAA não resultaram na formação de sal de Friedel.

Dessa forma, pode-se concluir que os parâmetros de resistência mecânica e relação água/cimento prescritos na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) não são suficientes para conclusão nas questões de durabilidade do concreto, sendo necessários a consideração de outros parâmetros como os eletroquímicos e a característica dielétrica do material para prever a durabilidade do concreto.

Referências Bibliográficas

- A.S.T.M. C494-13 Standard Specification for Chemical admixtures for Concrete Book fo ASTM Standard, 2013.
- ABBAS, Y.; PARGAR, F.; KOLEVA, D. A.; VAN BREUGEL, K.; OLTHUIS, W.; VAN DEN BERG, A. Non-destructive measurement of chloride ions concentration in concrete—A comparative analysis of limitations and prospects. **Construction and building materials**, v. 174, p. 376-387, 2018.
- ABDALHMID, J. M.; ASHOUR, A. F.; SHEEHAN, T. Long-term drying shrinkage of self-compacting concrete: Experimental and analytical investigations. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 825-837, 2019.
- ABED, M.; NEMES, R. Long-term durability of self-compacting high-performance concrete produced with waste materials. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 350-361, 2019.
- ABO ALARAB, L. A.; POURSAEE, A.; ROSS, Brandon E. An experimental method for evaluating reinforcement corrosion in cracked concrete. **Journal of Structural Integrity and Maintenance**, v. 4, n. 1, p. 43-50, 2019.
- ABZAEV, Y., GNYRYA, A., KOROBKOV, S., GAUSS, K., BOYARINTSEV, A., TOMRACHEV, S. Thermodynamic modeling of Portland cement without mineral additives. In: **Journal of Physics: Conference Series**. Vol. 1145. No. 1. IOP Publishing, p. 012016, 2019.
- ACHOUR, M., BIGNONNET, F., BARTHÉLÉMY, J. F., ROZIÈRE, E. AMIRI, O. Multi-scale modeling of the chloride diffusivity and the elasticity of Portland cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117124, 2020.
- ACI 364.1R (1999). Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation, ACI 364.1 R-94, American Concrete Institute, USA.1999.
- ADESINA, A.; AWOYERA, P. Overview of trends in the application of waste materials in self-compacting concrete production. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 9, p. 962, 2019.
- AİTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.667p.
- AİTCIN, P.-C. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. **Cement and Concrete research**, v. 30, n. 9, p. 1349-1359, 2000.
- AKHNOUKH, A. K. The use of micro and nano-sized particles in increasing concrete durability. **Particulate Science and Technology**, v. 38, n. 5, p. 529-534, 2020.
- ALBERT, A.; ZHANG, L. A novel definition of the multivariate coefficient of variation. **Biometrical Journal**, v. 52, n. 5, p. 667-675, 2010.

ALBERTI, M. G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J. C. The effect of fibres in the rheology of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 219, p. 144-153, 2019.

ALEXANDER, M.; BEUSHAUSEN, H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures—review and critique. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 17-29, 2019.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1047-1055, 2000.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. **Cement and concrete research**, v. 18, n. 5, p. 687-698, 1988.

ALONSO, M. C.; ANGST, U.; SANCHEZ, M; ANN, K. Y. Onset of chloride induced reinforcement corrosion. In: Kim, S. H. and Ann, K. Y. (Eds.). *Handbook of concrete durability*. Korea: Middleton Publishing Inc, 2010.

ALSHEET, F.; RAZAQPUR, A. The effect of chemical composition of deicing salts on the concrete pore structure and chloride-induced corrosion. **CSCE Annual Conference** . 2020.

American Society for Testing and Materials (Filadelfia, Pennsylvania). (1999) ASTM G1-90 (1999) e1, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (Filadelfia, Pennsylvania). (2004). ASTM G1-03: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. ASTM.

AN, J., NAM, B. H., ALHARBI, Y., CHO, B. H., KHAWAJI, M. Edge-oxidized graphene oxide (EOGO) in cement composites: Cement hydration and microstructure. **Composites Part B: Engineering**, v. 173, p. 106795, 2019.

AN, M., HUANG, H., WANG, Y., ZHAO, G. Effect of thermal cycling on the properties of high-performance concrete: Microstructure and mechanism. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118310, 2020.

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

ANDRADE, C.; D'ANDREA, Renata; REBOLLEDO, Nuria. Chloride ion penetration in concrete: The reaction factor in the electrical resistivity model. **Cement and Concrete Composites**, v. 47, p. 41-46, 2014.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos.**

2001. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

ANDRADE, M. C.; PAGE, C. L. Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effects. **British Corrosion Journal**, v. 21, n.1, p. 49-53, 1986.

ANGST, U., ELSENER, B., LARSEN, C. K., VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete—a review. **Cement and concrete research**, v. 39, n. 12, p. 1122-1138, 2009.

ANGST, U. M., ELSENER, B., LARSEN, C. K., VENNESLAND, Ø. Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science**, v. 53, n. 4, p. 1451-1464, 2011.

ANGST, U.M. Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 559-567, 2019.

APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADAKIS, V. G. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 12, p. 2316-2324, 2008.

ARABI, N.; MEFTAH, H.; AMARA, H.; KEBAILI, O.; BERREDJEM, L. Valorization of recycled materials in development of self-compacting concrete: Mixing recycled concrete aggregates—Windshield waste glass aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 364-376, 2019.

ARAÚJO, F. W. C. D. **Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2009.

ARREDONDO-REA, S. P., CORRAL-HIGUERA, R., GÓMEZ-SOBERÓN, J. M., GÁMEZ-GARCÍA, D. C., BERNAL-CAMACHO, J. M., ROSAS-CASAREZ, C. A., UNGSSON-NIEBLAS, M. J. Durability parameters of reinforced recycled aggregate concrete: Case study. **Applied Sciences**, 9(4), 617, 2019.

ARYA, C.; VASSIE, P.; BIOUBAKHSH, S. Modelling chloride penetration in concrete subjected to cyclic wetting and drying. **Magazine of concrete research**, v. 66, n. 7, p. 364-376, 2014.

ASGHARI, A., HERNANDEZ, A. M. L., FEYS, D., DE SCHUTTER, G. Which parameters, other than the water content, influence the robustness of cement paste with SCC consistency?. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 95-103, 2016.

ASSIE, S.; ESCADEILLAS, G.; WALLER, V. Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 10, p. 1909-1917, 2007.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009). ABNT NBR 9778: 2009 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009). ABNT. NBR 6467: 2009. Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009). ABNT. NBR NM 53: 2009. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009). ABNT. NBR NM 52: 2009. Agregado Miúdo - Determinação da Massa Específica e Massa aparente Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2011). ABNT. NBR 11768: 2011. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos Rio de Janeiro, Brasil.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2014). NBR 6118:2014. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro . Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2015). NBR 12655:2015. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro . Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2017). ABNT. NBR 16605: 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica Rio de Janeiro, Brasil.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2019). ABNT NBR 721: 2019 Agregados para concreto - Especificação Rio de Janeiro, Brasil.
ATKINS, P. W. **Físico-Química** (Traduzido). 6º Edição, Volume 3. Rio de Janeiro, 1999.

AWOYERA, P., ADESINA, A. Durability properties of alkali activated slag composites: Short overview. **Springer Nature**, 2020.

AZARSA, P., GUPTA, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017.

AZARSA, P., GUPTA, R., BIPARVA, A. Inventive Microstructural and Durability Investigation of Cementitious Composites Involving Crystalline Waterproofing Admixtures and Portland Limestone Cement. **Materials**, v. 13, n. 6, p. 1425, 2020.

BALESTRA, C. E. T., NAKANO, A. Y., SAVARIS, G., MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: proposal of parameters based on field structures. **Ocean Engineering**, v. 187, p. 106167, 2019.

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

BALONIS, M.; SANT, G.; ISGOR, O. B. Mitigating steel corrosion in reinforced concrete using functional coatings, corrosion inhibitors, and atomistic simulations. **Cement and Concrete Composites**, v. 101, p. 15-23, 2019.

BALTAZAR-ZAMORA, M. A., MÁRQUEZ-MONTERO, S., LANDA-RUIZ, L., CROCHE, R., LÓPEZ-YZA, O. Effect of the type of curing on the corrosion behavior of concrete exposed to urban and marine environment. **European Journal of Engineering Research and Science**, v. 5, n. 1, p. 91-95, 2020.

BAMFORTH, P. B.; PRICE, W. F.; EMERSON, M. **International Review of Chloride Ingress Into Structural Concrete: A Trl Report (Trl 359)**. Thomas Telford, 1997.

BAMIGBOYE, G.; ADEDEJI, A.; OLUKANNI, D.; JOLAYEMI, K.; FASANYE, O. Experimental study on the durability to saline environments of self-compacting concrete made with coarse aggregates combination. **Revista Romana de Materiale**, v. 49, n. 2, p. 225-231, 2019.

BANDARA, T. M. W. J.; MELLANDER, B. E. Evaluation of mobility, diffusion coefficient and density of charge carriers in ionic liquids and novel electrolytes based on a new model for dielectric response. **Ionic liquids: theory, properties, new approaches**, p. 383-406, 2011.

BARBOSA, C. G. M. **Avaliação da influência do NaCl em pastas de cimento Portland para cimentação de poços de petróleo em zonas evaporíticas**. 2009. 98 f. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2009.

BARD, A. J., FAULKNER, L. R., "Electrochemical Methods", Wiley; New York, p.316, 1980.

BARD, A. J.; FAULKNER, L. R., **Electrochemical methods: Fundamentals and applications**. New York: 2001.

BARDINI, L. **EIS 101, an introduction to electrochemical spectroscopy**. no. May, 2018.

BAROGHEL-BOUNY, V. Which toolkit for durability evaluation as regards chloride ingress into concrete? Part II: Development of a performance approach based on durability indicators and monitoring parameters. In: **Third International RILEM Workshop on Testing and Modeling Chloride Ingress into Concrete**. 2004. p. 137-163.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and building materials**, v. 15, n. 2-3, p. 93-103, 2001.

BATEN, B. Effect of blended cement on service life enhancement of concrete structures in marine environment. 2019. MASTER OF SCIENCE IN CIVIL ENGINEERING (STRUCTURAL). Department of Civil Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka. 2019. 224 p.

BAVARIAN, B., OLUWASEYE, A., REINER, L., MEYER, J.. **Migrating Corrosion Inhibitors to Protect Reinforced Concrete Structures**. In: NACE International, Corrosion Conference and Expo. 2018.

BAYÓN R., IGARTUA A., GONZÁLEZ J.J, RUIZ DE GOPEGUI U. Influence of the carbon content on the corrosion and tribocorrosion performance of Ti-DLC coatings for biomedical alloys. *Tribology international*, v. 88, p. 115-125, 2015.

BEAR, J. 1988. **Dynamics of fluids in Porous Media**. Elsevier, New York.

BEAUDOIN, J.; ODLER, I. Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, Elsevier Ltda, 2019. 623p.

BEHERA, M.; MINOCHA, A. K.; BHATTACHARYYA, S. K. Flow behavior, microstructure, strength and shrinkage properties of self-compacting concrete incorporating recycled fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116819, 2019.

BENAVENTE, D., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., ALGOZZINI, G., GARCÍA DEL CURA, M. A. Influence of water transport and pore structure on the durability of porous building stones. In: **The 10th IAEG International Congress, Nottingham, United Kingdom**. 2006. p. 6-10.

BENYAMINA, S.; MENADI, B.; BERNARD, S. K.; KENAI, S. Performance of self-compacting concrete with manufactured crushed sand. **Advances in Concrete Construction**, v 7, n 2, p. 87-96, 2019.

BERTOLINI, L. **Materiais de Construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos. 2016.

BEUSHAUSEN, H.; TORRENT, R.; ALEXANDER, M. G. Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. **Cement and Concrete Research**, v. 119, p. 11-20, 2019.

BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA and EFNARC, The European Guidelines for Self-Compact Concrete – Specification, Production and Use, Available from: www.efca.info or www.efnarc.org, 5 /2005.

BISESIER, J.G.P.; MCDERMOTT, A.M.; YIN, Y.; SAMBROOK, R.M.; VAIDHYAMATHAM, B. In Situ Coagulation Moulding-A New Route for High Quality Net Shape Ceramics. **Ceramics International** v. 32- p.29-35, 2006.

BJEGOVIĆ, D., SERDAR, M. OSLALLOVI, I.S., JACOBS, F., BEUSHAUSEN, H., ANDRADE, C., MONTEIRO, A.V., PAULINI, P., NANUKUTTAN, S. Test methods for concrete durability indicators. In: **Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability**. Springer, Dordrecht, p. 51-105., 2016.

BOGAS, J. A.; REAL, S. A Review on the Carbonation and Chloride Penetration Resistance of Structural Lightweight Aggregate Concrete. **Materials**, v. 12, n. 20, p. 3456, 2019.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

BONDARENKO, A. **Electrochemical sensing and imaging of biological samples**. THÈSE NO 6840, 2015. 155 f. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. FACULTÉ DES SCIENCES DE BASE. SUISSE. 2015.

BORG, R. P. **Concrete Heritage: Challenges in Conservation**. Conference: Symposia Melitensia: Praxis, Applying Theory in Practice, Univeristy of Malta. Malta. Volume: 16. 2020.

BOUKHELKHAL, A.; AZZOUZ, L.; KENAI, S.; KADRI, E. H.; BENABED, B. Combined effects of mineral additions and curing conditions on strength and durability of self-compacting mortars exposed to aggressive solutions in the natural hot-dry climate in North African desert region. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 307-318, 2019.

BOURENANE, N.; SEDIRA, N.; HAMPLAQUI, Y. Corrosion Behavior of Reinforcing Steel in Concrete Elements in Alkaline Medium. **Journal of Building Materials and Structures**, v. 6, n. 2, p. 50-63, 2019.

BRAGANÇA, M. O., PORTELLA, K. F., BONATO, M. M., MARINO, C. E.. Electrochemical impedance behavior of mortar subjected to a sulfate environment—A comparison with chloride exposure models. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 650-658, 2014.

BROCK, J. *Electrochemical Impedance Spectroscopy: Methods, Analysis and Research*. [s.l.] **Nova Science Publishers, Incorporated**, 2017.

BROWN, P.; BOTHE JR, J. The system CaO-Al₂O₃-CaCl₂-H₂O at 23±2 C and the mechanisms of chloride binding in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1549-1553, 2004.

BU, Y.; WEISS, J.. Saturation of air entrained voids and its implication on the transport of ionic species in concrete. 4th International Conference on the **Durability of Concrete Structures**, 24–26 July, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 2014.

BULLARD, J. W., JENNINGS H. M., LIVINGSTON, R. A., NONAT A., SCHERER, G. W., SCHWEITZER, J. S., SCRIVENER, K. L., THOMAS, J. J. Mecanismos de hidratação do cimento. **Pesquisa em cimento e concreto**, v. 41, n. 12, p. 1208-1223, 2011.

BUSARI, A. A.; AKINMUSURU, J. O.; DAHUNSI, B. I. Review of Sustainability in Self-compacting Concrete: the Use of Waste and Mineral Additives as Supplementary Cementitious Materials and Aggregates. Portugaliae. **Electrochimica Acta**, v. 36, n. 3, p. 147-162, 2018.

CABEZA, M., MERINO, P., MIRANDA, A., NÓVOA, X. R. E SANCHEZ, I. Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p. 881-891, 2002.

CABEZA, M., DÍAZ, B., NÓVOA, X. R., PÉREZ, C., PÉREZ, M. C. The Effect of Loading on the Diffusivity of Chlorides in Mortar. **Materials**, v. 12, n. 16, p. 2527, 2019.

CAI, Y., XU, Y., ZHAO, Y., ZHOU, K., MA, X. A spatial-temporal approach for corrosion prediction in time-varying marine environment. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, p. 104161, 2020.

CALMON, J. L., TRISTÃO, F. A., GIACOMETTI, M., MENEGUELLI, M., MORATTI, M., TEIXEIRA, J. E. S. L. Effects of BOF steel slag and other cementitious materials on the rheological properties of self-compacting cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1046-1053, 2013.

CAO, Y.; GEHLEN, C.; ANGST, U.; WANG, L.; WANG, Z.; YAO, Y. Critical chloride content in reinforced concrete—An updated review considering Chinese experience. **Cement and Concrete Research**, v. 117, p. 58-68, 2019.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; HASPARYK, N. P. Microestrutura dos materiais cerâmicos. ISAIA, G. *Materiais de construção*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto-IBRACON, 2010.

CASCUDO, O.; HELENE, PRL. Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2001.

CASTRO, P.; RINCON, O. T.; FIGUEIREDO, Enio José Pazini. Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 1, p. 529-537, 2001..

CHAN, R.; LIU, X.; GALO BARDES, I. Estudo paramétrico de concretos graduados funcionalmente incorporando fibras de aço e agregados reciclados. **Construção e Materiais de Construção**, v. 242, p. 118186, 2020.

CHANG, H., MU, S., XIE, D., WANG, P. Influence of pore structure and moisture distribution on chloride “maximum phenomenon” in surface layer of specimens exposed to cyclic drying-wetting condition. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 16-30, 2017.

CHANG, R; GOLDSBY, A. Química. 11ª edição. Porto Alegre: McGraw Hill, 2013.

CHANDRA, A.; BAGCHI, B. Ion conductance in electrolyte solutions. **The Journal of chemical physics**, v. 110, n. 20, p. 10024-10034, 1999.

CHEN ., DU, Z., ZHANG, Z., ZHANG, H., XIA, Z., FENG, F. Effects of chloride on the early mechanical properties and microstructure of gangue-cemented paste backfill. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117504, 2020.

CHEN, D.; MAHADEVAN, S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 3, p. 227-238, 2008.

CHEN, P., MA, B., TAN, H., LIU, X., ZHANG, T., QI, H., PENG, Y., YANG, Q., WANG, J., Effects of amorphous aluminum hydroxide on chloride immobilization in cementbased materials. **Construction and Building Materials**. 231. 2020.

CHEN, R., HU, J., MA, Y., GUO, W., HUANG, H., WEI, J., YIN, S., YU, Q. Characterization of the passive film formed on the reinforcement surface in alkali activated fly ash: Surface analysis and electrochemical evaluation. **Corrosion Science**, v. 165, p. 108393, 2020.

CHEN, Y., GAO, J., TANG, L., LI, X. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying–wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 650-658, 2016.

CHENG, S., SHUI, Z., GAO, X., YU, R., SUN, T., GUO, C., HUANG, Y. Degradation mechanisms of Portland cement mortar under seawater attack and drying-wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 116934, 2020.

CHI, L., WANG, Z., LU, S., ZHAO, D., YAO, Y. Development of mathematical models for predicting the compressive strength and hydration process using the EIS impedance of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 659-668, 2019.

CHIDIAC, S. E.; SHAFIKHANI, M. Electrical resistivity model for quantifying concrete chloride diffusion coefficient. **Cement and Concrete Composites**, p. 103707, 2020.

