



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Evilane Cássia de Farias

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE DE CO₂ E Cl⁻ EM
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS TEORES DE RESÍDUO DA
BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR E METACAULIM**

Natal

2019

Evilane Cássia de Farias

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE DE CO₂ E Cl⁻ EM
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS TEORES DE RESÍDUO DA
BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR E METACAULIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais de Construção e Processos Construtivos.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

Natal

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Farias, Evilane Cássia de.

Avaliação da durabilidade frente ao ataque de CO₂ e Cl⁻ em concretos autoadensáveis com elevadores teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim / Evilane Cassia de Farias. - 2019.

173f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.

Orientador: Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Coorientadora: Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

1. Concreto autoadensável - Dissertação. 2. Metacaulim - Dissertação. 3. Íons cloreto - Dissertação. 4. Carbonatação - Dissertação. 5. Durabilidade - Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Almeida, Maria das Vitórias Vieira. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

EVILANE CÁSSIA DE FARIAS

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE DE CO₂ E Cl⁻ EM
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS TEORES DE RESÍDUO DA
BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR E METACAULIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais de Construção e Processos Construtivos.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Orientador, UFRN

Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Coorientadora, UFRN

Prof.^a Dr.^a Luciana de Figueiredo Lopes Lucena – Examinadora Interna - UFRN

Prof.^a Dr.^a Ana Cecília Vieira da Nóbrega – Examinadora Externa, UFPE

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo – Examinador Externo, UFPB

Natal, 28 de março de 2019.

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE DE CO₂ E Cl⁻ EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS TEORES DE RESÍDUO DA BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR E METACAULIM

Evilane Cássia de Farias

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) com baixo consumo de cimento é uma alternativa de produzir concretos que agridam menos o meio ambiente. As pozolanas comerciais, como o metacaulim (MK), e os resíduos agroindustriais, por exemplo o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), podem ser usados em benefício da sustentabilidade, associado à possibilidade de manter, ou melhorar, as propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade do CAA. Dentre os mecanismos de degradação do concreto, os principais causadores de corrosão são o ataque por carbonatação e o ataque por íons cloreto. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de concretos autoadensáveis com altos teores de MK e RBC submetidos à ação independente e combinada de carbonatação (CO₂) e íons cloreto (Cl⁻). O ataque por CO₂ se deu de forma acelerada através de uma câmara de carbonatação e a exposição aos íons cloreto foi feita através de ciclos de molhagem e secagem. Para tal, foram analisados CAAs com substituição parcial do cimento em percentuais de até 50%, sendo executados cinco traços: um de referência apenas com cimento, outro com 30% de RBC, o terceiro com 20% de RBC e 20% de metacaulim, o quarto com 30% de RBC e 10% de metacaulim, e, o último, com 30% de RBC e 20% de metacaulim. Posteriormente, foram avaliadas as propriedades dos CAAs no estado fresco para atestar os critérios de autoadensabilidade preconizados pela NBR 15823 (ABNT, 2017). No estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão,

profundidade de penetração de CO₂, profundidade de Cl⁻, difusão de íons cloreto pelo método não estacionário, velocidade de pulso ultrassônico, resistividade elétrica, potencial de corrosão, absorção de água por capilaridade e índices físicos. Os resultados evidenciaram ser possível produzir concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento utilizando RBC e MK e com resistências acima de 40 MPa. O mau desempenho frente a carbonatação dos CAAs com adições minerais pode ser mitigado com o aumento da espessura de revestimento. Por outro lado, quando expostos a cloreto, os concretos com materiais suplementares cimentícios apresentam melhor desempenho. A presença de cloreto livre nas amostras de CAAs provoca uma menor frente de carbonatação. O ataque por Cl⁻ acontece de forma bem mais severa do que a carbonatação. Por fim, dos ambientes agressivos analisados, a situação combinada de carbonatação e cloreto foi a que provocou a maior prejuízo em relação a corrosão da armadura.

Palavras-chave: Concreto autoadensável, resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, metacaulim, íons cloreto, carbonatação, durabilidade.

EVALUATION OF DURABILITY AGAINST THE ATTACK OF CO₂ AND Cl⁻ IN SELF-COMPACTING CONCRETES WITH HIGH LEVELS OF SUGAR CANE BIOMASS WASTE AND METAKAOLIN

Evilane Cássia de Farias

Advisor: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Co-advisor: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

ABSTRACT

The self-compacting concrete (SCC) with low consumption of cement is an alternative to produce concretes that less attack the environment. The commercial pozzolans, such as metakaolin (MK), and the agroindustrial residues, for example the sugarcane biomass waste (RBC), can be used for the benefit of the sustainability, associated with the possibility of maintaining, or improving, the rheological, mechanical and durability properties of the SCC. Among the mechanisms of concrete degradation, the main causers of corrosion are the attack by carbonation and the attack by chloride ions. Thus, the presente work aims to analyze the performance of self-compacting concretes with high levels of MK and RBC submitted to the independent and combined action of carbonation (CO₂) and chloride ions (Cl⁻). The CO₂ attack occurred in an accelerated way through a carbonation chamber and the exposition to the chloride ions was done through cycles of wetting and drying. For this, SCCs with partial cement substitution in percentages up to 50% were analyzed, with five traces being performed: one with cement only, one with 30% RBC, the third with 20% RBC and 20% metakaolin, the fourth with 30% RBC and 10% metakaolin, and the latter with 30% RBC and 20% metakaolin. Subsequently, the SCCs properties were evaluated in the fresh state to attest the self-adherence criteria recommended by NBR 15823 (ABNT, 2017). In the hardened state, were made the tests of compressive strength, depth of penetration of CO₂ and Cl⁻, diffusion of chloride

ions by the non-stationary method, ultrasonic pulse velocity, electrical resistivity, corrosion potential, water absorption by capillarity and physical indexes. The results showed being possible to produce self-compacting concretes with low consumption of cement using RBC and MK and with resistances above 40MPa. The poor performance against carbonation of SCCs with mineral additions can be mitigated by increasing the coating thickness. On the other hand, when exposed to chloride, the concretes with additional cementitious show better performance. The presence of free chloride in the samples of the SCCs causes a lower carbonation front. The Cl^- attack occurs much more severely than the carbonation. Finally, among the aggressive environments analyzed, the combined carbonation and chloride situation was the one that caused the greatest damage in relation to the corrosion of the reinforcement.

Keywords: Self-compacting concrete, sugarcane biomass waste, metakaolin, chloride ions, carbonation, durability.

*A vida é uma corrida que
Não se corre sozinho.
Que vencer não é chegar,
É aproveitar o caminho;*

*Acredite no poder da palavra Desistir
Tire o D, coloque um R
Que você vai Resistir;*

*Sonhe sempre e seja grato
pelo sonho que já tem
O pouco que hoje é seu
já é muito pra alguém;*

*Que você nunca se esqueça,
Num importa o que aconteça
Não pare de acreditar;*

*Continue sendo forte
Tenha fé no Criador
Pois do céu a voz de
Deus dizia assim:
Suba o queixo e meta os pés
Confie em mim!*

(Versos de poesias de Bráulio Bessa)

Dedico aos meus amados pais, Eliene e Evilázio, às minhas irmãs, Evilene e Évila pela compreensão, amor incondicional e por me ensinarem a nunca desistir;

À minha afilhada, Sofia, e sobrinha, Stela, pelo amor e sorrisos mais puros e sinceros, responsáveis por tornar a caminhada mais leve;

Aos meus verdadeiros amigos e familiares pelo apoio e incentivo.