CHINAGLIA, C. R.; CORREA, C. A. Análise de falhas em materiais através de técnicas avançadas de microscopia. **Polímeros**, v. 7, n. 3, p. 19-23, 1997.

CHINAGLIA, D. L., GOZZI, G., ALFARO, R. A. M., HESSEL, R.. Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 4, p. 4504.1-4504.9, 2008.

CHOPRA, D., Siddique, R. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. **Biosystems engineering**, v. 130, p. 72-80, 2015.

CHRISTENSEN, B. J., COVERDALE, T., OLSON, R. A., FORD, S. J., GARBOCZI, E. J., JENNINGS, H. M., MASON, T. O. Impedance spectroscopy of hydrating cement-based materials: measurement, Interpretation, and application. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 77, n. 11, p. 2789-2804, 1994.

COPPIO, G. J., DE LIMA, M. G., LENCIONI, J. W., CIVIDANES, L. S., DYER, P. P., SILVA, S. A Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 514-521, 2019.

COSTA, V. C. M. **Influência da Corrosão Generalizada na Aderência e Comportamento Estrutural de Elementos de Concreto Armado**. 2012. 180 f. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-005A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2012.

COVERDALE, R. T., CHRISTENSEN, B. J., MASON, T. O., JENNINGS, H. M., GARBOCZI, E. J. Interpretation of the impedance spectroscopy of cement paste via computer modelling. **Journal of materials science**, v. 29, n. 19, p. 4984-4992, 1994.

CUNHA, M. G. C. **Viabilidade do uso de RCD proveniente da geração dos concretos convencional e de alta resistência através da utilização do Jigue como agente do beneficiamento**. 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre. 2017.

DA SILVA, F. G.. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 220 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

LAGE, E. B. D. **Comparação dos métodos de ensaio não destrutivo para qualidade do concreto: resistividade elétrica superficial e volumétrica em corpo de prova**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2018.

DA SILVA, S. L., Londero, C., Medeiros, M. H. F., Pereira, V. C. O., Monteiro, E. C. B.. Analytic Hierarchy Process to choose the cement type to protect reinforced concrete to corrosion caused by chloride ions attack. **Revista ALCONPAT**, v. 5, n. 3, p. 165-179, 2015.

DAL MOLIN FILHO, R. G.; LONGHI, D. A.; DE SOUZA, R. C. T.; FERRER, M. M.; VANDERLEI, R. D.; Paraíso, P. R.; de MATOS JORGE, L. M. Self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash: development of a sustainable alternative for Brazilian civil construction. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-19, 2018.

DANIYAL, M.; AKHTAR, S. Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 5, n. 1, p. 1, 2020.

DASAR, A., PATAH, D., HAMADA, H., SAGAWA, Y., YAMAMOTO, D. (Applicability of seawater as a mixing and curing agent in 4-year-old concrete. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 119692, 2020.

DE ALENCAR MONTEIRO, V. M.; LIMA, L. R.; DE ANDRADE SILVA, F. On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 280-291, 2018.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. Modern Concrete Technology Series, n. 9. E&FN SPON, London, 1999.

DE MATOS, P. R.; FOIATO, M.; PRUDÊNÇIO JR, L. R. Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 282-293, 2019.

DE MATOS, P. R.; PRUDÊNÇIO JR, L. R.; DE OLIVEIRA, A. L.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 623-630, 2018.

DE SCHUTTER, G; BARTOS, P. J. M.; DOMONE, P. GIBBS, J. **Self-Compacting Concrete**, Whittles Publishing, 2008, 288p.

DEBOUCHA, W., LEKLOU, N., KHELIDJ, A., OUDJIT, M. N Hydration development of mineral additives blended cement using thermogravimetric analysis (TGA): Methodology of calculating the degree of hydration. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 687-701, 2017.

DEGHAN, A., PETERSON, K., RIEHM, G., BROMERCHENKEL, L. H. Application of X-ray microfluorescence for the determination of chloride diffusion coefficients in concrete chloride penetration experiments. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 85-95, 2017.

DEL CURA, MA GARCÍA, BERNAVENTE, D., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., ALGOZZIN, G. Influence of water transport and pore structure on the durability of porous building stones. **The Geological Society**, AEG, number 233, London, 2006.

DELGADO, J. M. P. Q., SILVA, F. A. N., AZEVEDO, A. C., SILVA, D. F., CAMPELLO, R. L. B., SANTOS, R. L. Artificial neural networks to assess the useful life of reinforced concrete elements deteriorated by accelerated chloride tests. **Journal of Building Engineering**, p. 101445, 2020.

DÍAZ, V. O'REILLY. **O método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Editora Pini, 1998. 122 p.

DINIZ, H. A. A. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação**. 2018. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte. 2018.

DONG, B. WU, Y., TENG, X., ZHUANG, Z., GU, Z., ZHANG, J., HONG, S. Investigation of the Cl⁻ migration behavior of cement materials blended with fly ash or/and slag via the electrochemical impedance spectroscopy method. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 261-270, 2019.

DONG, B., LI, G., ZHANG, J., LIU, Y., XING, F., HONG, S. Non-destructive tracing on hydration feature of slag blended cement with electrochemical method. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 467-473, 2017.

DONG, B., WU, Y., TENG, X., ZHUANG, Z., GU, Z., ZHANG, J., XING, FENG, HONG, S. Investigation of the Cl⁻ migration behavior of cement materials blended with fly ash or/and slag via the electrochemical impedance spectroscopy method. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 261-270, 2019.

DONG, B., ZHANG, J., WANG, Y., FANG, G., LIU, Y., XING, F. Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 16-20, 2016.

DU, F., JIN, Z., XIONG, C., YU, Y., FAN, J. (Effects of Transverse Crack on Chloride Ions Diffusion and Steel Bars Corrosion Behavior in Concrete under Electric Acceleration. **Materials**, v. 12, n. 15, p. 2481, 2019.

DULLEN, F.A.L, **Porous Media Fluid Transport and Pore Structure**. Academic Press. San Diego. 1992.

DYADICHEV, A. V , DYADICHEVA, E. A., KOLESNIKOV, A. V., DYADICHEV, V. V., MENYUK, S. G., CHORNOBAY, S. Y. Mathematical model of adhesion junction of layers during coextrusion. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2019. p. 044112.

DYER, T. Concrete Durability. Boca Raton: **CRC Press**, 2014. 447 p.ed. São Paulo: PINI,1999. 47 p.

EL MIR, A.; NEHME, S. G.; ASSAAD, J. J. Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders. **Heliyon**, v. 6, n. 1, p. e03165, 2020.

ELFMARKOVA, V.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Determination of the chloride diffusion coefficient in blended cement mortars. **Cement and concrete Research**, v. 78, p. 190-199, 2015.

ESQUINAS, A. R.; ALVAREZ, J. I.; JIMENEZ, J. R.; FERNANDEZ, J. M.; DE BRITO, J. Durability of self-compacting concrete made with recovery filler from hot-mix asphalt plants. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 407-419, 2018.

FAHIM, Andrew. **Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete: Monitoring Techniques and Mitigation Sstrategies**. Thesis Submitted Master of Science in Engineering. University of New Brunswick 2018.

FANG, G.; ZHANG, M. The evolution of interfacial transition zone in alkali-activated fly ash-slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 129, p. 105963, 2020.

FARAHANI, A.; TAGHADDOS, H.; SHEKARCHI, M. Chloride Diffusion Modeling in Pozzolanic Concrete in Marine Site. **ACI Materials Journal**, v. 115, n. 4, p. 509-518, 2018.

FARES, H., REMOND, S., NOUMOWE, A., COUSTURE, A.. High temperature behaviour of self-consolidating concrete: microstructure and physicochemical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 488-496, 2010.

FAZILATI, M.; GOLAFSHANI, E. M. Durability properties of concrete containing amorphous silicate tuff as a type of natural cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117087, 2020.

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

FENG, Y., TEO, W. K., SIOW, K. S., TAN, K. L., HSIEH, A. K. The corrosion behaviour of copper in neutral tap water. Part I: corrosion mechanisms. **Corrosion Science**, v. 38, n. 3, p. 369-385, 1996.

FERREIRA, P. R. R. **Análise da indução da corrosão por cloretos em concretos armados com adição de resíduo de tijolo moído a partir de ensaios acelerados**. 2015. 229 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2015.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Vol. 2. Cap. 27. SãoPaulo: IBRACON, p. 829-855, 2005.

FIRODIYA, P. K., SENGUPTA, A. K., PILLAI, R. G. Evaluation of Corrosion Rates of Reinforcing Bars for Probabilistic Assessment of Existing Road Bridge Girders. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 29(3), 04014067, 2014.

FRANÇA, C. B. Avaliação de cloretos pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata. Dissertação de Mestrado. UNICAP, Recife , 2011.

GALAN, I.; GLASSER, F. P. Cloreto em cimento. **Advances in Cement Research** , v. 27, n. 2, pág. 63-97, 2015.

GARBOCZI, E. J.; BENTZ, D. P. Computer simulation of the diffusivity of cement-based materials. **Journal of materials science**, v. 27, n. 8, p. 2083-2092, 1992.

GARCEZ, E. O. K.; M. I., SUBHANI, M., M.; A., FEHERVARI, A.; HALL, M.; MOULTON, P Development of high strength self-compacting fibre reinforced concrete for prefabricated concrete industry. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, vol 275. p. 02011, 2019.

GARDONI P; MURPHY C. Society-based design: promoting societal well-being by designing sustainable and resilient infrastructure. **Sustainable and Resilient Infrastructure** p:1-16, May 2018.

GARTNER, N.; KOSEC, T.; LEGAT, A. Monitoring the Corrosion of Steel in Concrete Exposed to a Marine Environment. **Materials**, v. 13, n. 2, p. 407, 2020.

GAUCKLER, L.J.;GRAULE, T.H.;BAADER,F. Ceramic Forming Using Enzyme Catalyzed Reactions. **Materials Chemistry and Physics**. v.68, p.78-102,1999.

GERENGI, H., KOCAK, Y., JAZDZEWSKA, A., KURTAY, M. Corrosion behavior of concrete produced with diatomite and zeolite exposed to chlorides. **Comput Concrete**, v. 19, n. 2, p. 161-169, 2017.

GHANBARIAN, B., HUNT, A. G., EWING, R. P., SAHIMI, M. Tortuosity in porous media: a critical review. **Soil science society of America journal**, v. 77, n. 5, p. 1461-1477, 2013.

GHODDOUSI, P.; SAADABADI, L. A.. Pore structure indicators of chloride transport in metakaolin and silica fume self-compacting concrete. **International Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 5, p. 583-592, 2018.

GHOSH, AVIJIT H.; DAS, BIBHUTI BHUSAN. Implication of Concrete with Chemical Admixture Cured in Low Temperature on Strength, Chloride Permeability and Microstructure. In: **Sustainable Construction and Building Materials**. Springer, Singapore, 2019. p. 287-298.

GILBERT, J. L. 1.2 Electrochemical Behavior of Metals in the Biological Milieu. **Comprehensive Biomaterials II**, p. 19, 2017.

GILL, A. S.; SIDDIQUE, R. Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 323-332, 2018.

GIROTTI, E. M.; SANTOS, I. A. Medidas de resistividade elétrica dc em sólidos: como efetuá-las corretamente. **Química Nova**, v. 25, n. 4, p. 639-647, 2002.

GJØRV, O. Durability design and construction quality of concrete structures. In: **International Conference on Advances in Concrete and Structures**. RILEM Publications SARL, 2003. p. 309-320.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo-SP, Editora Oficina de Textos, 2015.

GLASS, G. K.; HASSANEIN, A. M.; BUENFELD, N. R. Obtaining impedance information on the steel-concrete interface. **Corrosion**, v. 54, n. 11, p. 887-897, 1998.

GLASS, G. K.; REDDY, B.; BUENFELD, N. R. Corrosion inhibition in concrete arising from its acid neutralisation capacity. **Corrosion Science**, v. 42, n. 9, p. 1587-1598, 2000.

GNEDENKOV, S. V., SINEBRYUKHOV, S. L., ZHELEZNOV, V. V., OPRA, D. P., VOIT, E. I., MODIN, E. B., SOKOLOV, A. A., USTINOV, A.Y. SERGIENKO, V. I. Effect of Hf-doping on electrochemical performance of anatase TiO₂ as an anode material for lithium storage. **Royal Society open science**, v. 5, n. 6, p. 171811, 2018.

GOIS, J. P. **Mínimos-quadrados e aproximação de superfície de pontos: novas perspectivas e aplicações**. 2008. Tese de Doutorado. Programa de Ciências de Computação e Matemática e de Computacional. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC – USP. Universidade de São Paulo. USP, São Carlos. 2008.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; PÉREZ-ORDÓÑEZ, J. L.; EIRAS-LÓPEZ, J. Prediction of self-compacting recycled concrete mechanical properties using vibrated recycled concrete experience. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 641-654, 2017.

GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. 2007. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

GRAEFF, A. G.; DA SILVA FILHO, Luiz Carlos P. **Analysis of rebar cross sectional area loss by reinforced concrete corrosion**. In: 11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components. 2008 (Vol 44).

GU, P., XIE, P., BEAUDOIN, J. J., BROUSSEAU, R. AC impedance spectroscopy (I): A new equivalent circuit model for hydrated Portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 22, n. 5, p. 833-840, 1992.

GUIGNONE, G. C., VIEIRA, G. L., ZULCÃO, R., MION, G., BAPTISTA, G. Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 4, 2019.

GUIMARAES, F. B.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, J. S. Curvas de dosagem para concreto convencional produzido com materiais da região de Porto Nacional (TO). *Engineering Sciences*, v. 7, n. 2, p. 40–52, 2019.

GUIRGUIS, B., SHEHATA, M. H., DUCHESNE, J., FOURNIER, B., DURAND, B., RIVARD, P. The application of a new oxidation mortar bar test to mixtures containing different cementing systems. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 775-785, 2018.

GUPTA, N.; SIDDIQUE, R. Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete incorporating copper slag. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 894-908, 2019.

GUZATTO, R., Biodiesel etílico derivado de óleos e gorduras residuais: obtenção, caracterização, comparação com outras fontes e aplicação como matéria-prima na síntese de ésteres etílicos epoxidados. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HAI-YAN, Y., SHENG-JIAO, S., RUI, X., JUAN, Z.. Study on the removal mechanism of chemically bonded chloride ions in concrete under electric field. **Ferroelectrics**, v. 549, n. 1, p. 126-136, 2019.

HAN, X., Guan, Y., Cao, Y., Zhang, J. . A Capillarity-dependent Model for Prediction of Chloride Penetration Process into Concrete in Artificial Splash Test. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2019. p. 032085.

HAN, B., DING, S., WANG, J., OU, J. Basic Principles of Nano-Engineered Cementitious Composites. In: **Nano-Engineered Cementitious Composites**. Springer, Singapore, 2019. p. 1-96.

HAN, S.. Assessment of curing schemes for effectively controlling thermal behavior of mass concrete foundation at early ages. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117004, 2020.

HASSANI, M. S., ASADOLLAHFARDI, G., SAGHRAVANI, S. F., JAFARI, S., Peighambarzadeh, F. S. The difference in chloride ion diffusion coefficient of concrete made with drinking water and wastewater. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117182, 2020.

HASSOUN, M. NADIM; AL-MANASEER, AKTHEM. **Concreto estrutural: teoria e design**. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey. Canadá, 2012. 1007p.

HE, F., SHI, C., YUAN, Q., AN, X., TONG, B. Calculation of chloride concentration at color change boundary of AgNO₃ colorimetric measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1095-1103, 2011.

HE, F., SHI, C., YUAN, Q., CHEN, C., ZHENG, K. AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 1-8, 2012.

HE, X.; SHI, X. Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials. **Transportation Research Record**, v. 2070, n. 1, p. 13-21, 2008.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 271 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

HELENE, P., GUIGNONE, G., VIEIRA, G., RONCETTI, L., MORONI, F. Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst Avaliação da penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocicatrizantes ativados por aditivo cristalino. 2018.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo. Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACOM, 2010.

HELENE, P.; GUIGNONE, G.; VIEIRA, G.; RONCETTI, L.; MORONI, F. Avaliação da penetração de cloretos e da vida útil de concretos autocicatrizantes ativados por aditivo cristalino. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 3, 2018.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Pini, São Paulo, 1992. 348 p.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 439–471.

HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. Pini, 1986.

HEMSTAD, P.; MACHNER, A.; DE WEERDT, K. The effect of artificial leaching with HCl on chloride binding in ordinary Portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 130, p. 105976, 2020.

HERNÁNDEZ, H. H., DÍAZ, F. G., SAN MIGUEL, G. D. J. F., ALTAMIRANO, J. C. V., MORÁN, C. O. G., HERNÁNDEZ, J. M. Electrochemical Impedance Spectroscopy as a Practical Tool for Monitoring the Carbonation Process on Reinforced Concrete Structures. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, n. 12, p. 10087-10103, 2019.

HONGLEI, C., ZUQUAN, J., TIEJUN, Z., BENZHEN, W., ZHE, L., JIAN, L. Capillary suction induced water absorption and chloride transport in non-saturated concrete: The influence of humidity, mineral admixtures and sulfate ions. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117581, 2020.

HOOTON, R. D. Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105827, 2019.

HOPE, B. B.; IP, Alan K.; MANNING, D. G. Corrosion and electrical impedance in concrete. **Cement and concrete research**, v. 15, n. 3, p. 525-534, 1985.

HORNAKOVA, M., KONECNY, P., LEHNER, P., KATZER, J. Durability of structural lightweight waste aggregate concrete—electrical resistivity. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2020. p. 00015.

HORŇÁKOVÁ, M.; KONEČNÝ, P.; LEHNER, P. Measurement of the depth of chloride penetration—silver nitrate colorimetric method. **Modelování v mechanice 2019**, p. 9, 2019.

HOSHI, Y., KOIKE, T., TOKIEDA, H., SHITANDA, I., ITAGAKI, M., KATO, Y. Non-Contact Measurement to Detect Steel Rebar Corrosion in Reinforced Concrete by Electrochemical Impedance Spectroscopy. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 166, n. 11, p. C3316-C3319, 2019.

HSU, C. H.; MANSFELD, F. Concerning the conversion of the constant phase element parameter Y_0 into a capacitance. **Corrosion**, v. 57, n. 9, p. 747-748, 2001.

HU X, SHI C DSG. A review on microstructure characterization of cement-based materials subjected to chloride by AC Impedance. In: **4th Int. Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4)**. 2016. p. 1-11.

HU, SHI, C., LIU, X., ZHANG, J., DE SCHUTTER, G. A review on microstructural characterization of cement-based materials by AC impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Composites**, v. 100, p. 1-14, 2019.

HU, X., SHI, C., YUAN, Q., DE SCHUTTER, G. AC impedance spectroscopy characteristics of chloride-exposed cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117267, 2020.

HUANG, J. Diffusion impedance of electroactive materials, electrolytic solutions and porous electrodes: Warburg impedance and beyond. **Electrochimica Acta**, v. 281, p. 170-188, 2018.

HUANG, X., HU, S., WANG, F., YANG, L., RAO, M., MU, Y., WANG, C. The effect of supplementary cementitious materials on the permeability of chloride in steam cured high-ferrite Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 99-106, 2019.

ISAIA, G. C. **O concreto: da era clássica à contemporânea. Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, v. 1, p. 1-43, 2005.

ISAIA, G. C.; ZERBINO, R. L.; GASTALDINI, A. L. G.; SENSALÉ, G. R. The feasibility of using natural rice husk ash in structural concrete (part II): durability. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 2, p. 233-252, 2017.

ISMAIL, M. E.; SOLEYMANI, H. R. Monitoring corrosion rate for ordinary portland concrete (OPC) and high-performance concrete (HPC) specimens subjected to chloride attack. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 29, n. 6, p. 863-874, 2002.

JAIN, S.; PRADHAN, B. Corrosion Performance of Steel in Self-compacting Concrete Exposed to Chloride Environment. In: **Recent Advances in Structural Engineering, Volume 2**. Springer, Singapore, p. 549-558, 2019.

JAIN, S.; PRADHAN, B. Effect of cement type on hydration, microstructure and thermo-gravimetric behaviour of chloride admixed self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 304-316, 2019.

JAIN, S.; PRADHAN, B. Fresh, mechanical, and corrosion performance of self-compacting concrete in the presence of chloride ions. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118517, 2020.

JEN, G.; STOMPINIS, N.; JONES, R. Chloride ingress in a belite-calcium sulfoaluminate cement matrix. **Cement and Concrete Research**, v. 98, p. 130- 135, 2017.

JERÔNIMO, V. L.; MEIRA, G. R.; DA SILVA FILHO, L. C. P. Performance of self-compacting concretes with wastes from heavy ceramic industry against corrosion by chlorides. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 900-910, 2018.

JIANG, C.; WU, Y.; DAI, M. Degradation of steel-to-concrete bond due to corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 1073-1080, 2018.

JIANG, J., ZHENG, X., WU, S., LIU, Z., ZHENG, Q. Nondestructive experimental characterization and numerical simulation on self-healing and chloride ion transport in cracked ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 696-709, 2019.

JIANG, Q. M.; KAI, S. H. I.; LAN, S. N. Time-Dependent Reliability of Concrete Structure in Chloride Environment. In: **2018 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018)**. Atlantis Press, 2018.

JIN, M., GAO, S., JIANG, L., JIANG, Y., WU, D., SONG, R., HE, J. Continuous monitoring of steel corrosion condition in concrete under drying/wetting exposure to chloride solution by embedded MnO₂ sensor. *Int. J. Electrochem. Sci*, v. 13, p. 719-738, 2018.

JONES, M. R., MACPHEE, D. E., CHUDEK, J. A., HUNTER, G., LANNEGRAND, R., TALERO, R., SCRIMGEOUR, S. N. Studies using ²⁷Al MAS NMR of AFm and Aft phases and the formation of Friedel's salt. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 2, p. 177-182, 2003.

JÚNIOR, N. S. A., SILVA, G. A., DIAS, C. M., RIBEIRO, D. V. Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 108-118, 2019.

KAEFER, L. F. Considerações sobre a microestrutura do concreto. **Notas de aula: Escola**, 2000.

KALAKADA, Z.; DOH, J. H. Studies on Recycled Waste Glass Powder as Binder in Concrete. In: **ACMSM25**. Springer, Singapore, p. 61-70, 2020.

KANG, D.; LI, J.; ZHANG, Y. Effect of Ni Doping Content on Phase Transition and Electrochemical Performance of TiO₂ Nanofibers Prepared by Electrospinning Applied for Lithium-Ion Battery Anodes. **Materials**, v. 13, n. 6, p. 1302, 2020.

KANNAN, V. Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 169-179, 2018.

KARHUNEN, K.; SEPPÄNEN, A.; LEHIKONEN, A.; MONTEIRO, P. J.; KAIPIO, J. P. Electrical resistance tomography imaging of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 1, p. 137-145, 2010.

KE, X. Micro-fabricated electrochemical chloride ion sensors: From the present to the future. **Talanta**, v. 211, p. 120734, 2020.

KENNY, A.; KATZ, A. A Statistical Analysis of the Distribution of the Chloride Threshold with Relation to Steel-concrete Interface. **American Journal of Construction and Building Materials**, v. 3, n. 1, p. 16-22, 2019.

KEßLER, S.; SAGÜÉS, A. A. A minimalist approach to polarization resistance measurements in a reinforced concrete structure. **Materials and Corrosion**, v. 71, n. 5, p. 849-856, 2020.

KHANZADEH MORADLLO M, SADATI S, SHEKARCHI M. Quantifying maximum phenomenon in chloride ion profiles and its influence on service-life prediction of concrete structures exposed to seawater tidal zone – A field oriented study. **Construction and Building Materials**. 2018;180:109-116.

KIM, J. K., KEE, S. H., FUTALAN, C. M., YEE, J. J. Corrosion Monitoring of Reinforced Steel Embedded in Cement Mortar under Wet-And-Dry Cycles by Electrochemical Impedance Spectroscopy. **Sensors**, v. 20, n. 1, p. 199, 2020.

KIM, J.; SURYANTO, B.; MCCARTER, W. J. Conduction, relaxation and complex impedance studies on Portland cement mortars during freezing and thawing. **Cold Regions Science and Technology**, v. 166, p. 102819, 2019.

KIM, MYUNG-YU; YANG, EUN-IK; TAE, S. YI. Evaluation of Chloride Penetration Characteristics using a Colorimetric Method in Concrete Structures. **Structural Mechanics in Reactor Technology**, Toronto, Canada, 2007.

KIM, MYUNG-YU; YANG, EUN-IK; YI, SEONG-TAE. Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 239-245, 2013.

KIM, T. K., CHOI, S. J., CHOI, J. H., KIM, J. H. J. Prediction of Chloride Penetration Depth Rate and Diffusion Coefficient Rate of Concrete from Curing Condition Variations due to Climate Change Effect. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 13, n. 1, p. 15, 2019.

KIRKPATRICK, R. J.; KALINICHEV, A. G.; WANG, J. Molecular dynamics modelling of hydrated mineral interlayers and surfaces: structure and dynamics. **Mineralogical Magazine**, v. 69, n. 3, p. 289-308, 2005.

KLEPEL, Olaf; TAUBERT, Michael. Attempts to design porous carbon monoliths using porous concrete as a template-Part II: Some aspects of the pore formation mechanism. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 280, p. 243-247, 2019.

KORDE, C.; CRUICKSHANK, M.; WEST, R. P. Activation of slag: a comparative study of cement, lime, calcium sulfate, GGBS fineness and temperature. **Magazine of Concrete Research**, p. 1-17, 2019.

KUMAR, B. Engineering Properties of Self Compacting Concrete Incorporating Metakaolin and Rice Husk Ash: A Review. In: **International Conference on Sustainable Waste Management through Design**. Springer, Cham, p. 187-191, 2018.

KURDA, R., DE BRITO, J., SILVESTRE, J. D. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 169-182, 2019.

KURDOWSKI, W. *Cement and Concrete Chemistry*. Springer, 2014.

LANGFORD, P.; BROOMFIELD, J. Monitoring the corrosion of reinforcing steel. **Construction Repair**, v. 1, n. 2, 1987.

LEEMANN, A.; LOSER, R.; MÜNCH, B. Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 2, p. 116-120, 2010.

LEHNER, P.; GHOSH, P.; KONEČNÝ, P. Statistical analysis of time dependent variation of diffusion coefficient for various binary and ternary based concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 75-87, 2018.

LEI, C., N., LIU, D., WANG, H. A non-linear flow model for porous media based on conformable derivative approach. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 2986, 2018.

LI, B.; ZHANG, W. Electrochemical and corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel in simulated concrete pore solution. *Int. J. Electrochem. Sci*, v. 12, p. 8432-8446, 2017.

LI, C., LIN, C., ZHANG, B., LI, Q., LIU, W., HU, J., HE, J. Understanding surface charge accumulation and surface flashover on spacers in compressed gas insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 25, n. 4, p. 1152-1166, 2018.

LI, D.; WEI, R.; LI, L.; GUAN, X.; MI, X. Pitting corrosion of reinforcing steel bars in chloride contaminated concrete. *Construction and Building Materials*, v. 199, p. 359-368, 2019.

LI, D.; LI, L.-Y.; WANG, X. Chloride diffusion model for concrete in marine environment with considering binding effect. *Marine Structures*, v. 66, p. 44-51, 2019.

LI, D.; WANG, X.; LI, L.-Y. An analytical solution for chloride diffusion in concrete with considering binding effect. *Ocean Engineering*, v. 191, p. 106549, 2019.

LI, K.; ZHANG, D.; LI, Q.; FAN, Z. Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond. *Cement and Concrete Research*, v. 115, p. 545-558, 2019.

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

LI, N.; LONG, G.; FU, Q.; MA, C.; MA, K.; XIE, Y. Effects of Freeze and Cyclic Load on Impact Resistance of Filling Layer Self-Compacting Concrete (FLSCC). *KSCE Journal of Civil Engineering*, p. 1-11, 2019.

LI, N.; LONG, G.; MA, C.; FU, Q.; ZENG, X.; MA, K.; XIE, Y.; LUO, B. Properties of self-compacting concrete (SCC) with recycled tire rubber aggregate: A comprehensive study. *Journal of Cleaner Production*, v. 236, p. 117707, 2019.

LI, W., YU, J., MA, S., HU, Y., GE, D., SHEN, X. The properties and hydration of portland cement containing calcium sulfoaluminate cement. *Ceramics-Silikáty*, v. 62, n. 4, p. 364-373, 2018.

LI, XINXIN; XU, YI. Microstructure-Based Modeling for Water Permeability of Hydrating Cement Paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 17, n. 7, p. 405-418, 2019.

LIM, Y. Y., SMITH, S. T., PADILLA, R. V., SOH, C. K. Monitoring of concrete curing using the electromechanical impedance technique: review and path forward. *Structural Health Monitoring*, p. 1475921719893069, 2019.

LIN, W.-T. Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 242, p. 118046, 2020.

LIU, C., XIE, D., SHE, W., LIU, Z., LIU, G., YANG, L., ZHANG, Y. Numerical modelling of elastic modulus and diffusion coefficient of concrete as a three-phase composite material. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 1251-1263, 2018.

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y.; MA, Y. Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 217-225, 2017.

LIU, J.; JIA, Y.; WANG, J. Calculation of chloride ion diffusion in glass and polypropylene fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 875-885, 2019.

LIU, K.; SHUI, Z.; SUN, T.; LING, G.; LI, X.; CHENG, S. Effects of combined expansive agents and supplementary cementitious materials on the mechanical properties, shrinkage and chloride penetration of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 120-129, 2019.

LIU, X., MA, B., TAN, H., GAO, L., CHEN, P. Improvement in chloride immobilization of cement-metakaolin system by triisopropanolamine. **Applied Clay Science**, v. 193, p. 105656, 2020.

LIU, X., MA, B., TAN, H., ZHANG, T., MEI, J., QI, H., CHEN, P., WANG, J. Effects of colloidal nano-SiO₂ on the immobilization of chloride ions in cement-fly ash system. **Cement and Concrete Composites**, p. 103596, 2020.

LIU, X. Microstructural investigation of self-compacting concrete and high-performance concrete during hydration and after exposure to high temperatures. **These de doctorat, Université de Ghent, Belgique**, 2006.

LIU, Y. **Modeling the time-to corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures**. 1996. Tese de Doutorado. Virginia Tech. 1996.

LIU, Z., CHEN, W., ZHANG, Y., LV, H. A three-dimensional multi-scale method to simulate the ion transport behavior of cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 494-503, 2016.

LIZARAZO-MARRIAGA, J.; GONZALEZ, J.; CLAISSE, P. Simulation of the concrete chloride **NT build-492 migration test**. 2012.

LOCHE, J.-M.; AMMAR, A.; DUMARGUE, P. Influence of the migration of chloride ions on the electrochemical impedance spectroscopy of mortar paste. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 9, p. 1797-1803, 2005.

LORETO, G.; DI BENEDETTI, M.; DE LUCA, A.; NANNI, A. Assessment of reinforced concrete structures in marine environment: a case study. **Corrosion Reviews**, v. 37, n. 1, p. 57-69, 2019.

LU, X., GUO, Y., ZHANG, P., ZHENG, C. Effect of Air Humidity on the Diffusion Rate of Migrating Corrosion Inhibitor in Mortars. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 12, n. 8, p. 7547-7556, 2017.

LU, Xinying. Application of the Nernst-Einstein equation to concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 2, p. 293-302, 1997.

LUNA MOLINA, F.J.; FERNÁNDEZ, Á.; ALONSO, M. C. The influence of curing and aging on chloride transport through ternary blended cement concrete. *Materiales de construcción*, n. 332, v. 68 p. 4, 2018.

LUO, R., CAI, Y., WANG, C., HUANG, X. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 1, p. 1-7, 2003.

LUPING T, GULIKERS J. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete. *Cement and concrete research*, v. 37, n. 4, p. 589-595, 2007.

M. RAMLI, M. TABASSI, A.A., "Effects of polymer modification on the permeability of cement mortars under different curing conditions: a correlational study that includes pore distributions, water absorption and compressive strength," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 561–570, 2012.

MAGALHÃES, T. A. **Análise da penetração de íons cloreto em compósitos contendo diferentes teores de escória de alto forno.** 2019. 221 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2019.

MACDONALD, D. D., Reflections on the history of electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta*, v. 51, n. 8-9, p. 1376-1388, 2006.

MALHEIRO, R. D.L.D.C.; DE LIMA, M. S.; ROCHA, G. Durabilidade das construções inseridas em ambiente marinho: influência do revestimento de argamassa na penetração de cloretos em estruturas de concreto. Dissertação (mestrado em engenharia urbana) PPGEU. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARAÍBA. 2008.

MANCINI, G.; TONDOLO, F.; IULIANO, L.; MINETOLA, P. Local reinforcing bar damage in r.c. members due to accelerated corrosion and loading. *Construction and Building Materials*, v. 69, p. 116–123, 2014.

MAO, QU, W., ZHU, P., XIAO, J. Influence of recycled powder on chloride penetration resistance of green reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 119049, 2020.

MAO, Y. Z., WEI, Y. H., ZHAO, H. T., LV, C. X., CAO, H. J., LI, J. Corrosion Behavior of Epoxy-Coated Rebar with Pinhole Defect in Seawater Concrete. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, v. 31, n. 11, p. 1171-1182, 2018.

MARCONDES, G. N. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e**

propriedades mecânicas. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2012.

MARUYAMA, I., SAKAMOTO, N., MATSUI, K., IGARASHI, G. Microstructural changes in white Portland cement paste under the first drying process evaluated by WAXS, SAXS, and USAXS. **Cement and Concrete Research**, v. 91, p. 24-32, 2017.

MATTE, V., MORANVILLE, M., ADENOT, F., RICHET, C., Torrenti, JM. Microestrutura simulada e propriedades de transporte de materiais à base de cimento de alto desempenho. **Pesquisa em cimento e concreto**, v. 30, n. 12, p. 1947-1954, 2000.

MATTHEWS, Dennis B. The Stern-Geary and related methods for determining corrosion rates. **Australian Journal of Chemistry**, v. 28, n. 2, p. 243-251, 1975.

MCCARTER, W. J. A parametric study of the impedance characteristics of cement-aggregate systems during early hydration. **Cement and concrete research**, v. 24, n. 6, p. 1097-1110, 1994.

MCCARTER, W. J.; AFSHAR, A. B. Monitoring the early hydration mechanisms of hydraulic cement. *Journal of materials science*, v. 23, n. 2, p. 488-496, 1988.

McGrath. P. **Development of Test Methods for Predicting Chloride Penetration into High Performance Concrete**, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1996.

MEDEIROS, M. H. F., GOBBI, A., RÉUS, G. C., HELENE, P. Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 452-457, 2013.

MEDEIROS, M. H. F.; BORBA, A. Y.; FILHO, J. H.; PAULO HELENE. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas”, **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 4, p. 475-481, 2012.

MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; HELENE, P., Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions. **Marine Structures**, v. 22, p. 128-141, 2009.

MEDEIROS, R. Estudo da influência das características da cinza volante nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido: proposta de método simplificado em argamassa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFSC, Florianópolis, 2018.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. R. A., GANS, P. S., PEREIRA, E., PEREIRA, E. Electrical Resistivity of Concrete Exposed to Chlorides and Sulfates. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 3, 2019.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A., LIMA, M. G., MEDEIROS, M. H. F., REAL, L. V. . Investigation of the compressive strength and electrical resistivity of concrete with different cement types. **Alconpat**, v. 4, n. 2, p. 116-132, 2014.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; BEM, D. H. Study of the environment factor from Fick's and electrical resistivity models by simulation of chloride diffusivity prediction. **Advances in Structural Engineering**, p. 1369433220906932, 2020.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. *Construction and Building Materials*, v. 107, p. 11–16, 15 mar. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. JM. **Concreto–Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição. São Paulo: IBRACON. 751p, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. JM. **Concrete microstructure, properties and materials**. USA: McGraw-Hill; 2006.

MEI, B. A., MUNTESHARI, O., LAU, J., DUNN, B., PILON, L. Physical interpretations of Nyquist plots for EDLC electrodes and devices. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 122, n. 1, p. 194-206, 2018.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 4, p. 223-248, 2019.

MELARA, E. K., MENDES, A. Z., ANDRECZEVECZ, N. C., BRAGANÇA, M. O., CARRERA, G. T., MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Monitoring by electrochemical impedance spectroscopy of mortars subjected to ingress and extraction of chloride ions. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118001, 2020.

MELCHERS, R. E. Modelling durability of reinforced concrete structures. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, p. 1-11, 2020.

MELO, C. G. DE M. E. Avaliação da influência do NaCl em pastas de cimento portland para cimentação de poços de petróleo em zonas evaporíticas. 2009. 98 F. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Natal, 2009.

MERCADO, H.; LORENTE, S.; BOURBON, X. Chloride diffusion coefficient: A comparison between impedance spectroscopy and electrokinetic tests. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 68-75, 2012..

METHA, P. K.; GERWICK Jr, B.C. **Cracking-corrosion interaction in concrete exposed to marine environment**. *Concrete International*. v. 4, n10, p. 45-51, 1982.

METHA. P. K. – **Influence of microstructure of concrete on durability**. In. *Conferece in tribute to M.M. Regourd – Importance of recente microstrutural desenvolvimento in cement and concrete*. Sherbooke – Canada, oct, 1994.

MIDGLEY, H. G.; ILLSTON, J. M. The penetration of chlorides into hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 14, n. 4, p. 546-558, 1984.

MILLAR, S., GOTTLIEB, C., GÜNTHER, T., SANKAT, N., WILSCH, G., KRUSCHWITZ, S. Chlorine determination in cement-bound materials with laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)—a review and validation. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 147, p. 1-8, 2018.