Sem vocês tudo seria mais difícil!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus: por minha vida, por minha saúde e por ter me dado força e coragem para sempre lutar por meus objetivos, guiando meu caminho até aqui;

A minha mãe, Eliene, e ao meu pai, Evilázio: por serem o motivo de toda minha dedicação em tudo que eu faço, por serem meus exemplos de união, coragem, humildade, dedicação e de amor. A pessoa que sou hoje é fruto de todos os ensinamentos que recebi de vocês. Desde cedo, sempre me mostraram que estudar é o melhor caminho e que todo sacrifício vale a pena quando queremos conquistar nossos sonhos. Por não terem escondido de mim que as dificuldades existem e servem de estímulo para tornar o sonho mais precioso. Meu mais sincero agradecimento por todas as vezes que vocês renunciaram a seus sonhos para realizar os meus, não tenho palavras para descrever o suficiente o que vocês significam para mim;

A minhas irmãs, Evilene e Évila: por todos os momentos compartilhados, amor incondicional, pelo incentivo, pela torcida para que tudo desse certo, por ouvir meus desabafos e medos durante esse projeto e por me mostrarem a sorte que eu tenho em Deus ter me presenteado com os dois anjos mais lindos que ele tinha em estoque, anjos a quem chamo irmãs;

A minha amiga de infância, a quem considero irmã de coração, Rafinha: pelo carinho, amizade, companheirismo e apoio acima de tudo, obrigada por ser esse exemplo de luta e perseverança, sempre mostrando que não importa o tamanho da dificuldade, tendo fé e acreditando, sempre dará certo. Eu só tenho a te agradecer, por me presentear com duas princesas, Sofia e Stela, que é o nosso combustível diário de amor, a alegria da casa e que têm o poder de me fazer esquecer todos os problemas só com um simples sorriso quando me ver chegar que diz mais que qualquer palavra.

A meu orientador e amigo, Marcos Alyssandro, mentor desse projeto: por me dar a honra em ser sua orientanda, pelo exemplo de ser humano, por me ensinar que a humildade é uma ferramenta fundamental na transferência de conhecimento, por ter me adotado desde os tempos de iniciação científica, seguindo com parcerias em projetos de pesquisa e continuando no mestrado, por todo conhecimento transmitido, pela orientação competente, disponibilidade, acessibilidade e por ser exemplo de pesquisador e professor;

A minha querida co-orientadora, Vitória: por todos os ensinamentos, orientações enriquecedoras, pelo carinho, por sempre estar disponível a ajudar da melhor forma possível, por ser exemplo de profissional, com toda competência, seriedade e zelo que tem com tudo que faz. Obrigada por acreditar no grande desafio que foi esse projeto e por confiar no meu potencial;

A minhas amigas Nathaly e Larissa: pela parceria durante toda a execução do mestrado, por dividir comigo as dificuldades enfrentadas, pela parceria nos cursos, viagens para reuniões com o orientador e realização de ensaios e por sempre estarem disponíveis quando mais precisei. Em especial você, Nathaly Leal, amiga dos dois cursos universitários, trabalhos de conclusão de cursos e agora do mestrado, que eu considero “irmã postiza”, por aguentar minhas angústias seja na pesquisa ou na vida, pela

preocupação, por me incentivar a não desistir no momento mais puxado desse projeto e, principalmente, por ser meu apoio “familiar” em Natal, a quem eu sei que posso contar para tudo;

A equipe de pesquisa de 2018 do laboratório de Durabilidade e Química dos materiais do IFRN, Anne, Amanda, Pedro, Aretuza, Ricardo França e Edimarlyson: pela indispensável ajuda durante todo esse projeto, por todos os momentos compartilhadas no laboratório, pelas risadas que tornaram os dias de concretagem e ensaios bem mais leves e prazerosos. Vocês são parte fundamental dessa conquista, sem vocês eu nem imagino como seria;

A meus amigos de infância e vida, Jacqueline, Sinara e Arthur: por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e por serem pessoas maravilhosas que riem a cada vitória minha;

A meus amigos de IFRN: Thiago (Thithi), Neuber, Cadinho, Aninha e Cris que acompanharam e me ajudaram diariamente no meu desespero durante o primeiro ano de mestrado que precisava me virar em “várias Evilanes” para dar conta de tudo que estava fazendo. Sem as palavras de apoio de vocês tudo seria bem mais difícil. Em especial, Neuber, por ter aguentado meu choro e desabafo algumas vezes e ter me ajudado com dicas valiosas sempre que precisei. A Gabi, Gigil, Valtencir, Edilberto, Márcio, Cleyton, Ana Márcia, Spotti, Thiago Vieira e Cleber que, apesar da não convivência diária, torcem e vibram a cada conquista minha e sempre estão dispostos a me ajudar;

A meus demais familiares, em especial madrinha Zilma, padrinho Alfredo e tia Eda: por terem me ajudado em tudo desde pequena até os dias atuais, por fazerem parte da minha formação como ser humano;

A equipe de técnicos dos laboratórios do IFRN: Nathana, Ricardo Coelho, Gian e Izabel Cocentino pela ajuda e disponibilidade constante sempre que necessitei.

As meninas da secretaria do PEC: Viviane Sena, Raphaela Teixeira e Silvia Baracho pela atenção e disponibilidade sempre preocupadas em nos ajudar da melhor forma;

A equipe de terceirizados do IFRN-SPP e CNAT: pela ajuda durante a execução do projeto;

Aos professores Givanildo e Aline e toda equipe do LABEME-UFPB: pela disponibilidade dos equipamentos e estrutura para moagem do resíduo e alguns ensaios microestruturais realizados durante esse projeto;

Aos professores Ênio Amorim, Ana Cecília Nóbrega, Givanildo Azeredo e Luciana Figueiredo: pelas contribuições, leitura e correção da dissertação, fundamentais para o enriquecimento do trabalho;

A todos os que foram meus professores, sobretudo os que fazem do ofício um sério compromisso de vida, exercendo a profissão como ferramenta de auxílio no crescimento dos seus alunos. Obrigada pelos conhecimentos transmitidos, que auxiliaram na minha formação;

A minha segunda casa, IFRN-SPP e IFRN-CNAT: pela disponibilidade dos laboratórios, fundamentais para a realização desse trabalho;

À UFRN e ao PEC: pela oportunidade de crescimento profissional;

Agradeço aos colegas do PEC: Adna, Felipe, Isabela, Jônatas, Lanna, Leidian, Queiroz, Maria Luiza e Natalia: pelo incentivo, ajuda e convivência;

Aos demais amigos: pela atenção e disponibilidade. E a todos aqueles que, mesmo não tendo sido citados, colaboraram de alguma forma, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, muito obrigada;

Finalizo agradecendo novamente a Deus por ter colocado cada uma dessas pessoas no meu caminho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xxi
CAPÍTULO 1	22
INTRODUÇÃO	22
1.1 Justificativa.....	25
1.2 Objetivos da pesquisa.....	27
1.2.1 Objetivo geral.....	27
1.2.2 Objetivos específicos.....	27
CAPÍTULO 2	28
REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1 Concreto autoadensável.....	28
2.2 Concreto autoadensável com baixos teores de cimento.....	29
2.3 Durabilidade das estruturas de concreto.....	33
2.3.1 Corrosão.....	34
2.3.2 Ataque ao concreto por íons cloreto.....	40
2.3.3 Ataque ao concreto por carbonatação.....	43
2.3.4 Ação combinada da difusão de íons cloreto e CO ₂ em concretos.....	45
CAPÍTULO 3	48
MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 Materiais utilizados.....	50
3.1.1 Cimento.....	50
3.1.2 Adições Minerais.....	50
3.1.3 Agregados.....	52
3.1.4 Aditivo químico para concreto.....	52
3.1.5 Água.....	52
3.1.6 Aço.....	52
3.1.7 Reagentes e soluções químicas utilizados nos ensaios.....	55
3.2 Caracterização dos materiais.....	56
3.2.1 Espectrometria por fluorescência de raios X – FRX.....	56