MINDESS, S. (Ed.). **Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete**. Woodhead Publishing, 2019.

MISHRA, M.; PANDA, K. C. Influence of Silpazz on the Properties of Self-Compacting Recycled Aggregate Concrete. In: *Advances in Structural Engineering and Rehabilitation*. Springer, Singapore, p. 189-199, 2020.

MOHAMED, S., LI, A., MOHAMED, G., BLIARD, C., TOUFIK, B. **Effect of acids and sulphates on the durability of self-compacting concretes**. 4th International Symposium on Materials and Sustainable Development, Abdelhakim DAOUI, Nov 2019, Boumerdes, Algeria. fahal-02367771f

MOHAMMED, M. K. **Multi-scale response of sustainable self-compacting concrete (SCC) to carbonation and chloride penetration**. 2015. Tese de Doutorado. University of Nottingham. 2015.

MONFORE, G.E. The Electrical Resistivity of Concrete. *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*. v. 10, n. 2, p. 35-48, 1968.

MONTEIRO, A.J.A.E.; MEDEIROS-JR, R.A., **Corrosão Acelerada – Uma revisão sobre os métodos de ensaio disponíveis**. 2º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (2º SPPC), artigo 2SPPC1007, pp. 67–80, 2017.

MORA, E., GONZÁLEZ, G., ROMERO, P., CASTELLÓN, E.. Control of water absorption in concrete materials by modification with hybrid hydrophobic silica particles. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 210-218, 2019.

MORETTI, J. P.; NUNES, S.; SALES, A. Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 635-649, 2018.

NAITO, C., FOX, J., BOCCHINI, P., KHAZAALI, M. Chloride migration characteristics and reliability of reinforced concrete highway structures in Pennsylvania. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117045, 2020.

NAMOULNIARA, K., MAHIEUX, PY, LUX, J., AÏT-MOKHTAR, A., TURCRY Efficiency of water repellent surface treatment: Experiments on low performance concrete and numerical investigation with pore network model. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116638, 2019.

NAVI, P.; PIGNAT, C.; HOUST, Y. F. **Simulation of the Porous System of Hydrating Cementitious Materials**. In: 5th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona June 4-9, 2000. 2000. p. 329-343.

NEITHALATH, N.; JAIN, J. Relating rapid chloride transport parameters of concretes to microstructural features extracted from electrical impedance. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 7, p. 1041-1051, 2010.

NEMATOLLAHZADE, M., TAJADINI, A., AFSHOON, I., ASLANI, F. Influence of different curing conditions and water to cement ratio on properties of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117570, 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Editora Bookman Editora, Porto Alegre, 2016.

NGUYEN, T. Q.; BREITKOPF, C. Determination of diffusion coefficients using impedance spectroscopy data. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 165, n. 14, p. E826, 2018.

NILI, M.; SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. The Effect of Fine and Coarse Recycled Aggregates on Fresh and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. **Materials**, v. 12, n. 7, p. 1120, 2019.

NILSSON, L.; NGO, M. H.; GJØRV, O. E. **High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg**. In: Second international conference on concrete under severe conditions: environment and loading. 1998. p. 1193-1198.

NISHIKATA, A.; ICHIHARA, Y.; TSURU, T. An application of electrochemical impedance spectroscopy to atmospheric corrosion study. **Corrosion science**, v. 37, n. 6, p. 897-911, 1995.

NORDTEST METHOD, Concrete, hardened: accelerated chloride penetration, NT BUILD 443. Oslo, 1995.

NORDTEST METHOD, Concrete, mortar and a cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments: NT BUILD 492. Oslo, 1999.

NOUSHINI, A., CASTEL, A., ALDRED, J., RAWAL, A. Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, p. 103290, 2020.

OBOT, I. B.; ONYEACHU, I. B. Electrochemical frequency modulation (EFM) technique: theory and recent practical applications in corrosion research. **Journal of Molecular Liquids**, v. 249, p. 83-96, 2018.

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

OKOYE, F. N.; PRAKASH, S.; SINGH, N. B. Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 1062-1067, 2017.

OLSON, R. A., CHRISTENSEN, B.J., COVERDALE, R.T., FORD, S.J., MOSS, G.M., JENNINGS, H.M., MASON, T.O, GARBOCZI, E.J. Interpretation of the impedance spectroscopy of cement paste via computer modelling. **Journal of materials science**, v. 30, n. 20, p. 5078-5086, 1995.

ORAZEM, M.E., TRIBOLLET B. Chapter 16: **Methods for Representing Impedance**. In: Electrochemical Impedance Spectroscopy. Hoboken, New Jersey: *John Wiley & Sons, Inc.*, pp.309-331., 2008.

ORAZEM, M. E.; TRIBOLLET, Bernard. **Electrochemical impedance spectroscopy**. John Wiley & Sons, 2017.

ORELLAN, J. C.; ESCADEILLAS, Gilles; ARLIGUIE, G. Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 2, p. 227-234, 2004.

OTHMEN, I.; BONNET, S.; SCHOEFS, F. Statistical investigation of different analysis methods for chloride profiles within a real structure in a marine environment. **Ocean Engineering**, v. 157, p. 96-107, 2018.

OTIENO, M .; ALEXANDER, M .; BEUSHAUSEN, H. **Mecanismos de transporte em concreto, corrosão do aço no concreto e avaliação da corrosão** . Relatório de pesquisa, Grupo de Pesquisa em Materiais Concretos e Integridade Estrutural, Universidade da Cidade do Cabo, África do Sul, 2010. 1, 2010.

OTIENO, M.; BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. Effect of chemical composition of slag on chloride penetration resistance of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 56-64, 2014.

OTIENO, M., GOLDEN, G., ALEXANDER, M. G., BEUSHAUSEN, H. Acceleration of steel corrosion in concrete by cyclic wetting and drying: effect of drying duration and concrete quality. **Materials and Structures**, v. 52, n. 2, p. 50, 2019.

OTSUKI, N., NAGATAKI, S. AND NAKASHITA, K., Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials, **Materials Journal**, v. 89, n. 6, p. 587-592, 1992.

OULDKHAOUA, Y. BENABED, B., ABOUSNINA, R., KADRI, EH E KHATIB, J. Efeito do uso de metacaulim como material cimentício suplementar e do vidro de funil reciclado CRT como agregado fino na durabilidade do concreto autoadensável verde. **Materiais de Construção e Construção** , v. 235, p. 117802, 2020.

OŽBOLT, J.; BALABANIĆ, G.; KUŠTER, M. 3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. **Corrosion science**, v. 53, n. 12, p. 4166-4177, 2011.

OZÓRIO, B. P. M., ISAIA, G. C.. **Penetração de cloretos em concretos com altos teores de cinza volante**. III Semengo. Furg. 2008.

PACK, S. W., JUNG, M. S., SONG, H. W., KIM, S. H., ANN, K. Y. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 302-312, 2010.

PAHL, G, BEITZ, W., FELDHUSEN, J., GROTE, K.H. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda. 6 ed., 2005. 411p.

PAN, X., SHI, Z., SHI, C., LING, T. C., LI, N. . A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 578-590, 2017.. 578-590, 2017.

PATEL, R. A., PHUNG, Q. T., SEETHARAM, S. C., PERKO, J., JACQUES, D., MAES, N., VAN BREUGEL, K Diffusivity of saturated ordinary Portland cement-based materials: A critical review of experimental and analytical modelling approaches. **Cement and Concrete Research**, v. 90, p. 52-72, 2016.

PAULON, V. A. A microestrutura do concreto convencional. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, v. 1, p. 583-604, 2005.

PEDROSO, F.L. **Concreto: as origens e as evoluções do material mais usado pelo homem**. Concreto e Construções, n. 53, 14-19, 2009.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 324-332, 2018.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre, 2001.

PÉREZ, C., COLLAZO, A., IZQUIERDO, M., MERINO, P., NÓVOA, X. R. Electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion process on coated galvanized steel in a salt spray fog chamber. **Corrosion**, v. 56, n. 12, p. 1220-1232, 2000.

PEREZ, E. W. R. **Influência da idade e cura do concreto na resistividade elétrica**. 2015. Dissertação (Mestrado) Estruturas e Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2015. 95 p.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. Editora Globo/MEC, Porto Alegre, 435p., 1975.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland**. Editora Globo, 13aEd, 1998.

PILLA, L. **Físico-química II: equilíbrio entre fases, soluções líquidas e eletroquímica** . 2º Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2010. 468 p.

PLANK, J., SAKAI, E., MIAO, C. W., YU, C., HONG, J. X. Chemical admixtures. Chemical admixtures—Chemistry, applications and their impact on concrete

microstructure and durability. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 81-99, 2015.

PLUSQUELLEC, G.; NONAT, A. Interactions between calcium silicate hydrate (CSH) and calcium chloride, bromide and nitrate. **Cement and Concrete Research**, v. 90, p. 89-96, 2016.

POURSAEE, A. Potentiostatic transient technique, a simple approach to estimate the corrosion current density and Stern–Geary constant of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 9, p. 1451-1458, 2010.

QIN, Y., ZHAO, Y., CHEN, X., WANG, L., LI, F., BAO, T. Moist curing increases the solar reflectance of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 114-118, 2019.

QU, Z. Y.; YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Relationship between the particle size and dosage of LDHs and concrete resistance against chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 105, p. 81-90, 2018.

RAJA, V. S. Electrochemical Impedance Spectroscopy for Nondestructive Evaluation of Corrosion Processes. **Non-Destructive Evaluation of Corrosion and Corrosion-assisted Cracking**, p. 160, 2019.

RAJABIPOUR, F.; WEISS, J.; ABRAHAM, D. M. In situ electrical conductivity measurements to assess moisture and ionic transport in concrete (A discussion of critical features that influence the measurements). In: **Proceedings of the International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur**. Rilem, Paris, France, 2004.

RAJHANS, P.; PANDA, S. K.; NAYAK, S. Sustainability on durability of self compacting concrete from C&D waste by improving porosity and hydrated compounds: a microstructural investigation. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 559-575, 2018.

RAJHANS, P.; PANDA, S. K.; NAYAK, S.. Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 557-570, 2018.

REAL, L. V.; OLIVEIRA, D. R. B.; SOARES, T.; MEDEIROS, M. H. F.. Método colorimétrico por aspersion de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruro en concreto: estado del arte. **Revista Alconpat**, v. 5, n. 2, p. 151-161, 2015.

REDDY, A. SUCHITH; KUMAR, P. RATHISH; RAJ, P. Anand. Development of Sustainable Performance Index (SPI) for Self-Compacting Concretes. **Journal of Building Engineering**, v. 27, p. 100974, 2020.

REED, J.S. **Introduction to The Principles of Ceramic Processing**. New York: EBS, 1988.

REED, S. K.; LANNING, O. J.; MADDEN, P.I A. Electrochemical interface between an ionic liquid and a model metallic electrode. **The Journal of chemical physics**, v. 126, n. 8, p. 084704, 2007.

REMESAR, J. C.; VERA, S.; LOPEZ, M. Assessing and understanding the interaction between mechanical and thermal properties in concrete for developing a structural and insulating material. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 353-364, 2017.

RENGARAJU, S.; NEELAKANTAN, L.; PILLAI, RADHAKRISHNA G. Investigation on the polarization resistance of steel embedded in highly resistive cementitious systems—An attempt and challenges. **Electrochimica Acta**, v. 308, p. 131-141, 2019.

REVILLA-CUESTA, V., SKAF, M., FALESCHINI, F., MANSO, J. M., ORTEGA-LÓPEZ, V. Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: An overview. **Journal of Cleaner Production**, p. 121362, 2020.

RIBEIRO, D. V. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. 2010. 222p. Tese. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. São Carlos: UFSCar, 2010.

RIBEIRO, D. V.; ABRANTES, J. C. C. Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: a new approach. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 98-104, 2016.

RIBEIRO, D. V.; SOUZA, C. A. C.; ABRANTES, J. C. C. Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) to monitoring the corrosion of reinforced concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 4, p. 529-546, 2015.

RIBEIRO, R. R. J.; DIÓGENES, H. J. F.; NOBREGA, M. V.; DEBS, A. E. A survey of the mechanical properties of concrete for structural purposes prepared on construction sites. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 5, p. 722-744, 2016.

RIETVELD, H. M., Line profile of neutron powderdiffraction peaks for structure refinement, **Acta Crystallographica**, v. 22, n. 1, p. 151-152, 1967.

RÖBLER, M.; ODLER, I. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes I. Effect of porosity. **Cement and Concrete Research**, v. 15, n. 2, p. 320-330, 1985

ROCHA, JWS. **Investigação das propriedades elétricas em petróleo por espectroscopia de impedância**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, 2017.

ROSS MACDONALD J. Impedance spectroscopy, theory, experiment, and applications. New Jersey: **Wiley-Interscience**; 2005, ISBN: 0-471-64749-7.

ROUGEAU, P.; GUIRAUD, P. A durabilidade no contexto normativo europeu in: Ed. OLLIVER, J. P.; VICHOT. Ed. Tradução CASCUDO, O; CARASEK, H. A Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Cap.7.

ROVENTI, G., BELLEZZE, T., GIULIANI, G., CONTI, C. Corrosion resistance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete: effect of wet–dry cycles in tap water and in chloride solution on the passivating layer. **Cement and Concrete Research**, 65, 76-84, 2014.

SABBAĞ, N.; UYANIK, O. Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions. *Journal of Applied Geophysics*, v. 155, p. 13-25, 2018.

SAEIDPOUR, M. **Experimental studies of sorption and transport of moisture in cement based materials with supplementary cementitious materials**. 2015. 157 f. Doctoral Dissertation. Division of Building Materials, Faculty of engineering, Lund University, Sweden, 2015.

SAETTA, A. V.; SCHREFLER, B. A.; VITALIANI, R. V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 4, p. 761-772, 1993.

SAGÜÉS, A. A.; KRANC, S. C.; MORENO, E. I. The time-domain response of a corroding system with constant phase angle interfacial component: Application to steel in concrete. **Corrosion Science**, v. 37, n. 7, p. 1097-1113, 1995.

SALOMÃO, M. Cl. de F. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água**. 2016. 248 f. Tese (Doutorado) – Estruturas e Construção Civil- Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2016.

SAMIMI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; MAGHSOUDI, A. A.. Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 247-263, 2018.

SAMIMI, K.; DEHGHAN KAMARAGI, G. R.; LE ROY, Robert. Microstructure, thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions. **Magazine of Concrete Research**, v. 71, n. 3, p. 126-143, 2019.

SAN MARTÍN, F.; KRACHT, W.; VARGAS, T. Biodepression of pyrite using *Acidithiobacillus ferrooxidans* in seawater. **Minerals Engineering**, v. 117, p. 127-131, 2018.

SÁNCHEZ-PÉREZ, J. F.; ALHAMA, I. Universal curves for the solution of chlorides penetration in reinforced concrete, water-saturated structures with bound chloride. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 84, p. 105201, 2020.

SANDHU, R. K.; SIDDIQUE, R. Strength properties and microstructural analysis of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 371-383, 2019.

SANTAMARÍA, A., ORBE, A., LOSAÑEZ, M. M., SKAF, M., ORTEGA-LOPEZ, V., GONZÁLEZ, J. J. **Self-Compacting Concrete Incorporating Electric Arc-Furnace Steelmaking Slag as Aggregate**. *Materials and Design*, v. 115, p. 179-193, 2017.

SANTOS, S. A.; DA SILVA, P. R.; DE BRITO, J. Durability evaluation of self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry. **Magazine of Concrete Research**, v. 71, n. 24, p. 1265-1282, 2019.

SANTOS, W. F. D. **Influência da cura térmica nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto autoadensável contendo adições de metacaulim e fíler calcário** / Wesley Fêu dos Santos. - 2016. 100 f.: il. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

SARASWATHY V, SONG HW. Electrochemical studies on the corrosion performance of steel embedded in activated fly ash blended concrete. **Electrochimica Acta**, v. 51, n. 22, p. 4601-4611, 2006.

SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117540, 2020.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e das propriedades de transporte de massa de concreto com vistas à avaliação de suas durabilidades**. 1998. 172 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SCHANKOSKI, R. A.; PILAR, R.; DE MATOS, P. R.; PRUDÊNCIO JR, L. R.; FERRON, R. D Fresh and hardened properties of self-compacting concretes produced with diabase and gneiss quarry by-product powders as alternative fillers. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 659-670, 2019.

SERRA, J. H. F.; CABRAL, A. E. B. Analysis of constructive parameters of vertical reinforced concrete structure with self-compacting concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 5, 2020.

SERRALHEIRO, M. I.; DE BRITO, J.; SILVA, A. Methodology for service life prediction of architectural concrete facades. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 261-274, 2017.

SHAH, V., SCRIVENER, K., BHATTACHARJEE, B., BISHNOI, S. Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 109, p. 184-197, 2018.

SHAHEEN, F.; PRADHAN, B. Effect of chloride and conjoint chloride–sulfate ions on corrosion of reinforcing steel in electrolytic concrete powder solution (ECPS). **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 99-112, 2015.

SHAIK, R. A. **Effect of Dielectric Inter-layer in Performance of the Multi-functional Material in Mechanical, Thermal and Environmental Loading Conditions**. 2019. 64 f. Degree of Master of Science in Mechanical Engineering. The University of Texas. 2019 Arlington, Texas. 2019.

SHEN, D. Corrosion Resistance of Carbon Steel Reinforced Solidia Cement Concrete in corrosive waters: An Electrochemical Impedance Spectroscopy Study. **Int. J. Electrochem. Sci**, v. 14, p. 6513-6521, 2019.

SHI M, CHEN Z, SUN J. Determination of chloride diffusivity in concrete by AC impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 7, p. 1111-1115, 1999.

SHI, W., CHEN, Y., LIU, P., XU, D. Corrosion Investigation of Reinforced Concrete Based on Piezoelectric Smart Materials. **Materials**, v. 12, n. 3, p. 519, 2019.

SHI, X., XIE, N., FORTUNE, K., GONG, J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 125-138, 2012.

SILVA, I. J.. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2000. 279 f. Tese (Doutorado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SILVA, P.C., FERREIRA, R.M. AND FIGUEIRAS, H. Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete. Influence of Test Procedure, XII DBMC, Porto, Portugal, 2011.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 400-409, 2016.

SINGH, R.; B., MUDALI, U. K.; SINGH, P. (ED.). **Non-destructive Evaluation of Corrosion and Corrosion-assisted Cracking**. John Wiley & Sons, Incorporated, 2019, 448 p.

SINGH, S. P.; KUMAR, N. Review of self-compacting concrete using corrosion inhibitorS. **Polarization**, v. 5, n. 04, 2019.

SMYL, D. Electrical tomography for characterizing transport properties in cement-based materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118299, 2020.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - Relatório anual de Dezembro 2019. <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=44>. Acesso em 13.11.2020.