3.2.2	Determinação da área superficial (Método BET)	56
3.2.3	Atividade pozolânica das adições minerais	57
3.2.4	Análise da composição granulométrica	57
3.2.5	Massa específica	57
3.2.6	Determinação do índice de finura	58
3.3	Definição dos traços	58
3.4	Preparo da mistura e moldagem das amostras	60
3.4.1	Cubo de concreto – Corpo de prova TIPO A	61
3.4.2	Cubo de concreto armado – Corpo de prova TIPO B	61
3.4.3	Cilindro – corpo de prova TIPO C	65
3.5	Propriedades do concreto autoadensável no estado fresco	65
3.5.1	Espalhamento, tempo de escoamento T_{500} e Índice de estabilidade visual	65
3.5.2	Habilidade passante – Método do Anel J	66
3.5.3	Habilidade passante – Método da caixa L	66
3.5.4	Determinação da viscosidade – Método do funil V	67
3.6	Propriedades do concreto autoadensável no estado endurecido	67
3.6.1	Condições de exposição agressivas	67
3.6.2	Penetração de CO_2 através de método acelerado	72
3.6.3	Penetração de cloreto por ciclo de molhagem e secagem	73
3.6.4	Difusão de íons cloreto	74
3.6.5	Resistência à compressão axial	76
3.6.6	Velocidade de pulso ultrassônico (Ultrassom)	77
3.6.7	Resistividade elétrica	78
3.6.8	Potencial de corrosão	79
3.6.9	Absorção de água por capilaridade	81
3.6.10	Índices físicos	82
CAPÍTULO 4		84
RESULTADOS E DISCUSSÕES		84
4.1	Caracterização dos materiais finos	84
4.1.1	Análise química por FRX	84

4.1.2	Área superficial	86
4.1.3	Índice de atividade pozolânica das adições minerais	87
4.1.4	Granulometria à laser	87
4.1.5	Massa específica, massa unitária e índice de finura	88
4.2	Caracterização dos agregados	88
4.3	Ensaio no estado fresco	89
4.3.1	Análise das composições	89
4.3.2	Ensaio de caracterização no estado fresco	91
4.4	Propriedades dos CAAs no estado endurecido.....	95
4.4.1	Análise do ganho de resistência mecânica e eficiência do consumo de cimento.....	95
4.4.2	Análise da profundidade de carbonatação	99
4.4.3	Análise da profundidade de cloreto	106
4.4.4	Difusão de íons cloreto através da migração em regime não estacionário.....	112
4.4.5	Análise da resistência à compressão sob condições de agressividade de CO ₂ e Cl ⁻	118
4.4.6	Análise da velocidade do pulso ultrassônico	122
4.4.7	Análise da resistividade elétrica.....	125
4.4.8	Análise do potencial de corrosão.....	131
4.4.9	Absorção de água por capilaridade	141
4.4.10	Índice de vazios e absorção de água por imersão	145
4.4.11	Análise das massas específicas.....	147
CAPÍTULO 5	149
CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema Ferro-H ₂ O a temperatura de 25°C. (adaptado de Rivetti <i>et al.</i> (2018))	36
Figura 2.2 - (a) esquema de formação dos produtos de corrosão e (b) aumento do volume dos produtos da corrosão do ferro (adaptado de OLLIVIER; VICHOT, 2014).	37
Figura 2.3 - Medida do potencial de eletrodo de uma armadura (OLLIVIER; VICHOT, 2014).	39
Figura 2.3 - Mecanismo da corrosão em presença de cloretos (OLLIVIER; VICHOT, 2014).	42
Figura 2.4 - Mecanismo de carbonatação do Ca(OH) ₂ (OLLIVIER; VICHOT, 2014).	44
Figura 3.1 - Fluxograma do programa experimental.	49
Figura 3.2- Esquema do ciclo de obtenção e beneficiamento do RBC.	51
Figura 3.3 - Barras de aço antes e após o procedimento de limpeza.	53
Figura 3.4 – Procedimento de limpeza das barras metálicas.	54
Figura 3.5 – Detalhamento das medidas do corpo de prova cúbico de concreto armado para ensaio de potencial de corrosão.	62
Figura 3.6 – Forma de madeira para produção dos cubos de concretos armados.	63
Figura 3.7 - Detalhamento do processo de moldagem dos cubos armados. ...	64
Figura 3.8 - Aplicação de graxa náutica para proteção na parte exposta das barras de aço.	64
Figura 3.9 – Classes do índice de estabilidade visual (recorte da NBR 15823-2, ABNT 2017).	66
Figura 3.10 – Câmara de carbonatação utilizada com detalhamento do interior.	69
Figura 3.11 - Recipiente com os corpos de prova imersos na solução salina. .	70
Figura 3.12 - Fluxograma dos ensaios e ciclos realizados.	71
Figura 3.13 - Processo de pintura para selagem das quatro faces do cubo de concreto.	72
Figura 3.14 - Amostra submetida à carbonatação: a) faces livres e com proteção; b) sentido do corte de seção; c) aspersão de fenolftaleína. (Adaptado de DINIZ, 2018).	73
Figura 3.15 - Aplicação da solução indicadora de nitrato de prata no ensaio de profundidade de cloreto.	74

Figura 3.16 - Provete para realização do ensaio de difusão de cloreto.....	75
Figura 3.17 – Esquema do ensaio de migração de cloreto pelo método NT BUILD 492.	75
Figura 3.18 - Esquema da medição da profundidade de penetração. (NT BUILD 492 - NORDTEST METHOD, 1999).....	76
Figura 3.19 - Realização do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.	77
Figura 3.20 - (a) Mecanismo de ensaio de resistividade elétrica (Manual do equipamento PROCEQ, 2019) e (b) realização do ensaio em laboratório.	79
Figura 3.22 - Realização do ensaio de Potencial de corrosão.	80
Figura 4.1 – Granulometrias à laser dos materiais finos.	88
Figura 4.2 - Granulometria da areia.	89
Figura 4.3 - Granulometria da brita.	89
Figura 4.4 - Espalhamentos dos CAAs obtidos pelo slump flow test.....	91
Figura 4.5 - Índice de estabilidade visual com detalhamento da borda do concreto na circunferência.	92
Figura 4.6 - Relação entre o espalhamento e o consumo de aditivo superplastificante.	93
Figura 4.7 - Viscosidade dos CAAs pelo ensaio de T ₅₀₀ e funil V.....	94
Figura 4.8 - Análise da habilidade passante dos CAAs pelo método da caixa L e do anel J.....	94
Figura 4.9 - resistência à compressão axial dos CAAs, sob cura em água, dos 3 aos 28 dias.....	96
Figura 4.10 - Relação entre consumo de cimento e resistência à compressão.	99
Figura 4.11 - Influência das condições de exposição na profundidade de carbonatação dos traços de CAA.....	100
Figura 4.12 - Influência das condições de exposição na profundidade de penetração de cloreto dos traços de CAA.....	106
Figura 4.13 - Profundidade de cloreto nos CAAs expostos a ciclos de imersão e secagem em água salina.	107
Figura 4.14 - Profundidade da penetração de cloreto nos CAAs submetidos a ação de carbonatação e cloreto.	109
Figura 4.15 - Amostras de concreto após aspersão de nitrato de prata no ensaio de difusão de cloreto sob diferentes condições de exposição antes do ensaio: (a) sob cura submersa em água ou carbonatação e (b) só a ação conjunta de carbonatação e cloreto ou apenas cloreto.	113

Figura 4.16 - Coeficiente de difusão dos CAAs expostos a cura submersa em água.	113
Figura 4.17 - Coeficiente de difusão dos CAAs expostos a carbonatação acelerada.....	117
Figura 4.18 - Resistência à compressão axial dos CAAs antes e após serem submetidos a carbonatação.	118
Figura 4.19 - Resistência à compressão axial dos CAAs antes e após exposição a cloreto.	119
Figura 4.20 - Resistência à compressão axial dos CAAs antes e após serem submetidos ao efeito combinado de CO ₂ e Cl ⁻	120
Figura 4.21 - Resistência à compressão axial dos CAAs antes e após os ambientes agressivos.....	121
Figura 4.22 - Velocidade do pulso ultrassônico nas primeiras idades.....	123
Figura 4.23 - Velocidade do pulso ultrassônico dos CAAs submetidos aos diferentes ambientes agressivos: (a) CO ₂ ; (b) Cl ⁻ e (c) CO ₂ + Cl ⁻	124
Figura 4.24 - Resistividade elétricas dos CAAs nas primeiras idades sem ciclos de agressão.....	125
Figura 4.25 - Resistividade elétricas dos CAAs antes e após exposição a CO ₂	128
Figura 4.26 - Resistividade elétricas dos CAAs antes e após exposição a cloreto.	129
Figura 4.27 - Resistividade elétricas dos CAAs antes e após o ataque combinado de CO ₂ e Cl ⁻	130
Figura 4.28 - Potencial de corrosão do aço nos CAAs com revestimento de 15mm, nas primeiras idades e após submetidos aos ambiente agressivos: (a) sob carbonatação; (b) sob cloreto; (c) ação combinada de carbonatação e cloreto.	133
Figura 4.29 - Potencial de corrosão do aço nos CAAs com revestimento de 30mm, nas primeiras idades e após submetidos aos ambiente agressivos: (a) sob carbonatação; (b) sob cloreto; (c) ação combinada de carbonatação e cloreto.	134
Figura 4.30 - Potencial de corrosão dos CAAs submetidos a carbonatação acelerada - (a) revestimento de 15mm e (b) revestimento de 30mm.....	136
Figura 4.31 - Potencial de corrosão dos concretos submetidos a ciclos de imersão e secagem em cloreto - (a) revestimento de 15mm e (b) revestimento de 30mm.	138
Figura 4.32 - Potencial de corrosão dos concretos submetidos à ação combinada de carbonatação e cloreto - (a) revestimento de 15mm e (b) revestimento de 30mm.	139

Figura 4.33 - Absorção de água por capilaridade dos CAAs aos 28 dias.	141
Figura 4.34 - Absorção de água por capilaridade dos CAAs antes e após serem submetidos aos ciclos de agressividade	143
Figura 4.35 - Coeficiente de absorção capilar dos CAAs antes e após exposição aos ciclos de agressividade: (a) CO ₂ ; (b) Cl ⁻ e (c) CO ₂ + Cl ⁻	144
Figura 4.36 - Absorção por imersão e índice de vazios dos CAAs antes e após serem submetidos aos ciclos de agressividade.	146
Figura 4.37 - Massas específicas no estado endurecido dos CAAs antes e após expostos a CO ₂ e Cl ⁻ de forma individual e combinada.....	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Eficiência do consumo de cimento em CAAs com adições minerais (adaptado de Pelisser, Vieira e Bernardini (2018)).....	30
Tabela 3.1 – Características dos corpos moedores do moinho de bolas.	51
Tabela 3.2 - Dados técnicos do aditivo superplastificante (Ficha técnica do produto).....	52
Tabela 3.3 - Informações das soluções químicas utilizadas.	55
Tabela 3.4 - Composição dos traços em estudo.	59
Tabela 3.5 - Consumo e parâmetros das misturas realizadas.	59
Tabela 3.6 - Sequência da colocação dos materiais da mistura na betoneira.	61
Tabela 3.7 - Detalhamento das condições de exposição estudadas.....	68
Tabela 3.8 – Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a qualidade do concreto (adaptado de BS EN 12504-4).	78
Tabela 3.9 - Critérios de avaliação do concreto armado quanto a resistividade com relação ao risco de corrosão – COST 509 (RIBEIRO, 2014).....	79
Tabela 3.10 - Probabilidade de ocorrência de corrosão de acordo com o valor de potencial de corrosão utilizando eletrodo de Cu/CuSO ₄ ,Cu ²⁺ (adaptado de ASTM - C-876/2015).	81
Tabela 4.1 – Composição química dos materiais finos no estado anidro.....	84
Tabela 4.2 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos.	86
Tabela 4.3 - Área superficial específica dos materiais finos no estado anidro.	86
Tabela 4.4 - Índice de atividade pozolânica das adições minerais.....	87
Tabela 4.5 - Massa específica, massa unitária e índice de finura dos materiais finos.....	88
Tabela 4.6 - Massa específica e massa unitária dos agregados.....	89
Tabela 4.7 – índices dos traços utilizados com os respectivos parâmetros da EFNARC (2005).	90
Tabela 4.8 - Propriedades dos concretos autoadensáveis no estado fresco. ..	95
Tabela 4.9 - Porcentagem do ganho de resistência entre as idades iniciais....	97
Tabela 4.10 - Avaliação da variação da frente de carbonatação entre concretos expostos apenas a CO ₂ e expostos a combinação de CO ₂ e Cl ⁻	105
Tabela 4.11 - Avaliação da variação da penetração de cloreto entre concretos expostos apenas a Cl ⁻ e expostos a combinação de CO ₂ e Cl ⁻	109

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios são os materiais mais utilizados na indústria da construção civil. Dentre eles, o concreto é um material de destaque, sendo considerado o produto industrializado mais utilizado pela sociedade atualmente, fato este devido ser um material moldável quando em seu estado fresco e, ao endurecer, adquirir características de resistência mecânica de grande relevância para a engenharia civil.

A ABNT NBR 15823-1 (2017) define o concreto autoadensável (CAA) como um concreto que é capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento. No entanto, para manter a fluidez do CAA sem a ocorrência de segregação, grandes quantidades de finos e aglomerantes são usados para garantir a qualidade do material e estrutura final. Uma das alternativas para suprir essa necessidade é a utilização de adições minerais comerciais e/ou resíduos agroindustriais tratados.

Dado o cenário atual de uma atividade industrial orientada para a redução de gases de efeito estufa, estudos vêm sendo realizados com a finalidade de produzir concretos mais eficientes, com consumo de cimento relativamente reduzido através do uso de materiais suplementares como as adições minerais (PELISSER, VIEIRA E BERNARDIN, 2018). Um dos tipos de concretos ecoeficientes é o concreto autoadensável com baixo teor de cimento.

O metacaulim (MK) é um material pozolânico comercial termicamente ativado obtido pela calcinação da argila caulinitica a temperaturas moderadas variando de 650 °C a 800 °C. A principal característica do MK é sua alta reatividade com hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 . Em comparação com outros materiais suplementares cimentícios, espera-se que a ação pozolânica do MK seja mais significativa devido a sua alta concentração de sílica e alumina.

Especificamente, a relação cálcio/silício (C/S) dos hidratos de sílica cálcica produzidos (gel C-S-H) é superior as demais, causando uma microestrutura de concreto consideravelmente mais compacta e ao melhoramento final do desempenho global do concreto, em termos de resistência, porosidade, permeabilidade, difusividade do íons cloreto, resistência ao ciclos de gelo e degelo, etc (HASSAN; LACHEMI; HOSSAIN, 2012).

Dentre os resíduos agroindustriais, existe o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) gerado pela indústria sucroalcooleira através da combustão do bagaço em caldeiras, após sua queima são colocados indevidamente em depósitos abertos, causando problemas de poluição ambiental. Como o RBC tem um alto teor de SiO_2 , pode ser usado como um material pozolânico complementar para substituir parcialmente o cimento Portland em argamassas e concretos (RÍOS-PARADA *et al.*, 2017).

Medeiros (2016) verificou que as composições de CAA com substituição de 60% de cimento por metacaulim e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar demandaram um maior teor de superplastificante devido a maior área superficial e rugosidade das adições minerais, como também provocaram uma redução considerável da resistência mecânica. Mesmo assim, aos 91 dias, esses concretos atingiram resistências superiores a 35 MPa.