SOHAIL, M. G., KAHRAMAN, R., ALMUAIMI, N.A., GENCTURK, B., ALNAHHAL, W., DARWOOD, M., BELARBI, A. Comportamento eletroquímico de aços de reforço de concreto leve e resistente à corrosão. **Materiais de construção e construção**, v. 232, p. 117205, 2020.

SONG, G.. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete. **Cement and concrete research**, v. 30, n. 11, p. 1723-1730, 2000.

SONG, G. Theoretical analysis of the measurement of polarisation resistance in reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 6, p. 407-415, 2000.

SONG, H.-W.; SARASWATHY, V. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A. **Int. J. Electrochem. Sci**, v. 2, p. 1-28, 2007.

SONG, Z., JIANG, L., LIU, J., LIU, J. Influence of cation type on diffusion behavior of chloride ions in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 150-158, 2015.

SPIESZ, P.; BALLARI, M. M.; BROUWERS, H. J. H. RCM: a new model accounting for the non-linear chloride binding isotherm and the non-equilibrium conditions between the free-and bound-chloride concentrations. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 293-304, 2012.

STANISH, K. D., HOOTON, R. D., THOMAS, M. **D. Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review**. United States. Federal Highway Administration, 2001.

STEFANONI, M.; ANGST, U.; ELSENER, B. Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete—A critical review. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 35-48, 2018.

SUBBIAH, K.; VELU, S.; KWON, S. J.; LEE, H. S.; RETHINAM, N.; PARK, D. J. A novel in-situ corrosion monitoring electrode for reinforced concrete structures. **Electrochimica Acta**, v. 259, p. 1129-1144, 2018.

SUGIYAMA, T.; RITTHICHAUY, W.; TSUJI, Y. Experimental investigation and numerical modeling of chloride penetration and calcium dissolution in saturated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 1, p. 49-67, 2008.

SUN, B.; XIAO, R. C.; GUO, J.; ZHAO, Q. Probabilistic Chloride Penetration Models and Corrosion Initiation Probability of RC Bridge Based on Long-Term Test Data. **Journal of Bridge Engineering**, v. 24, n. 4, p. 04019012, 2019.

SUN, R., HU, X., LING, Y., ZUO, Z., ZHUANG, P., WANG, F. Chloride diffusion behavior of engineered cementitious composite under dry-wet cycles. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119943, 2020.

SURYANTO, B., KIM, J. MCCARTER, W. J., STARRS, G., AITKEN, M. W. Assessing the Performance and Transport Properties of Concrete using Electrical

Property Measurements. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 18, n. 7, p. 437-455, 2020.

TALERO, R.; TRUSILEWICZ, L.; DELGADO, A.; PEDRAJAS, C.; LANNEGRAND, R.; RAHHAL, V. Comparative and semi-quantitative XRD analysis of Friedel's salt originating from pozzolan and Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2370-80, 2011.

TANG, W. C.; WANG, Z.; DONNE, S. W.; FORGHANI, M.; LIU, Y. Influence of Red Mud on Mechanical and Durability Performance of Self-compacting Concrete. **Journal of hazardous materials**, p. 120802, 2019.

TANG, L.; SØRENSEN, H. E. Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete. **Materials and Structures**, v. 34, n. 8, p. 479, 2001.

TANG, S. W., CAI, X. H., HE, Z., ZHOU, W., SHAO, H. Y., LI, Z. J., CHEN, E. The review of early hydration of cement-based materials by electrical methods. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 15-29, 2017.

TANG, W. C.; WANG, Z.; DONNE, S. W.; FORGHANI, M.; LIU, Y. Influence of Red Mud on Mechanical and Durability Performance of Self-Compacting Concrete. **Journal of hazardous materials**, p. 120802, 2019.

TARANATH, B. S. **Tall Building Design: Steel, Concrete, and Composite Systems**. Taylor & Francis Group, CRC Press, 2016. 883p.

TAYLOR, H. F.W. **Cement Chemistry**. 2 ed. London: Thomas Telford, 1997.

TAYLOR, HFW; FAMY, C.; SCRIVENER, KL Formação atrasada de etringita. **Pesquisa em cimento e concreto**, v. 31, n. 5, p. 683-693, 2001.

TENNICH, M.; OUEZDOU, M. B.; KALLEL, A. Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 335-342, 2017.

THOMPSON, B. R., HOROZOV, T. S., STOYANOV, S. D., PAUNOV, V. N. Hierarchically structured composites and porous materials from soft templates: fabrication and applications. **Journal of materials chemistry A**, v. 7, n. 14, p. 8030-8049, 2019.

TIAN, Y.; WANG, P.; ZHAO, T.; MA, Z.; JIN, Z.; ZHAO, H. Influence of Water-Repellent Treatment with Silicon Resin on Properties of Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, 2019.

TIITTA, M.; OLKKONEN, H. Electrical impedance spectroscopy device for measurement of moisture gradients in wood. **Review of scientific instruments**, v. 73, n. 8, p. 3093-3100, 2002.

TJARONGE, M. W., IRFAN, U. R. Porosity, pore size and compressive strength of self compacting concrete using sea water. **Procedia Engineering**, v. 125, p. 832-837, 2015.

TOHIDI, S.; SHARIFI, Y. Load-carrying capacity of locally corroded steel plate girder ends using artificial neural network. **Thin-Walled Structures**, v. 100, p. 48-61, 2016.

TORRES, A. S.; GUIMARÃES, D.; SILVA FILHO, L. C. P. D. **Avaliação do método CAIM de corrosão acelerada em diferentes condições de ensaio**. In: II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, Rio Grande, 2006.

TORRES, A. S. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – frente ao processo de corrosão em armaduras de concreto armado**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

TORRES-LUQUE, M.; BASTIDAS-ARTEAGA, E.; SCHOEFS, F., SÁNCHEZ-SILVA, M.; OSMA, J. F. Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges. **Construction and building materials**, v. 68, p. 68-81, 2014.

TRÄGÅRDH, J. PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE. In: **PRO 7: 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete**. RILEM Publications, 1999. p. 175.

TRIPATHI, S.R.; OGURA, H.; INOUE, H.; HASEGAWA, T.; TAKEYA, K.; KAWASE, K. Measurement of chloride ion concentration in concrete structures using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS), **Corrosion Science**, v. 62, p. 5-10, 2012.

TRITT, T. M. **Thermal conductivity: theory, properties, and applications**. New York: Springer Science Business Media, 2005.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. Dissertação (mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS. 2010.

TRTNIK, G.; GAMS, M. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages. **Ultrasonics**, v. 54, n. 1, p. 66-75, 2014.

TUTIKIAN, B. F. Método para dosagem de concreto auto-adensáveis Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFRGS, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Concreto auto-adensável. São Paulo: PINI, 2008.

UM, N.. Effect of Cl Removal in MSWI Bottom Ash via Carbonation with CO₂ and Decomposition Kinetics of Friedel's Salt. **Materials transactions**, p. M-M2019811, 2019.

UNE 83987-14. Durabilidad Del hormigon. Metodos de ensayo. Determinacion de los coeficientes de difusion de los iones cloruro em el hormigon endurecido . Metodo multirregimen, 2014.

VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais**. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre. 2005.

VAKHSHOURI, B.; NEJADI, S. Mix design of light-weight self-compacting concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 4, p. 1-14, 2016.

VAN DAMME, H. Concrete material science: Past, present, and future innovations. **Cement and concrete research**, v. 112, p. 5-24, 2018.

VAN DEN HEEDE P; VAN BELLEGHEM B; ARAÚJO M.A.; FEITEIRA J; DE BELIE N. Screening of Different Encapsulated Polymer-Based Healing Agents for Chloride Exposed Self-Healing Concrete Using Chloride Migration Tests. **Key Engineering Materials**. V. 761: p.152-158, 2018.

VAN ZIJL, G. P., PAUL, S. C. A Novel Link of The Time Scale in Accelerated Chloride-Induced Corrosion Test in Reinforced SHCC. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 15-19, 2018.

VAN ZIJL, G. P., WITTMANN, F. H., OH, B. H., KABELE, P., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M., OGAWA, A., HOSHIRO, H., MECHTCHERINE, V., ALTMANN, F., LEPECHM M.D. Durability of strain-hardening cement-based composites (SHCC). **Materials and structures**, v. 45, n. 10, p. 1447-1463, 2012.

VASKE, N. R. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. Tese de Doutorado. – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre. 2012.

VÁZQUEZ-ROWE, I.; ZIEGLER-RODRIGUEZ, K.; LASO, J.; QUISPE, I.; ALDACO, R.; KAHHAT, R. Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 142, p. 283-292, 2019.

VEDALAKSHMI, R., DEVI, R. R., EMMANUEL, B., PALANISWAMY, N. Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete: an electrochemical impedance spectroscopic approach. **Materials and Structures**, v. 41, n. 7, p. 1315-1326, 2008.

VEDALAKSHMI, R., SARASWATHY, V., SONG, H. W., PALANISWAMY, N. Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete using Warburg diffusion coefficient. **Corrosion Science**, v. 51, n. 6, p. 1299-1307, 2009.

VICENTE, C., CASTELA, A. S., NEVES, R., MONTEMOR, M. F. Assessment of the influence of Concrete Modification in the Water Uptake/Evaporation Kinetics by Electrochemical Impedance Spectroscopy. **Electrochimica Acta**, v. 247, p. 50-62, 2017.

VIEIRA, D. R.; CALMON, J. L.; ZULCÃO, R.; COELHO, F. Z. Consideration of strength and service life in cradle-to-gate life cycle assessment of self-compacting concrete in a maritime area: a study in the Brazilian context. **Environment, development and sustainability**, v. 20, n. 4, p. 1849-1871, 2018.

VIPULANANDAN, C.; AMANI, N. Characterizing the pulse velocity and electrical resistivity changes in concrete with piezoresistive smart cement binder using Vipulanandan models. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 519-530, 2018.

VOLPI-LEÓN, V., LÓPEZ-LÉON, L. D., HERNÁNDEZ-ÁVILA, J., BALTAZAR-ZAMORA, M. A., OLGUÍN-COCA, F. J., LÓPEZ-LEÓN, A. L. **Corrosion Study in Reinforced Concrete Made with Mine Waste as Mineral Additive**. *Int. J. Electrochem. Sci*, v. 12, p. 22-31, 2017.

WANG J., NG, P. L., SU, H., DU, J.. Influence of the coupled time and concrete stress effects on instantaneous chloride diffusion coefficient. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117645, 2020.

WANG, F., XU, J., XU, Y., JIANG, L., MA, G.. A comparative investigation on cathodic protections of three sacrificial anodes on chloride-contaminated reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118476, 2020.

WANG, G.M., KONG, Y. SHUI, Z.H., LI, Q. , HAN, J.L. Experimental investigation on chloride diffusion and binding in concrete containing metakaolin, **Corrosion engineering, science and technology**, v. 49, n. 4, p. 282-286, 2014.

WANG, H.; QIAN, H.; GAO, Y. Non-darcian flow in loess at low hydraulic gradient. **Engineering Geology**, v. 267, p. 105483, 2020.

WANG, Q., WANG, D., CHEN, H.,. The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 125-137, 2017.

WANG, Y., ZUO, Y., ZHAO, X., ZHA, S.. The adsorption and inhibition effect of calcium lignosulfonate on Q235 carbon steel in simulated concrete pore solution. **Applied Surface Science**, v. 379, p. 98-110, 2016.

WANG, W.; JUAREZ-ROBLES, D.; MUKHERJEE, P. P. Electroanalytical Quantification of Electrolyte Transport Resistance in Porous Electrodes. **Journal of the Electrochemical Society**, 2020.

WANG, X. H., BASTIDAS-ARTEAGA, E., GAO, Y. Probabilistic analysis of chloride penetration in reinforced concrete subjected to pre-exposure static and fatigue loading and wetting-drying cycles. **Engineering Failure Analysis**, 84, 205-219, 2018.

WANG, Y., AN, M. Z., YU, Z. R., HAN, S., JI, W. Y. Durability of reactive powder concrete under chloride-salt freeze–thaw cycling. **Materials and Structures**, v. 50, n. 1, p. 18, 2017.

WANG, Y.; FU, K. Comparisons of instantaneous chloride diffusion coefficients determined by RCM method and chloride natural diffusion test. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 595-604, 2019.

WANG, Y.; CHENG, X.; LI, X. Electrochemical behavior and compositions of passive films formed on the constituent phases of duplex stainless steel without coupling. **Electrochemistry Communications**, v. 57, p. 56-60, 2015.

WASIM, M., NGO, T. D., ABID, M.. Investigation of long-term corrosion resistance of reinforced concrete structures constructed with various types of concretes in marine and various climate environments. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117701, 2020.

WATANABE, A.; FURUKAWA, H.; MIYAMOTO, S.; MINAGAWA, H. Non-destructive chemical analysis of water and chlorine content in cement paste using near-infrared spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 95-104, 2019.

WEE, T. H. SURYAVANSHI, A. K. TIN, S. S. Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. *ACI Mater, Journal*, v. 92, p. 221–231, 2000.

WEI, R., DU, Y., ZOU, L., LI, D. Statistical analysis of geometrical parameters of corroded reinforcement. **International Journal of Computational Physics Series**, v. 1, n. 1, p. 191-196, 2018.

WEI, Y.; GUO, W.; LIANG, S. Chloride Ingress in Internally Cured Concrete under Complex Solution. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, p. 04018037, 2018.

WIEDENMANN, D., Keller, L., Holzer, L., Stojadinović, J., Münch, B., Suarez, FUMEY, B. HAGENDORFER, H., BREONNIMANN, R. MODREGGER, P., GORBAR, M., VOGT, U. ZEUTTEL, A., LA MANTIA, F. WEPF, R. GROBETY, B. Three-dimensional pore structure and ion conductivity of porous ceramic diaphragms. **AIChE Journal**, v. 59, n. 5, p. 1446-1457, 2013.

WU, L., LI, W., YU, X.. Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 406-413, 2017. 2017;152:406-413.

WU, H., PAN, K., DAI, Y., JIN, H., LI, F. Influence of Chloride Ions on Corrosion Behavior of Steel Bars in a Simulated Concrete Pore Solution. **Int. J. Electrochem. Sci**, v. 14, p. 4995-5007, 2019.

WU, J., ZHANG, R., DIAO, B., ZHANG, W., XU, J. Effects of pre-fatigue damage on high-cycle fatigue behavior and chloride permeability of RC beams. **International Journal of Fatigue**, 122, 9-18, 2019.

WU, L.; DAI, P.; LI, Y. Determination of the transport properties of structural concrete using AC impedance spectroscopy techniques. **Journal of Engineering**, v. 2016, 2016. Artigo ID 2630186.

WU, L.; LI, W.; YU, X. Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 406-413, 2017.

XIAN, XIAN, X. P., WANG, Y. S., XING, F., DONG, B. Q. Measuring and modeling analysis of electrochemical impedance spectroscopy for hydration procedure of cement materials. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications Ltd, 2012. p. 1033-1036.

XIAO, L., PENG, J., ZHANG, J., MA, Y., CAI, C. S. Comparative assessment of mechanical properties of HPS between electrochemical corrosion and spray corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117735, 2020.

XIONG, C., JIANG, L., ZHANG, Y., CHU, H., JIANG, P. Characterization of sulfate diffusion into cement paste by low frequency impedance spectroscopy. **Materials Letters**, v. 174, p. 234-237, 2016.

XU, H; CHEN, J-k. Coupling effect of corrosion damage on chloride ions diffusion in cement based materials. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118225, 2020.

XU, Hui; CHEN, Jian-kang. Coupling effect of corrosion damage on chloride ions diffusion in cement based materials. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118225, 2020.

XU, Y., HE, L., YANG, L., WANG, X., HUANG, Y. . Electrochemical study of steel corrosion in saturated calcium hydroxide solution with chloride ions and sulfate ions. **Corrosion**, v. 74, n. 10, p. 1063-1082, 2018.

YAN, X., JIANG, L., SONG, Z., CHEN, Y. Using non-destructive testing tools to assess the pore structure of slag-blended cement paste under steam curing. **Magazine of Concrete Research**, p. 1-10, 2019.

YANG, J.; ZHANG, P. A concise pore structure model for predicting the effective ion diffusion coefficients of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120321, 2020.

YANG, X., LIU, J., LI, H., REN, Q. Performance and ITZ of pervious concrete modified by vinyl acetate and ethylene copolymer dispersible powder. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117532, 2020.

YANG, P., DHANDAPANI, Y., SANTHANAM, M., NEITHALATH, N. Simulation of chloride diffusion in fly ash and limestone-calcined clay cement (LC3) concretes and the influence of damage on service-life. **Cement and Concrete Research**, v. 130, p. 106010, 2020.

YANG, T.; GUAN, B.; LIU, G.; JIA, Y.. Modeling of Chloride Ion Diffusion in Concrete under Fatigue Loading. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 23, n. 1, p. 287-294, 2019.

YANG, X., LIU, J., LI, H., REN, Q.,. Performance and ITZ of pervious concrete modified by vinyl acetate and ethylene copolymer dispersible powder. **Constr. Build. Mater.** 235, 117532. 2020.

YAO, Y.; WANG, L.; WITTMANN, F. H.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E.; GEHLEN, C., LI, J. Recommendation of RILEM TC 246-TDC: test methods to determine durability of concrete under combined environmental actions and mechanical load. **Materials and Structures**, v. 50, n. 2, p. 155, 2017.

YE, H., JIN, N., JIN, X., FU, C. Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying–wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 259-269, 2012.

YIO, M. H. N.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. 3D pore structure and mass transport properties of blended cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 117, p. 23-37, 2019.

YONG, D. Effect of Acid Rain Pollution on Durability of Reinforced Concrete Structures. **E&ES**, v. 450, n. 1, p. 012115, 2020.

YOUNG, B. A.; HALL, A.; PILON, L.; GUPTA, P.; SANT, G. Can the compressive strength of concrete be estimated from knowledge of the mixture proportions? New insights from statistical analysis and machine learning methods. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 379-388, 2019.

YOUNG, J. Francis. Cement-based materials. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 3, n. 5, p. 505-509, 1998.

YOUNIS, A., EBEAD, U., SURANENI, P., NANNI, A. Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 276-286, 2018.

YU, F.; XU, P.; FANG, Y.; ZHANG, Y.; JIANG, J. Stiffness Analysis of Recycled Self-Compacting Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns under Eccentric Compression. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

YU, Y., GAO, W., CASTEL, A., LIU, A., FENG, Y., CHEN, X., MUKHERJEE, A., A Modelling steel corrosion under concrete non-uniformity and structural defects. **Cement and Concrete Research**, v. 135, p. 106109, 2020.

YU, H.; TAN, Y.; FENG, T. Study of Temporal Change in Chloride Diffusion Coefficient of Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 1, p. 103-112, 2019.

YUAN, Q., SHI, C., DE SCHUTTER, G., AUDENAERT, K. E DENG, D. Ligação de cloreto de materiais à base de cimento submetidos a um ambiente externo de cloreto - uma revisão. **Materiais de construção e construção** , v. 23, n. 1, p. 1-13, 2009.