Por outro lado, pesquisas anteriores (Kannan e Ganesan (2014); Madandoust e Mousavi (2012); Kavitha *et al.*, (2015); Safiuddin *et al.* (2010); Le e Ludwig (2016) e Chopra *et al.*, 2015) com a utilização de adições minerais, do tipo cinza volante, metacaulim, sílica ativa e cinza da casca do arroz, em percentuais de substituição de até 40% mostram que a utilização desses materiais como substitutos parciais do cimento contribuem para o aumento da resistência à compressão em relação aos traços de referência. Sendo assim, é importante investigar o efeito dessas adições sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto, a fim de alcançar o desempenho requerido, as propriedades exigidas e a sua durabilidade (NAGROCKIENĖ, GIRSKAS E SKRIPKIUNAS, 2017).

O conceito mais atual de sustentabilidade vem atrelado à durabilidade dos produtos e o uso do concreto autoadensável corrobora com a ideia de produzir elementos de concretos de maior durabilidade, devido a sua composição ser,

normalmente, mais compacta. Atualmente, a tendência de utilização do CAA é bem extensa, um dos campos de atuação é o emprego em ambientes de alta agressividade. A corrosão do aço em estruturas de concreto armado é iniciada pela carbonatação do concreto de cobertura ou entrada de cloreto, que são conhecidos por despassivar o aço carbono e torná-lo suscetível a corrosão eletroquímica (WANG *et al.*, 2017).

Medeiros, Raisdorfer e Hoppe Filho (2017), identificaram que o uso das adições minerais em concretos gera a redução do teor de portlandita no compósito de cimento Portland e isto pode facilitar o processo de carbonatação. Contudo, o refinamento dos poros devido a atividade pozolânica e o aumento no empacotamento de partículas tende a criar uma barreira física ao ingresso de CO₂, o que reduz o efeito da carbonatação. Desse modo, a carbonatação não é exclusivamente relacionada com a alcalinidade do concreto. Por sua vez, Wongkeo *et al.* (2014) afirmam que materiais cimentícios suplementares, tais como cinzas volantes, metacaulim e sílica ativa tem significativa contribuição sobre a capacidade de o concreto resistir à penetração de íons cloreto, devido à capacidade desses materiais se ligarem aos cloretos.

Liu *et al.* (2017), analisaram a combinação dos ataques de CO₂ e íons cloreto em concretos normalmente vibrados de cimento Portland, concluindo que o efeito combinado destes poderia densificar a microestrutura do concreto quando comparado ao efeito isolado dos agentes agressivos, observando também um pH maior e uma menor profundidade de carbonatação nos concretos submetidos à ação combinada.

No entanto, não foram encontradas, até o momento da escrita deste trabalho, pesquisas que tratassem da análise combinada da ação da carbonatação e difusão de íons cloreto em concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando RBC e MK.

Outras lacunas também são observadas em trabalhos anteriores. Paris *et al.* (2016) afirmam que as pesquisas sobre o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar em concretos apresentam informações rasas em relação aos aspectos de durabilidade, resistência ao congelamento/descongelamento, resistência química à intrusão de cloreto ou álcali e permeabilidade. Além disso, as

interações químicas entre a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e o cimento que melhoram a estrutura do concreto não estão bem documentadas.

Nesse contexto, o presente trabalho analisa o comportamento de concretos autoadensáveis, com baixos consumos de cimento e altos teores de metacaulim e resíduos da biomassa da cana-de-açúcar, submetidos à ação independente e combinada de CO₂ e íons cloreto. Para tal, foram realizados ensaios que possibilitaram a observação dos parâmetros de durabilidade e, a partir disso, foi possível indentificar a influência do RBC e do metacaulim nos CAAs em relação as diversas situações de agressão.

1.1 Justificativa

O tema sustentabilidade vem sendo cada vez mais pesquisado envolvendo os materiais de construção, visto que o setor da construção civil é um grande responsável pela degradação do meio ambiente, seja pela extração de matérias-primas naturais ou pelo beneficiamento/produção dos materiais industrializados, gerando também grandes impactos ambientais.

É crescente a quantidade de estudos relacionados a utilização de materiais alternativos para substituir parte do cimento em concretos, com a finalidade de melhorar a sustentabilidade destes. Como exemplos desses estudos tem-se os de Corinaldesi e Moriconi (2009), Isaia; Furquim e Gastaldini (2012), e, Bacarji *et al.* (2013), em concretos normalmente vibrados (CNV) com resíduos, e, investigando o comportamento de concretos autoadensáveis com materiais suplementares em substituição do cimento, tem-se: Chopra *et al.* (2015), Le e Ludwig (2016), Long *et al.* (2017), Mir e Nehme (2017), Sandhu e Siddique (2017), entre outros.

A explanação do concreto autoadensável com baixos teores de cimento, é justificada pelos benefícios diretos a racionalização e redução do uso do cimento e, conseqüentemente, menor degradação ao meio ambiente. Porém, é necessária uma investigação quanto a durabilidade destes concretos (PROSKE *et al.*, 2014). Atualmente é iniciada uma era em que a sustentabilidade, e a durabilidade dos materiais serão consideradas mais importantes que a alta

resistência inicial ou a alta velocidade de produção, que, por razões financeiras, tem sido o principal objetivo da indústria (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A sustentabilidade e durabilidade dos materiais estão interligadas, visto que produtos mais duráveis têm suas condições de uso prolongada. Sendo assim, a necessidade por uma possível substituição e ou reparo é menor o que, conseqüentemente, reduz o uso de novos materiais que seriam utilizados para produzir tais produtos que viessem a substituir os antigos em um curto espaço de tempo.

Quando se trata de durabilidade do concreto, muitos parâmetros podem ser observados, dentre eles está a resposta ao ataque de íons cloreto e carbonatação. Buscando nas principais bases de pesquisa da área¹, foram encontrados diversos trabalhos investigando o ataque de íons cloreto e a carbonatação isoladamente em concretos normalmente vibrados (CNV)². Alguns pesquisadores também investigaram a ação combinada desses agentes agressivos em CNVs³, porém, não foram encontradas pesquisas acerca da ação combinada dos íons cloreto e carbonatação em concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento, incluindo o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim.

Nesse sentido o presente trabalho justifica-se no intuito de investigar e preencher a lacuna de conhecimento acerca dos parâmetros de durabilidade, principalmente em relação a corrosão, de CAAs com baixo consumo de cimento. Isto possibilita entender como e o porquê a redução do cimento em grandes quantidades e adição do MK e RBC em concretos autoadensáveis causam uma possível melhora no caso de cloreto e, geralmente, piora quando expostos à carbonatação. Além disso, compreender qual o comportamento desses CAAs frente a combinação dos dois ataques. Assim sendo, tem-se como hipótese de que a densificação da matriz não acarretará um aumento acentuado da corrosão.

¹ Science Direct (Elsevier), Revista Matéria (COPPE, UFRJ), Revista Ambiente Construído (UFRGS), Revista Concreto & Contrução (IBRACON), Revista Alconpat (Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción), dentre outras.

² Ex.: Kapoor, Singh e Singh (2016); Mohammed, Dawson e Thom (2014); Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011); entre outros.

³ Ex.: Wang *et al.* (2017); Jang *et al.* (2016); Liu *et al.* (2017); entre outros.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar parâmetros de durabilidade, com ênfase na corrosão frente ao ataque combinado de Cl^- e CO_2 em concretos autoadensáveis com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim em substituição parcial de até 50% do cimento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar as características físico-químicas pertinentes dos materiais constituintes dos CAAs em estudo;
- Produzir concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais: resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim;
- Analisar o comportamento reológico e mecânico, e a influência de cada adição mineral, bem como a associação destas;
- Entender o desempenho dos CAAs frente ao ataque, combinado e individual, de íons cloreto (Cl^-) e da carbonatação (CO_2) de modo acelerado;
- Analisar a combinação dos mecanismos de deterioração do concreto (Cl^- e CO_2), buscando uma relação de influência existente entre ambos;
- Analisar o potencial de corrosão, a resistividade elétrica e os índices físicos do CAA relacionados aos mecanismos de ataque em estudo.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto autoadensável

O concreto autoadensável teve seu uso iniciado no Japão. Em 1983 houve uma redução gradual do número de trabalhadores qualificados na indústria de construção no país o que acarretou uma redução similar na qualidade dos produtos da construção civil. Nesse ano, o problema da durabilidade das estruturas de concreto já era um importante tema de grande interesse. Desse modo, surgiu como uma solução para a realização de estruturas de concreto duráveis o emprego do concreto autoadensável. Posto que este material possui a habilidade de se adensar pelo seu próprio peso sem necessidade de vibração, fazendo com que houvesse uma diminuição da dependência da dependência da mão-de-obra para sua execução. O CAA foi proposto por Okamura em 1986 (OKAMURA; OUCHI, 2003).