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

ZAMPIERE, V. A. **Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo: USP, São Paulo, 1989.

ZHAN, H.; JIANG, H.; JIANG, R.; ZHANG, J. Diffusion coefficients estimated from coda wave measurements for nondestructive evaluation of real-size concrete structures. In: **Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIII**. International Society for Optics and Photonics, 2019. p. 109721G.

ZHANG, J., ZHAO, J., ZHANG, Y., GAO, Y., ZHENG, Y. . Instantaneous chloride diffusion coefficient and its time dependency of concrete exposed to a marine tidal environment. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 225-234, 2018.

ZHANG, J.; LIU, C.; SUN, M.; LI, Z. An innovative corrosion evaluation technique for reinforced concrete structures using magnetic sensors. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 68-75, 2017.

ZHANG, S. P.; ZONG, L. Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, 2014.

ZHANG, Y.; YANG, Z.; YE, G. Dependence of unsaturated chloride diffusion on the pore structure in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 127, p. 105919, 2020.

ZHANG, Y.; ZHANG, M.; YE, G. Influence of moisture condition on chloride diffusion in partially saturated ordinary Portland cement mortar. **Materials and Structures**, 51, n. 2, p. 36, 2018.

ZHANG, Y.; ZHOU, X.; ZHAO, J.; ZHUANG, H.; GAO, Y.; ZHANG, Y. Time dependency and similarity of decay process of chloride diffusion in concrete under simulated marine tidal environment. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 332-343, 2019.

ZHANG, YONG; YANG, ZHENGXIAN; YE, GUANG. Dependence of unsaturated chloride diffusion on the pore structure in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 127, p. 105919, 2020.

ZHANG,Y.;BINNER,J. Effect of Dispersants on the Reology of Aqueous Silicon Carbide Suspensions. **Ceramics International** v.34,p.1381-1386,2008.

ZHAO, Y., WANG, H., ZHOU, H., LIN, T. Directional fluid transport in thin porous materials and its functional applications. **Small**, v. 13, n. 4, p. 1601070, 2017.

ZHAO, Y., XU, X., WANG, Y., DONG, J. Characteristics of pitting corrosion in an existing reinforced concrete beam exposed to marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117392, 2020.

ZHOU, H. W.; YANG, S.; ZHANG, S. Q. Modeling non-Darcian flow and solute transport in porous media with the Caputo–Fabrizio derivative. **Applied Mathematical Modelling**, v. 68, p. 603-615, 2019.

ZHU, F., TAKAOKA, M., OSHITA, K., MORISAWA, S., TSUNO, H., KITAJIMA, Y. Chloride behavior in washing experiments of two kinds of municipal solid waste incinerator fly ash with different alkaline reagents. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 59, n. 2, p. 139-147, 2009.

ZHU, W.. Permeation properties of self-compaction concrete. In: **Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications**. Woodhead Publishing, 2020. p. 117-130.

Anexos

Anexo A - Diagramas de Nyquist

A seguir os diagramas de Nyquist obtidos para a caracterização do CC e CAA por EIE de forma individualmente nas idades de cura de 3, 5, 7 e 28 dias durante os ciclos de secagem e molhagem por um período de exposição de 2 anos são apresentados.

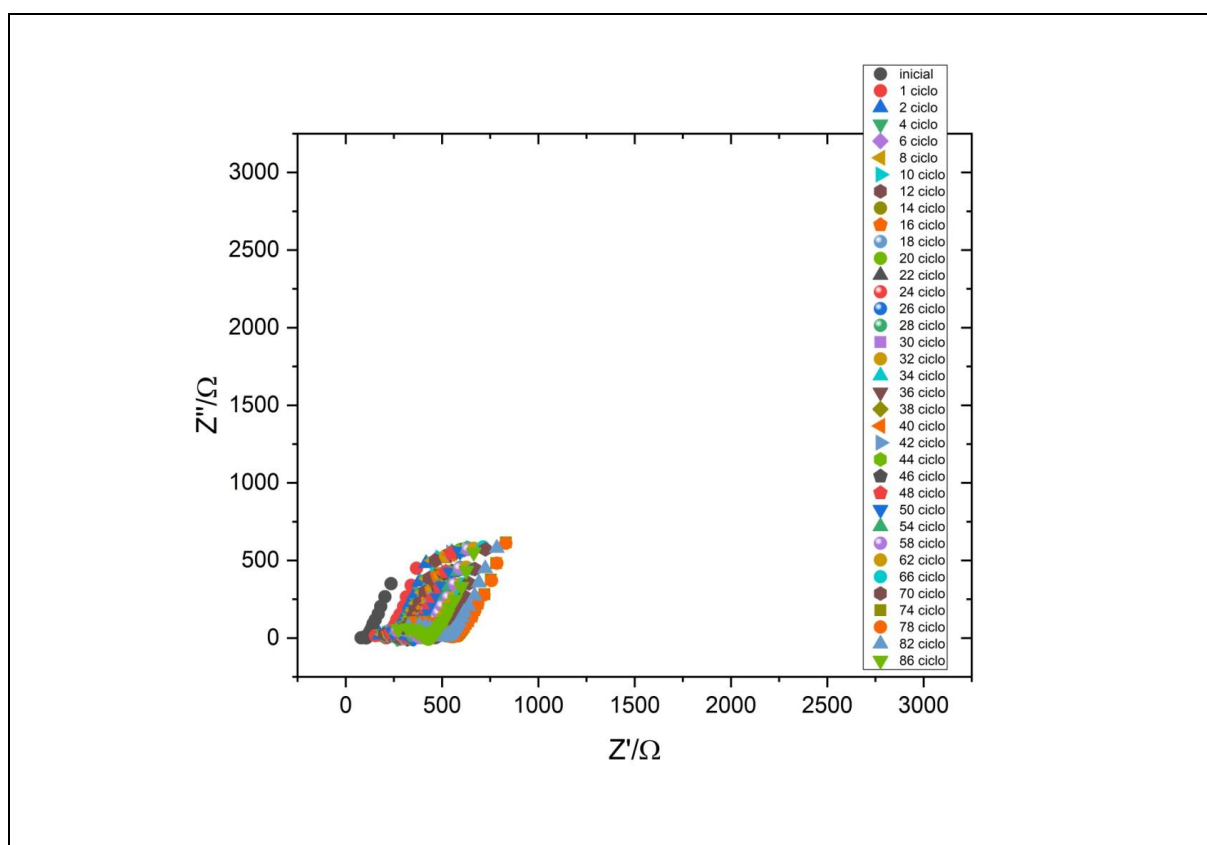


Figura A.1 – Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do CC curado a 3 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem. Os valores dos eixos serão multiplicados pela área média de exposição da barra ($0,0035 \text{ m}^2$).

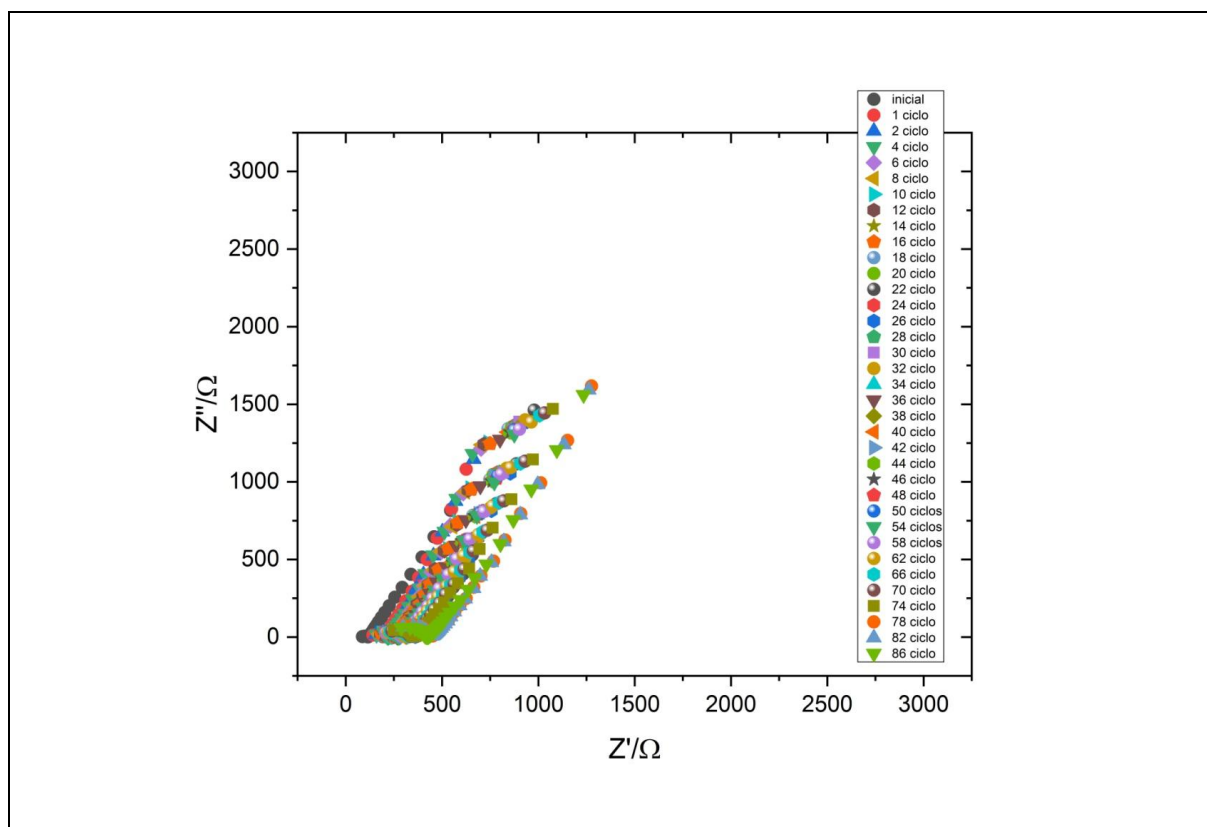


Figura A.2 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do CC curado a 5 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem. Os valores dos eixos serão multiplicados pela área média de exposição da barra ($0,0035 \text{ m}^2$).

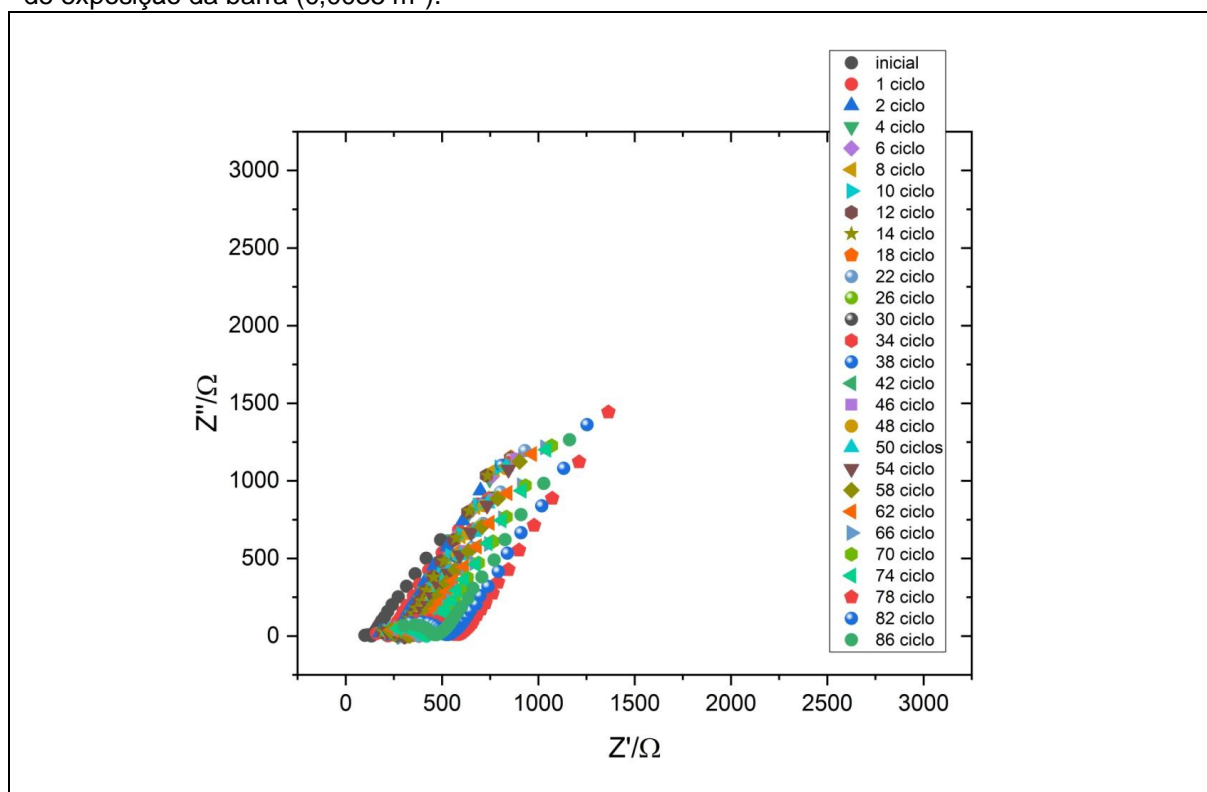


Figura A.3 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do CC curado a 7 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem. Os valores dos eixos serão multiplicados pela área média de exposição da barra ($0,0035 \text{ m}^2$).

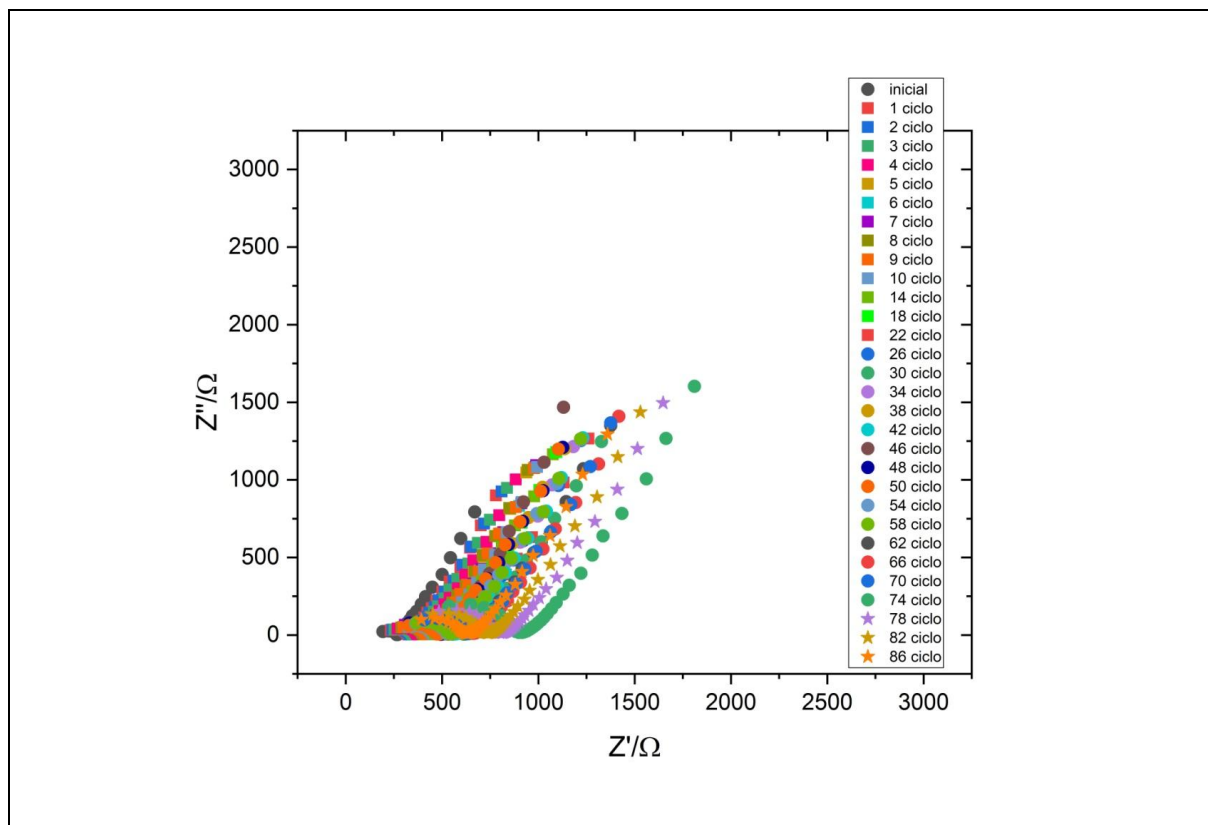


Figura A.4 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do CC curado a 28 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem. Os valores dos eixos serão multiplicados pela área média de exposição da barra ($0,0035 \text{ m}^2$).

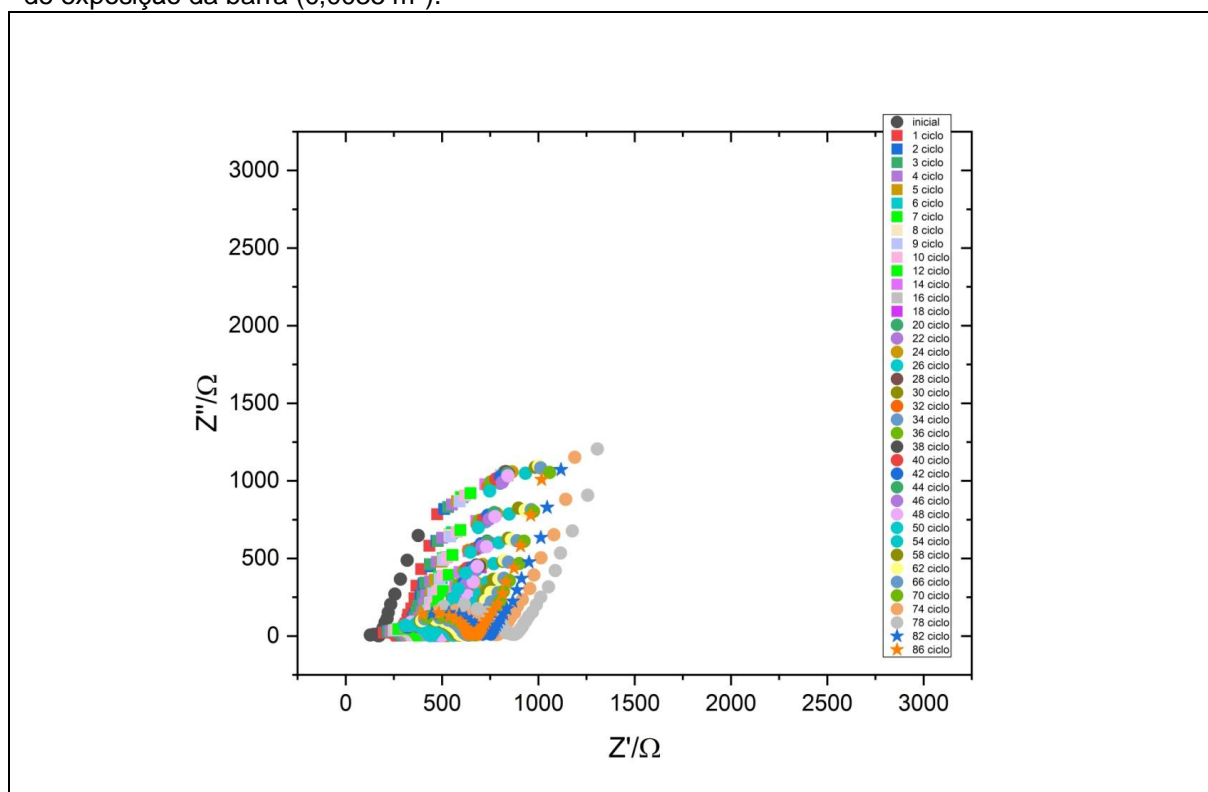


Figura A.5 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do CAA curado a 3 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem. Os valores dos eixos serão multiplicados pela área média de exposição da barra ($0,0035 \text{ m}^2$).