A principal diferença entre o concreto normalmente vibrado e o concreto autoadensável são suas propriedades no estado fresco. O concreto autoadensável deve ter alta fluidez e estabilidade da mistura, fornecendo assim três características fundamentais: o fluxo ou a capacidade de preencher espaços sem vibração, a capacidade de passar por restrições e a capacidade de resistir à segregação (PELISSER; VIEIRA; BERNARDIN, 2018).

Os materiais utilizados para a elaboração do CAA, na prática, são os mesmos utilizados para o concreto normalmente vibrado. Neville e Brooks (2013) apontam que a obtenção do CAA requer a alteração de alguns parâmetros relação ao CNV, tais como: uso de materiais mais finos (menores que 600 μ m), o alcance da viscosidade adequada a partir de um agente controlador; uma relação água/cimento (a/c) \cong 0,4; o uso de superplastificantes; a diminuição do teor de agregado graúdo; e, o emprego de agregados de boa forma e textura. Segundo os autores, esses parâmetros promovem uma microestrutura mais uniforme e zona de transição menos porosa.

Esses finos podem ser compensados através do aumento do teor de cimento. Porém, esta opção acaba por, muitas vezes, inviabilizar a fabricação do CAA devido a alguns fatores: alto custo, aumento do calor de hidratação, maior retração, como também o aumento da emissão de CO₂ oriunda da maior quantidade de cimento necessária. Outras opções são as adições minerais comerciais como o metacaulim, a sílica ativa, as cinzas volantes e os resíduos agroindustriais, por exemplo, o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar.

No Brasil, desde 2010 existe normalização referente ao CAA. Atualmente, dispõe-se das normas NBR 15823-Parte 1 a 6 (ABNT,2017) que estabelecem os requisitos para classificação, controle e recebimento do concreto autoadensável no estado fresco, bem como definem e estabelecem limites para as classes de autoadensabilidade, além de prescreverem os ensaios para verificação das propriedades do concreto autoadensável (CAA).

2.2 Concreto autoadensável com baixos teores de cimento

O consumo e a produção de cimento ocasionam a liberação de uma quantidade significativa de dióxido de carbono. Tendo como objetivo reduzir o uso de cimento na fabricação de concreto, a reutilização de resíduos e subprodutos industriais é uma opção atraente para produzir concretos menos degradantes ao meio ambiente (POPEK; SADOWSKI, 2017).

Essa redução do consumo de cimento em concretos pode ser feita principalmente através da utilização de materiais cimentícios suplementares (SCMs) como as adições minerais, sendo essas adições, normalmente, resíduos de outras indústrias ou pozolanas naturais que não causem grandes impactos para o meio ambiente relacionados a sua produção, e sejam sustentáveis como a sílica ativa, a cinza volante, o metacaulim, o pó dolomítico e o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar por exemplo nos estudos de Wongkeo *et al.* (2014); Badogiannis *et al.* (2015); Juenger e Siddique (2015); Nguyen et el. (2018); Shah e Bishnoi (2018); Moretti, Nunes e Sales (2018).

Essa prática é favorável à indústria, geralmente, resultando em concreto com custos mais baixos, de menor impacto ambiental e com propriedades mecânicas e durabilidade compatíveis aos concretos normalmente vibrados de resistência mecânica intermediária (JUENGER; SIDDIQUE, 2015).

Segundo Pelisser, Vieira e Bernardini (2018), uma vez que os concretos autoadensáveis são produzidos usando aditivos superplastificantes e com grandes quantidades de finos, o produto apresenta resistência mecânica superior a 40 MPa que às vezes não é um requisito do projeto. Portanto, a produção de CAAs com pequenas quantidades de cimento pode resultar em concretos com valores de resistência mais baixos possibilitando ser usados em uma escala maior, além de reduzir os impactos ambientais e econômicos, contribuindo assim para a eficiência do concreto estrutural.

Diversos estudos mostram a vantagem do uso de adições minerais no CAA, como a melhoria na trabalhabilidade, eficiência na modificação de viscosidade e menor custo, uma vez que o cimento é, normalmente, o componente de maior valor comercial (UYSAL & YILMAZ, 2011).

Pelisser, Vieira e Bernardini (2018) elaboraram uma tabela com dados de trabalhos anteriores da eficiência do consumo de cimento na resistência à compressão axial de concretos autoadensáveis produzidos com adições minerais. Os índices de eficiências obtidos estão representados na Tabela 2.1. É apresentado quantos quilos de cimentos foram utilizados para cada megapascal de resistência obtido e, conseqüentemente, o que necessitar de uma menor quantidade de cimento por megapascal de resistência é o concreto de maior eficiência. O cálculo é feito a partir da razão entre o consumo de cimento, em kg/m^3 , e a resistência à compressão axial em MPa.

Tabela 2.1 - Eficiência do consumo de cimento em CAAs com adições minerais (adaptado de Pelisser, Vieira e Bernardini (2018)).

Referência	Consumo de cimento (kg/m^3)	Materiais cimentícios suplementares (kg/m^3)	Resistência à compressão (MPa)	Eficiência do consumo de cimento ($\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$)
Sukumar <i>et al.</i> , 2008	250	275 (FA)	39,6	6,3
Yazıcı, 2008	180	360,0 (FA) + 60,0 (SF)	54	3,3
Sahmaran <i>et al.</i> , 2009	250	250 (FA)	40,8	6,2
Gesoglu <i>et al.</i> , 2009	180	202,5 (FA) + 67,5 (SF)	44,9	4,0
Guneyisi <i>et al.</i> , 2010	180	202,5 (FA) + 67,5 (SF)	37,4	4,8

Liu, 2010	437	80 (FA)	69,7	6,2
Corinaldesi e Moriconi, 2011	440	100 (FA)	45	9,7
Vejmelkova <i>et al.</i> , 2011	364	243 (MK)	67,7	5,3
Uysal e Sumer, 2011	357	193 (FA)	67,5	5,2
Madandoust e Mousavi, 2012	348	20 (MK)	36	9,7
Sebaibi <i>et al.</i> , 2013	357	40 (FA)	50	7,1
Nepomuceno <i>et al.</i> , 2014	472	92 (FA)	56,8	8,3
Zhao <i>et al.</i> , 2015	276	184 (FA)	56	4,9
Singh e Singh, 2016	430	185 (FA)	33	13,0
Long <i>et al.</i> , 2017	152	168 (FA)	24,6	6,2
Pelisser, Vieira e Bernardini (2018)	472	52 (MK)	67,2	7,0
	240	26,7 (FA) +26,7 (MK)	28,6	8,4

* FA= cinzas volantes; SF= sílica ativa e MK=metacaulim

A partir dos dados observados na tabela supracitada, Yazıcı (2008) foi quem obteve o melhor índice de eficiência do consumo de cimento, sendo necessário apenas 3,3 quilos de cimento para cada megapascal de resistência. Seguindo o raciocínio de sustentabilidade, Meyer (2009) afirma que ao substituir 50% do cimento dos concretos produzidos cerca de 1 bilhão de toneladas de CO₂ por ano deixam de ser emitidas.

A partir da Tabela 2.1, percebe-se que muitos autores utilizam mais de uma adição mineral na composição do concreto. Justificando esta situação, Le *et al.* 2015 afirma que cada adição mineral tem suas próprias vantagens e desvantagens. Porém a combinação de várias pode aumentar suas vantagens e permitir uma maior substituição do cimento.