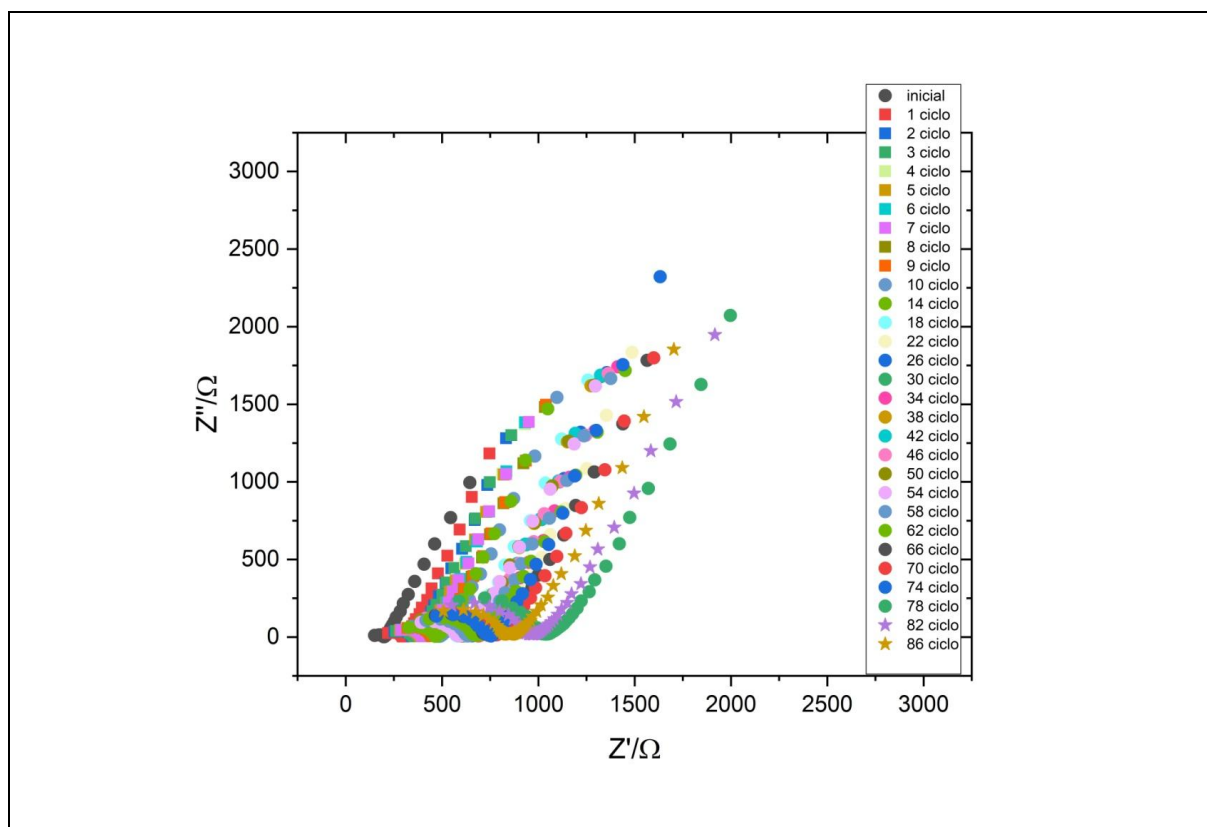


Figura A.6 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do CAA curado a 5 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem. Os valores dos eixos serão multiplicados pela área média de exposição da barra ($0,0035 \text{ m}^2$).

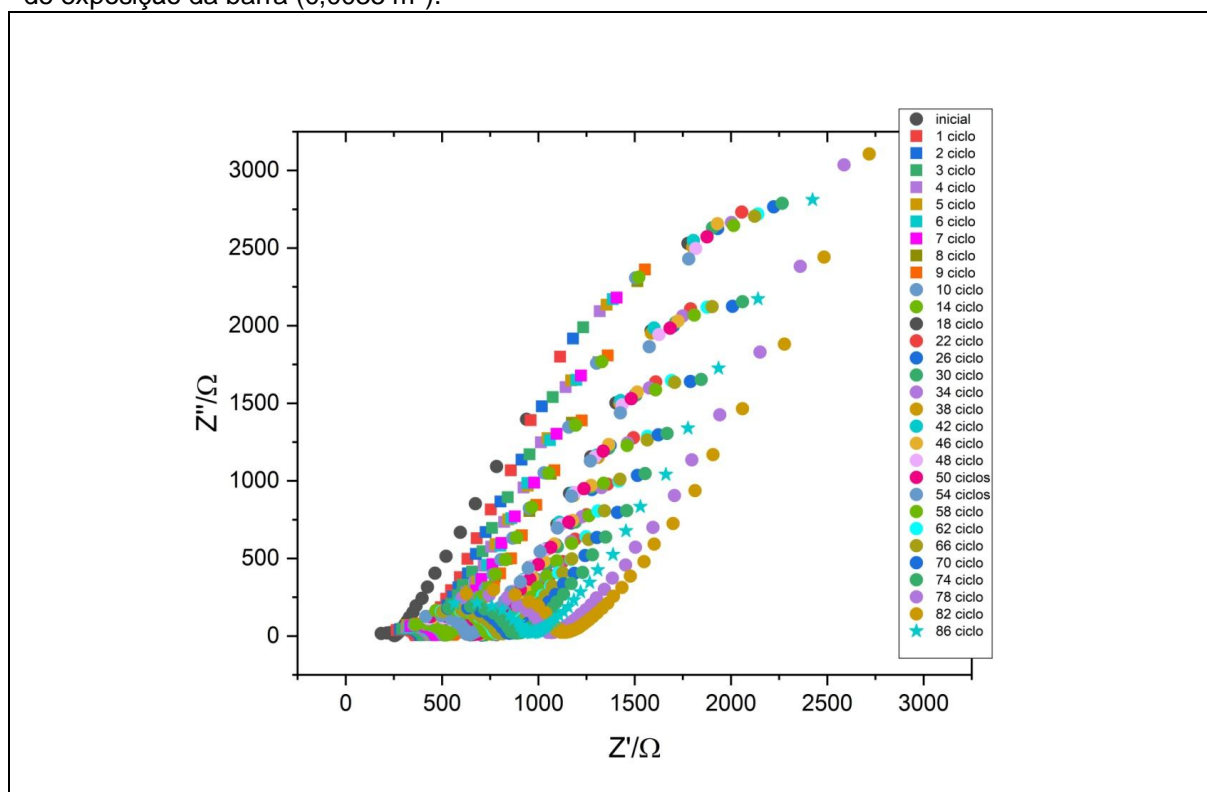


Figura A.7 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do CAA curado a 7 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem. Os valores dos eixos serão multiplicados pela área média de exposição da barra ($0,0035 \text{ m}^2$).

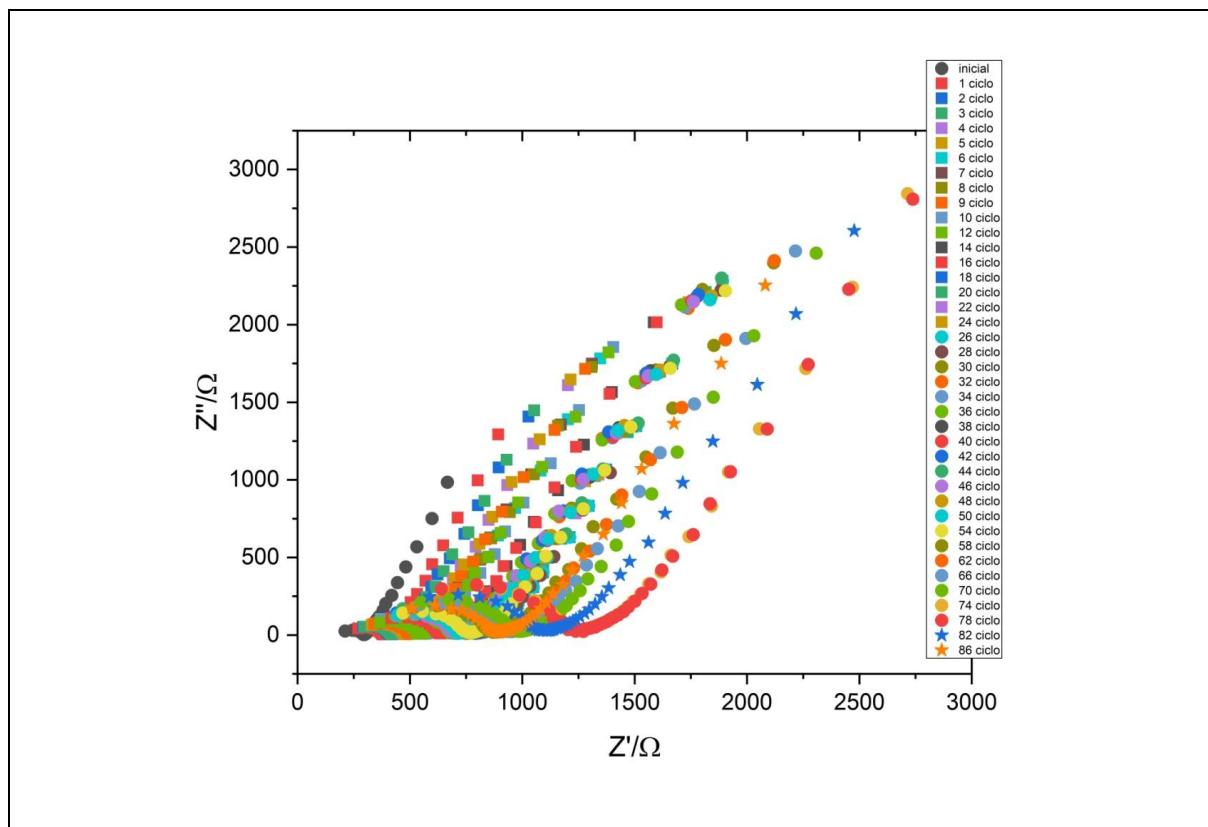


Figura A.8 - Diagrama de Nyquist obtido para a análise de EIE do CAA curado a 28 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem. Os valores dos eixos serão multiplicados pela área média de exposição da barra ($0,0035 \text{ m}^2$).

Anexo B - Gráficos de Barra médias de Resistência de Polarização

A seguir os gráficos de barra das médias de R_p ao longo dos ciclos para os 9 corpos de prova de CC e CAA nas diferentes idades de cura são apresentados.

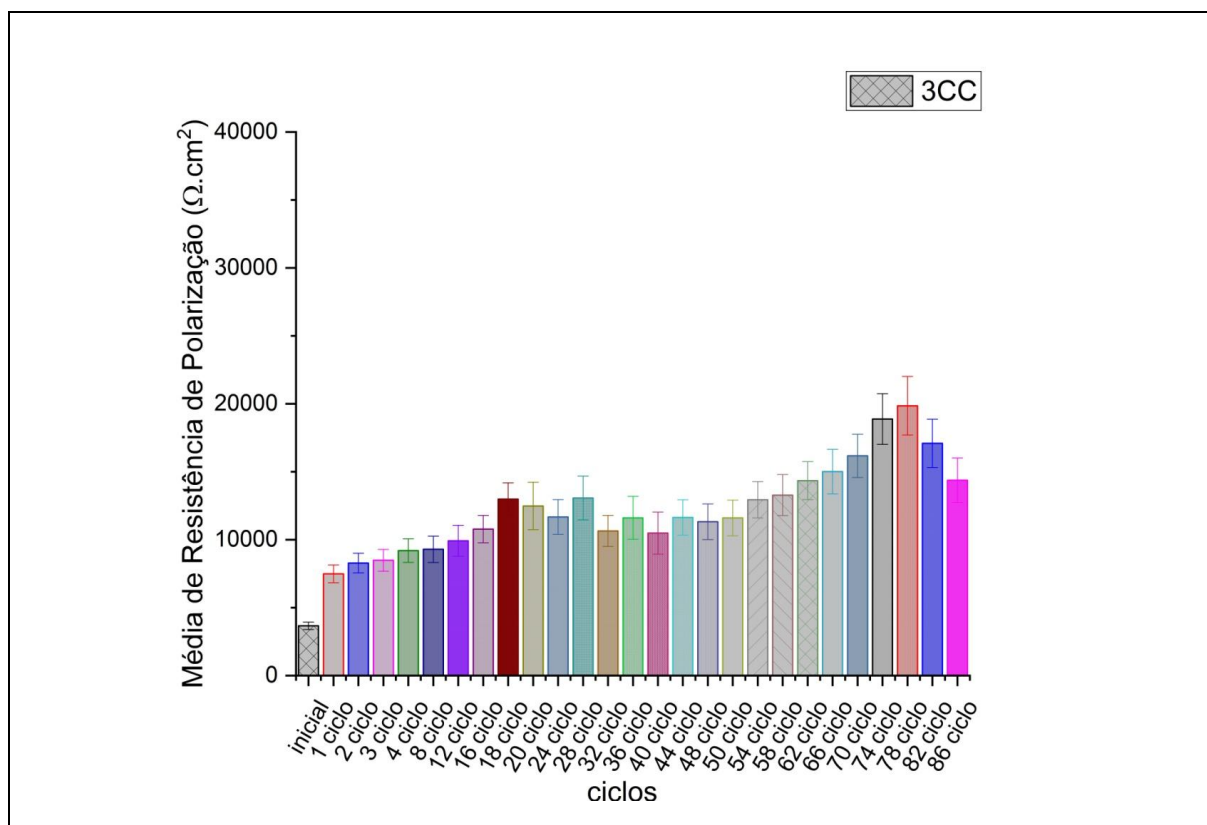


Figura A.9 - Diagrama de Barras das médias de R_p obtido na análise de EIE do CC curado a 3 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem.

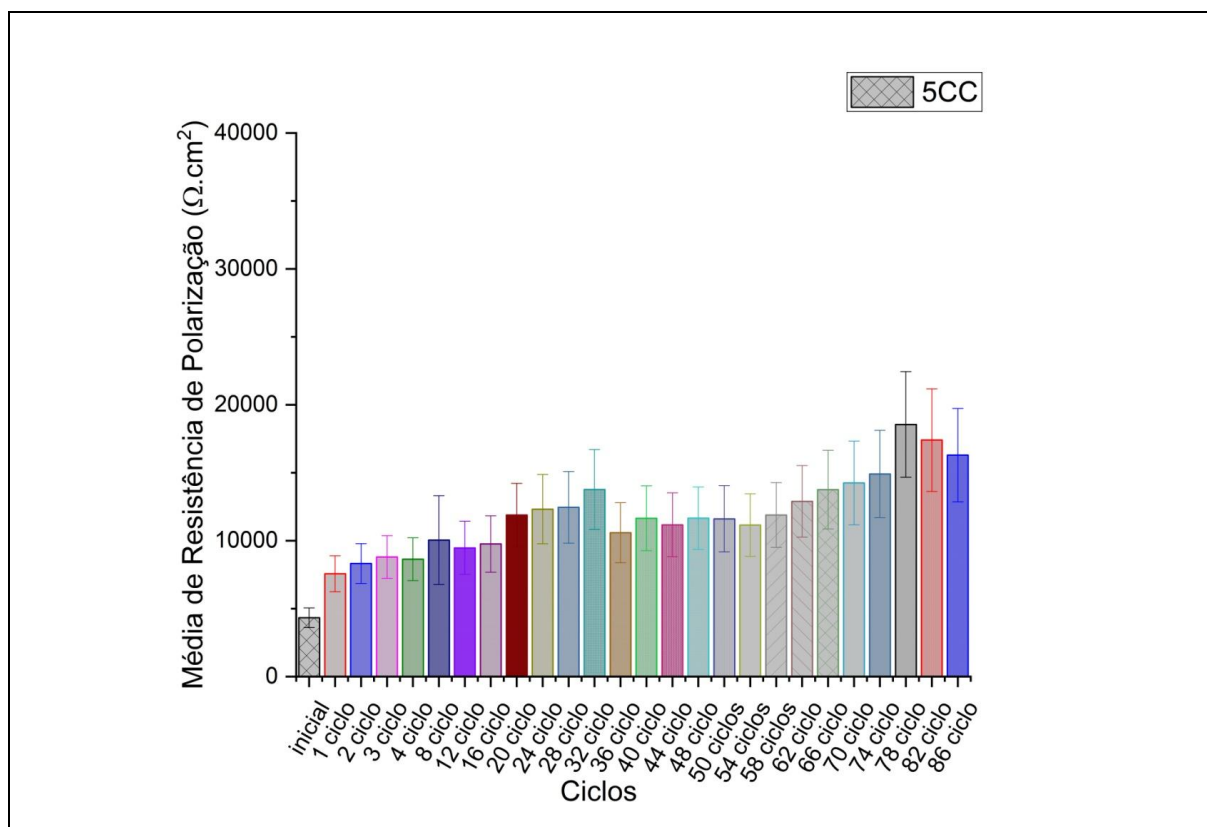


Figura A.10 - Diagrama de Barras das médias de R_p obtido na análise de EIE do CC curado a 5 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem.

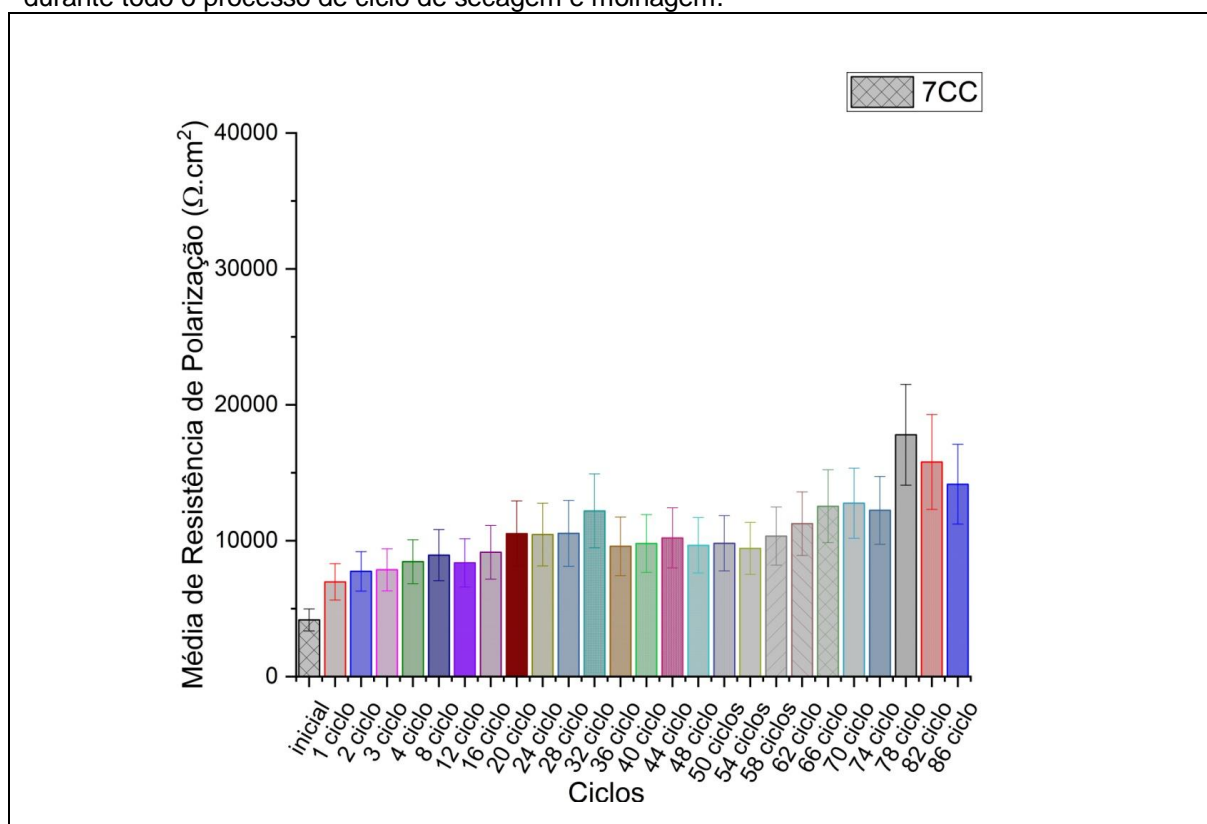


Figura A.11 - Diagrama de Barras das médias de R_p obtido na análise de EIE do CC curado a 7 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem.

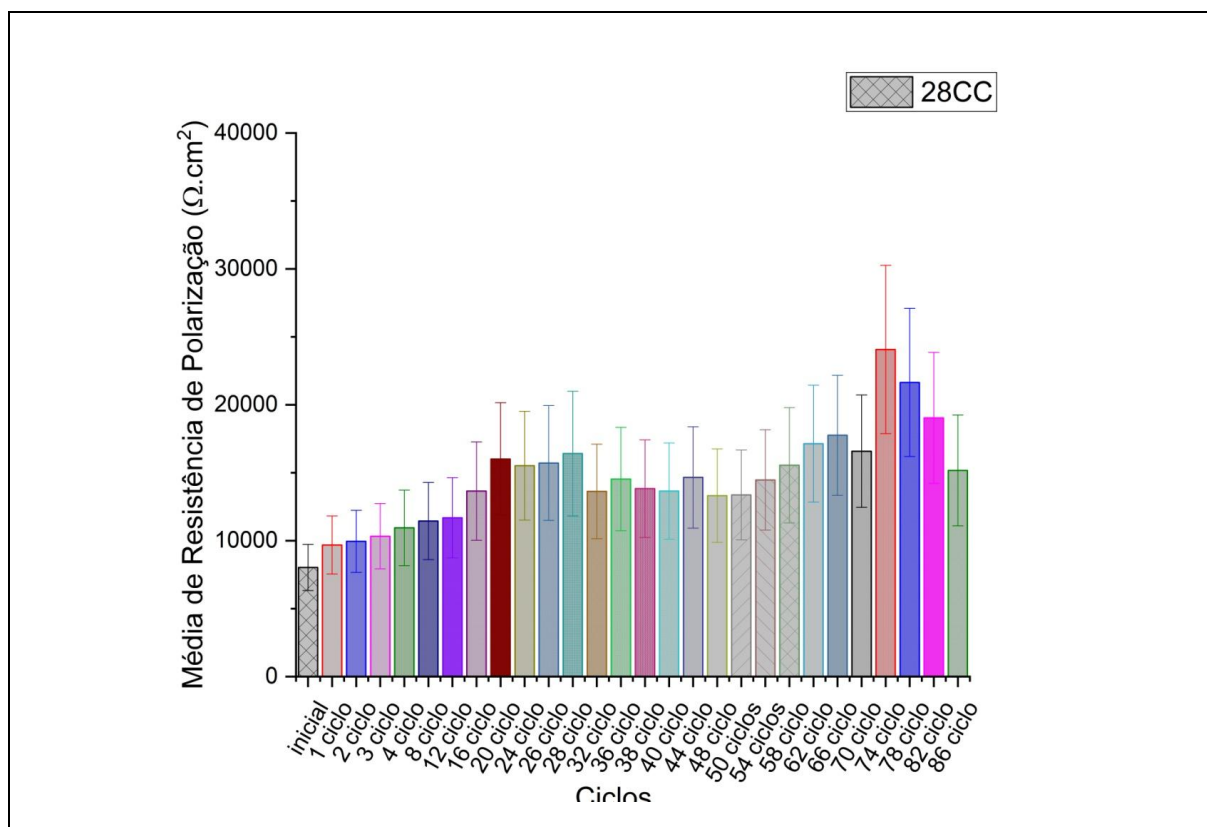


Figura A.12 - Diagrama de Barras das médias de Rp obtido na análise de EIE do CC curado a 28 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem.

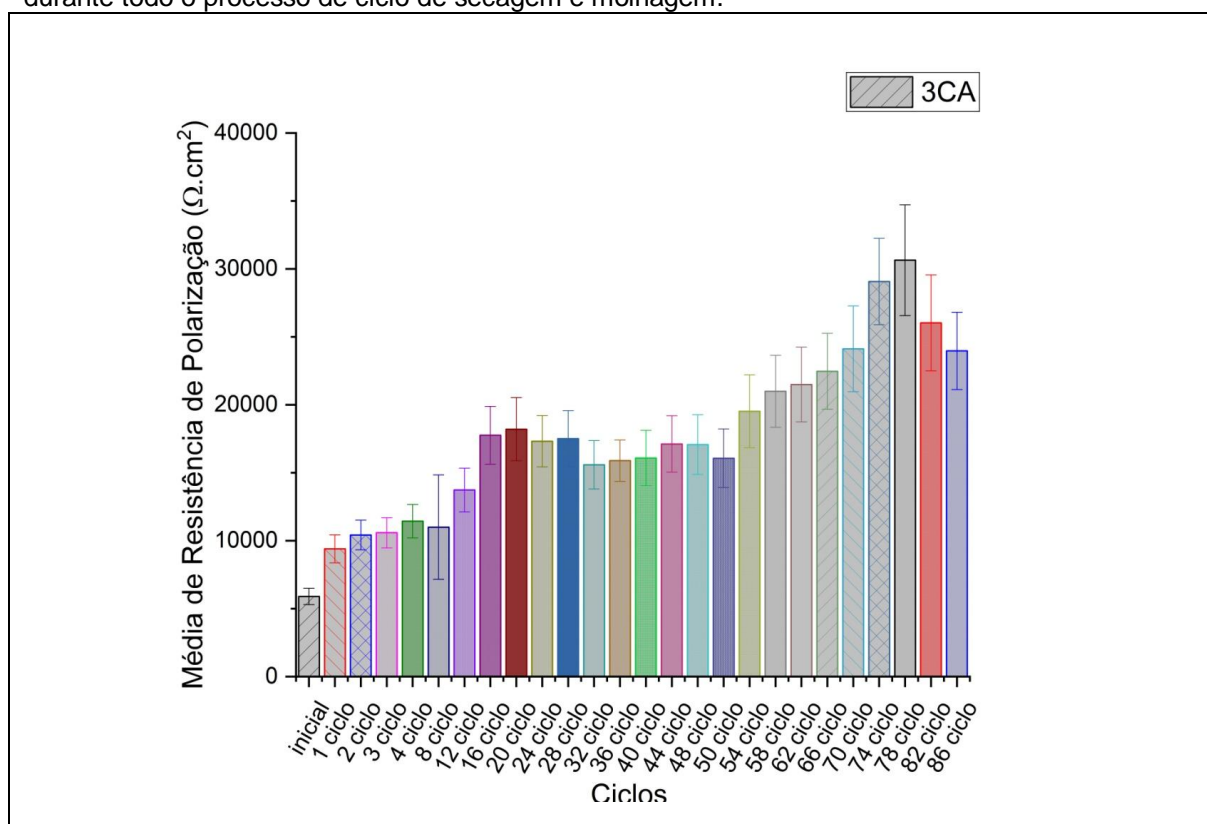


Figura A.13 - Diagrama de Barras das médias de Rp obtido na análise de EIE do CAA curado a 3 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem.

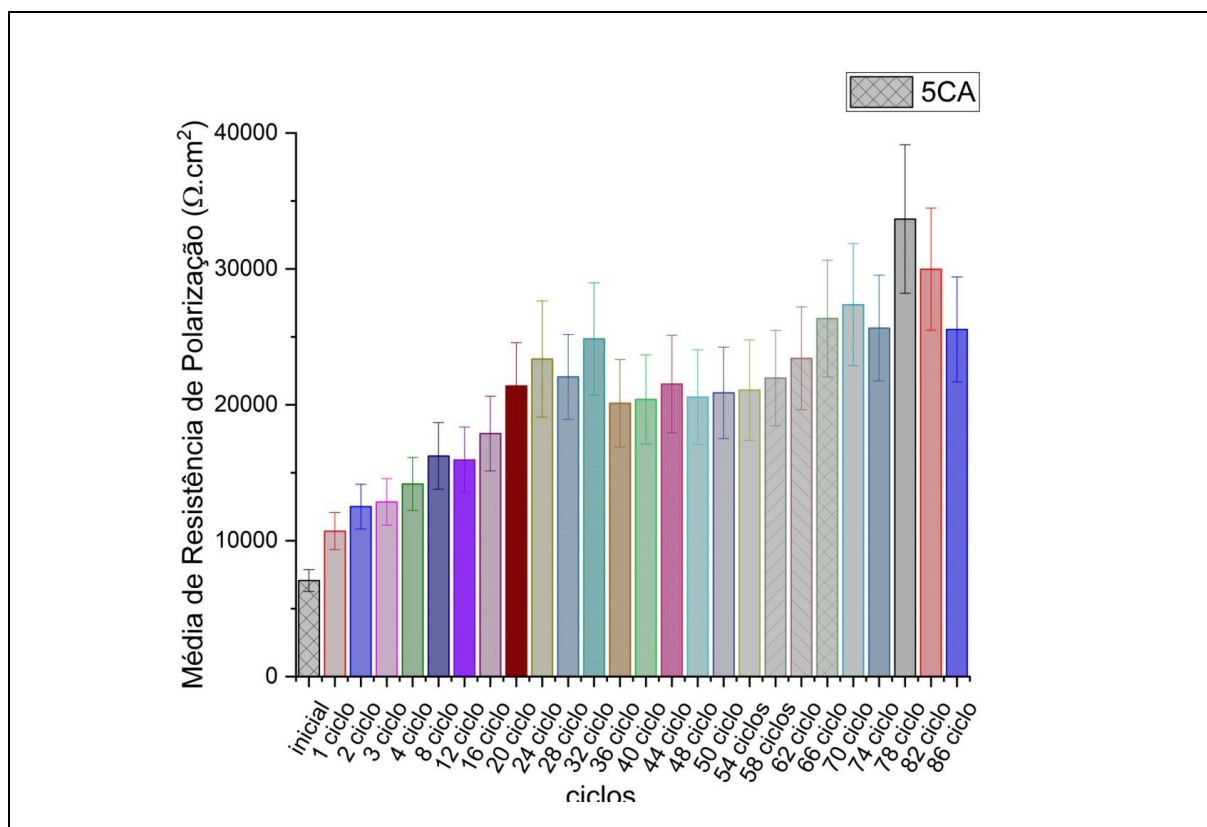


Figura A.14 - Diagrama de Barras das médias de R_p obtido na análise de EIE do CAA curado a 5 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem.

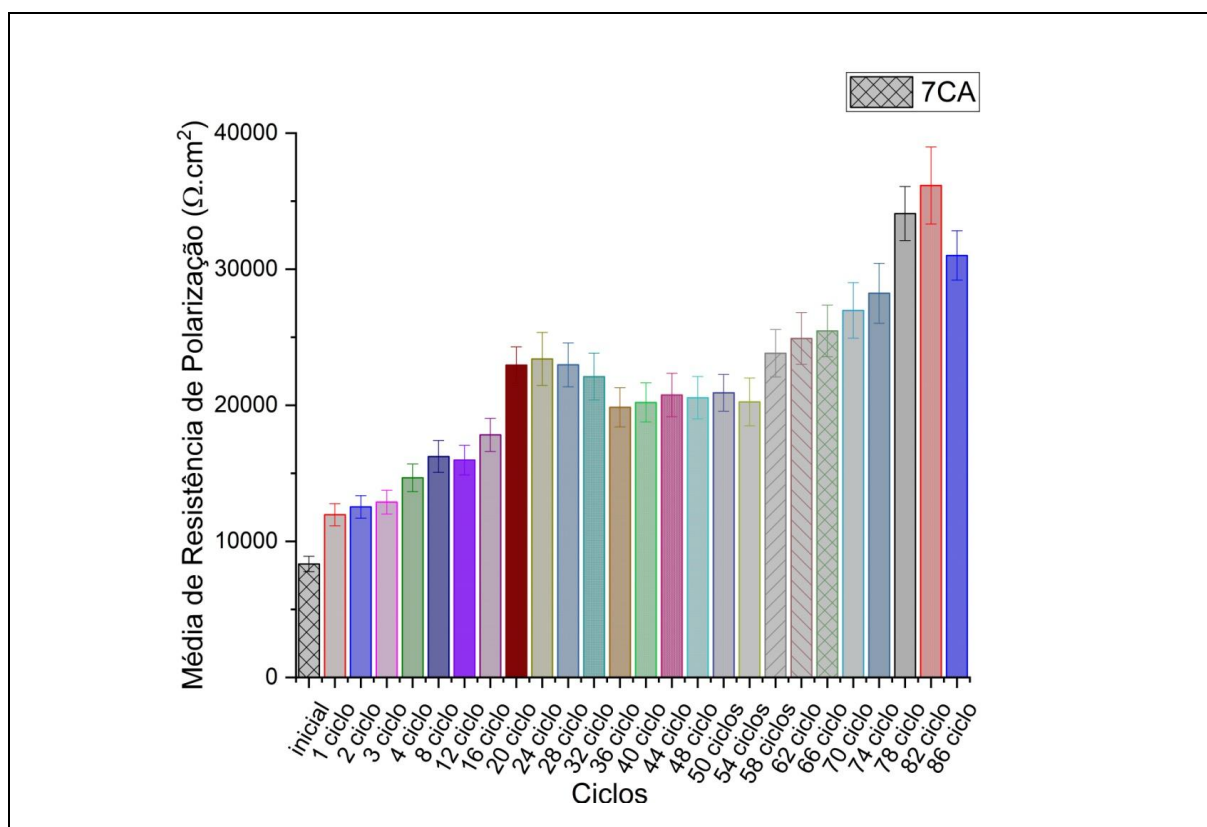


Figura A.15 - Diagrama de Barras das médias de R_p obtido na análise de EIE do CAA curado a 7 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem.

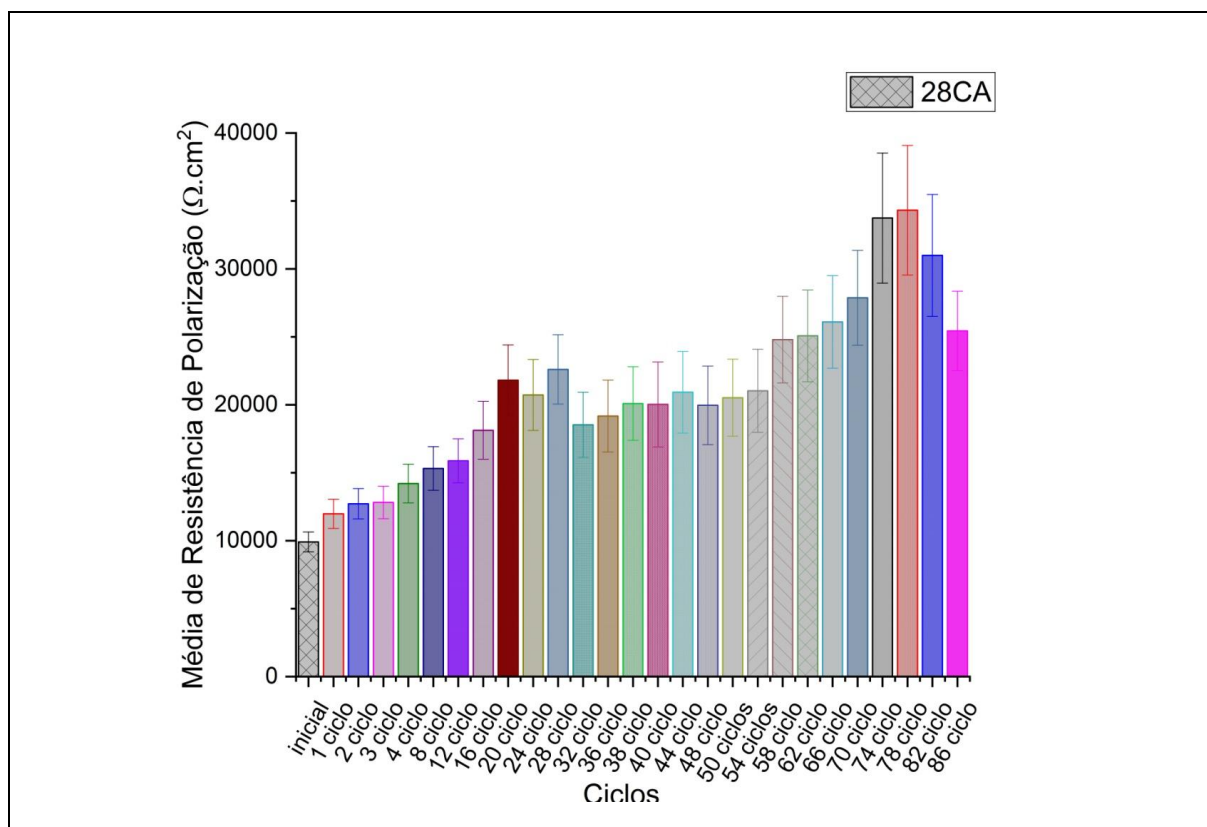


Figura A.16 - Diagrama de Barras das médias de R_p obtido na análise de EIE do CAA curado a 28 dias durante todo o processo de ciclo de secagem e molhagem.