O uso do metacaulim na produção dos CAAs com baixo consumo de cimento mostra-se bastante satisfatório. Kannan e Ganesan (2014) concluíram que para até 40% de substituição do cimento por metacaulim não há qualquer efeito diverso na durabilidade, sendo isto acrescido de uma melhoria na

permeabilidade. Corroborando com esta afirmação, Sfikas, Badogiannis e Trezos (2014) afirma que as partículas de metacaulim são mais finas do que as partículas de cimento e apresentam características de forma diferentes, contribuindo para um melhor empacotamento. A substituição do cimento por metacaulim em CAA também resulta em numa diminuição exponencial do coeficiente de migração de cloreto não estável e num aumento da resistência à penetração de cloreto (BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

Além do aprimoramento do desempenho sustentável do concreto, por meio de sua maior durabilidade, o metacaulim também é considerado um material sustentável e ecologicamente correto, visto que as emissões de CO₂ durante o processo de produção são menores. Assim, quando o MK é utilizado como material de substituição do cimento Portland, é conseguida uma redução significativa do total de emissões de CO₂. A principal desvantagem do MK é o seu alto custo, comparado ao cimento. No entanto, isso pode ser atribuído principalmente a baixa escala de produção atual. Uma maior implementação na indústria de cimento e concreto, com base em seu mérito tecnológico e ambiental, poderia diminuir potencialmente o seu custo de mercado e, consecutivamente, o custo final do concreto (BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

Outra opção de adição mineral é o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, obtido através do processo de cogeração de energia pela queima do bagaço da cana-de-açúcar. A composição química e mineralógica do RBC faz dele um material suplementar potencial para misturas de cimento Portland. A finura, a cristalinidade e a presença de partículas não queimadas são cruciais para o desenvolvimento da reatividade pozolânica e para um bom desempenho mecânico (PAYÁ *et al.*, 2018).

Aproximadamente 1,6 bilhão de toneladas de cana-de-açúcar da indústria açucareira geram anualmente quase 493 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar (KHATTAB; WATANABE, 2019). Segundo Payá *et al.* (2018), a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é a maior safra por quantidade de produção no mundo. O Brasil é o país que mais produz cana-de-açúcar no mundo, seguido da Índia. Na safra de 2017/2018 foram produzidos 633,26 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2018).

Devido ao RBC possuir propriedades pozolânicas limitadas, o seu uso é, normalmente, em menores proporções de substituição do que as pozolanas comerciais, haja visto que grandes porcentagens de substituição podem gerar impacto negativo nas propriedades dos concretos. Quando inserido na matriz cimentícia o RBC afeta o desempenho devido aos efeitos físicos associados principalmente ao empacotamento da mistura, que depende do tamanho, forma e textura das partículas, e aos químicos, pela reação pozolânica (CORDEIRO *et al.*, 2008). Moraes *et al.* (2015) realizaram testes em argamassas com até 25% de substituição e observaram que as argamassas produzidas com RBC conseguiram resultados equivalentes de resistência em comparação a mistura só com cimento. O uso de uma porcentagem maior de RBC fica condicionada a uma possível redução da resistência mecânica.

Diante das pesquisas anteriores percebe-se que é possível fazer concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento de forma satisfatória e benéfica ao meio ambiente. Contudo, existem lacunas na qual faz-se necessário desenvolver mais pesquisas para viabilizar a aplicação desta categoria de concreto. Dentre elas, por exemplo, o entendimento acerca da influência de altas quantidades de metacaulim e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar no comportamento dos CAAs frente a ambientes agressivos. Além disso, é importante ainda compreender o impacto da redução da alcalinidade desses concretos no processo de corrosão.

2.3 Durabilidade das estruturas de concreto

A durabilidade das estruturas de concreto é um assunto recorrente nas últimas décadas devido ao envelhecimento precoce das estruturas e acidentes causados por falta de manutenção. A vida útil e durabilidade da estrutura está relacionada com os materiais constituintes, a agressividade do ambiente em que está inserida, consumo de cimento, o fator água/cimento e a espessura do cobrimento do concreto. No Brasil, a NBR 6118 (ABNT, 2014) informa as diretrizes dos parâmetros de durabilidade das estruturas de concreto.

Uma obra deve resistir a diversas agressões ou solicitações (físicas, mecânicas e químicas) ao longo do tempo, isto é, às cargas as quais está submetida e a ações diversas como vento, chuva, frio, calor, e outras variações

do ambiente, conservando sua estética. Deve satisfazer, constantemente, os requisitos dos usuários ao longo do tempo (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

A evolução da construção civil, com o aperfeiçoamento dos sistemas construtivos e dos métodos de cálculo, apresentou duas faces diferentes de uma mesma moeda: ao passo que permitiu maior produtividade e menores custos, de acordo com as premissas capitalistas que se impunham, também foi responsável pelo aumento da esbelteza das estruturas, com redução do cobrimento das armaduras e aumento substancial das tensões de trabalho, o que contribuiu decisivamente para uma menor durabilidade das edificações (RIBEIRO *et al.*, 2014).

A durabilidade do concreto armado é principalmente influenciada pela sua microestrutura – a composição química, a conectividade, a continuidade, a tortuosidade e o raio de seus poros, pois isso determina a forma como os gases, líquidos e outras substâncias penetram na cobertura de concreto para o reforço (DODDS, 2017).

Em uma pasta de cimento Portland hidratada, a fase sólida é composta por hidratos de cálcio insolúveis (como o silicato de cálcio hidratado, C-S-H; o hidróxido de cálcio, C-H; e etringita, C-A-S-H) e se encontra em equilíbrio estável com a solução dos poros de alto pH (entre 12,5 e 13,5). Dessa forma, qualquer ambiente que possa levar à redução da alcalinidade da solução dos poros é considerado agressivo, pois levará à desestabilização dos produtos de hidratação dos materiais cimentícios (RIBEIRO *et al.*, 2014).

A perda da proteção natural oferecida à armadura pelo cobrimento de concreto pode ocorrer através de diversos mecanismos, sendo preponderantes a despassivação por íons cloreto e por carbonatação, estes iniciam e/ou aceleram o processo de corrosão das estruturas (HELENE, 1997).

2.3.1 Corrosão

O processo de corrosão é a principal manifestação patológica das estruturas de concreto armado e várias são as suas causas. O concreto funciona como uma barreira física e química de proteção da armadura. O aço presente no concreto é protegido da corrosão pela sua alcalinidade que resulta do processo

de hidratação do cimento e pela camada de corbetura evitando o contato do aço com os agentes agressivos.

Para que o concreto exerça seu papel de proteger o aço de forma satisfatória, medidas de prevenção e manutenção devem ser tomadas nas mais diversas etapas da obra. Estas medidas inclusas desde a concepção do traço do concreto e a espessura de cobrimento que devem estar em consonância com o ambiente em que a estrutura será instalada. Durante a utilização da edificação é de fundamental importância uma intervenção de manutenção periodicamente na estrutura.

De uma maneira geral, a corrosão pode ser definida como um processo de deterioração do material devido à ação química ou eletroquímica do meio ambiente, resultando na perda de massa do material. O processo de corrosão é espontâneo, causado pela necessidade do material em atingir o seu estado de menor energia, que é o seu estado mais estável. A maioria dos metais são encontrados na natureza na forma de compostos, como óxidos e hidróxidos, visto que nessa forma eles apresentam um estado mínimo de energia (RIBEIRO *et al.*, 2014).

Segundo Kurda, Brito e Silvestre (2019), o aço presente no concreto é protegido da corrosão pela sua alcalinidade que resulta do processo de hidratação do cimento. O controle desse fenômeno químico e de difusão tem grande importância na durabilidade das estruturas de concreto armado, portanto, a manutenção da alcalinidade da camada de cobrimento da armadura é de fundamental importância para a vida útil da estrutura (NUNES, 2014).

Pourbaix *apud* Gentil (1996) avaliou as reações termodinamicamente possíveis em função do potencial de eletrodo (em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio) e do pH em diversos sistemas metal-solução, dentre eles, o sistema ferro-água que pode ser utilizado para o caso das armaduras em estruturas de concreto armado, mostrado na Figura 2.1.

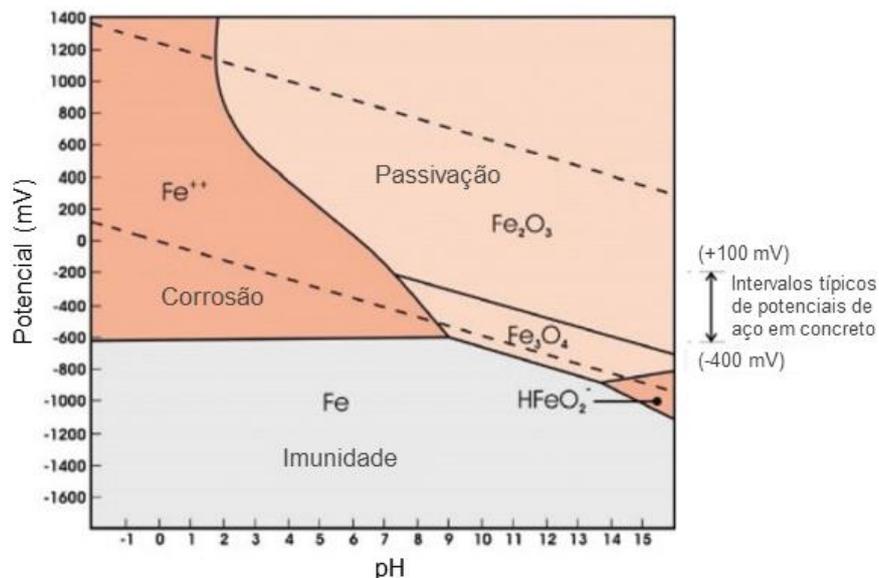


Figura 2.1 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema Ferro-H₂O a temperatura de 25°C. (adaptado de Rivetti *et al.* (2018))

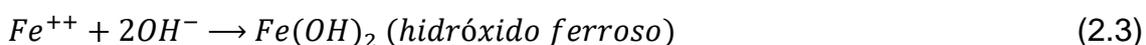
Para um valor de pH da ordem de 13,5 (líquido intersticial do concreto), o diagrama mostra que o ferro está em equilíbrio com o Fe₃O₄ para um potencial de -800 mV; abaixo deste valor, o ferro não se corrói (domínio de imunidade) e, para valores superiores, os óxidos Fe₃O₄ e Fe₂O₃ formam um filme passivo na superfície do aço, reduzindo a velocidade de corrosão para níveis desprezíveis (domínio de passivação) (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Sob as condições de pH reduzido, e de acordo com o diagrama de Pourbaix, a barra de aço fica ativa. Assim que isto acontece, o processo de corrosão é iniciado e a química da interface aço/concreto sofre mudanças drásticas que afetam as propriedades do concreto armado, como a adesão interfacial. Nestas condições, a corrosão de aço pode ser catastrófica (MONTEMOR *et al.*, 2002).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os produtos de ferro comum e de aço normalmente são cobertos por uma fina película de óxido de ferro, na ordem de 4nm, que se torna impermeável e fortemente aderente à superfície do aço em meio alcalino, o que faz do aço um material passivo no tocante à corrosão. Porém, ao entrarem em contato com o meio ambiente e com o passar do tempo, esta passividade vai sendo destruída, daí passam a reagir espontaneamente, se transformando em óxidos, que apresentam um menor estado de energia.

A corrosão representa o ataque destrutivo de um metal por reações eletroquímicas que conduzem a um transporte de íons e de elétrons na interface

metal-solução. Na superfície do metal, dois tipos de reações simultâneas e interdependentes ocorrem, correspondes ao processo de corrosão-oxidação: uma reação anódica, ou oxidação do metal e uma reação catódica, que corresponde à redução de um oxidante presente na solução e à captura, no cátodo, de elétrons provenientes do ânodo. Estas reações principais de oxidação e de redução são seguidas de reações secundárias de formação dos produtos de corrosão na superfície do metal, como nas reações 2.1 a 2.4 (OLLIVIER; VICHOT, 2014 e NEVILLE; BROOKS, 2013):



Verifica-se que o oxigênio é consumido, mas a água é regenerada e é necessária para a continuidade do processo. Portanto, não existe corrosão em uma atmosfera totalmente seca. Da mesma forma, não ocorre corrosão expressiva em concreto totalmente imerso em água, exceto quando a água puder incorporar ar (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A transformação do ferro metálico em produto de corrosão (ferrugem) é acompanhada por um aumento de volume. A Figura 2.2 ilustra esquematicamente o processo eletroquímico e a formação dos produtos de corrosão, bem como o aumento do volume dos produtos da oxidação do ferro.

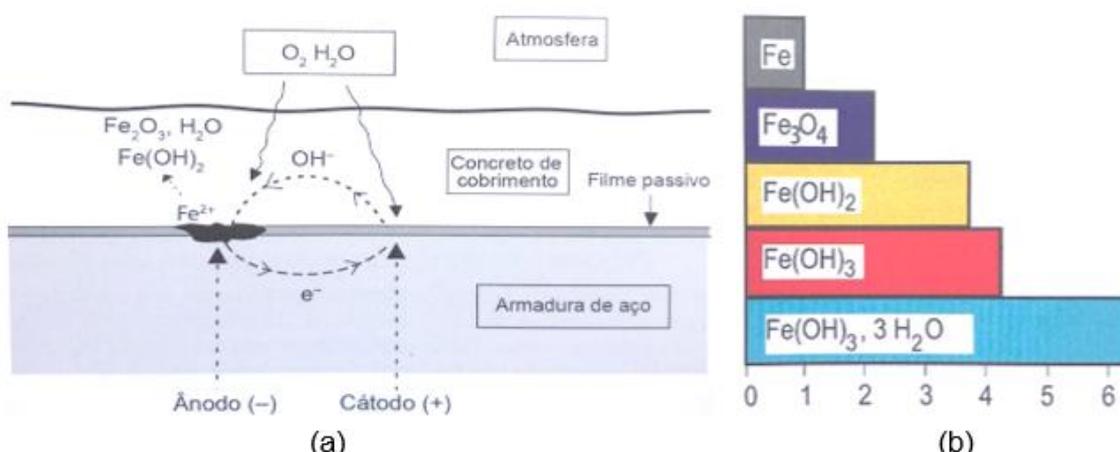


Figura 2.2 - (a) esquema de formação dos produtos de corrosão e (b) aumento do volume dos produtos da corrosão do ferro (adaptado de OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Ghanooni-Bagha *et al.* (2016) demonstra em seu trabalho que o produto da corrosão é muito maior, na ordem de 600%, do que o volume inicial de materiais antes da reação. Este volume ocupa o espaço pequeno entre o concreto e a armadura e, conseqüentemente, exerce pressão interna sobre o concreto, causando rachaduras.

De acordo com Stanish, Hooton e Thomas (2000), é raro que uma diferença de pressão considerável seja exercida sobre a estrutura e, além disso, o efeito da absorção é tipicamente limitado a uma região superficial da espessura de revestimento. Desta forma, o mecanismo predominante de penetração de agentes agressivos é a difusão. Assim, pode-se afirmar que este mecanismo de penetração possui considerável influência no período inicial da corrosão.

A difusão é um mecanismo de transporte de substâncias de um meio para outro devido a uma diferença de potencial químico, muitas vezes de concentração. (RIBEIRO, 2010). Os dois principais agentes agressivos que comprometem as armaduras do concreto, os íons cloreto (Cl^-) e o CO_2 , têm a sua penetração controlada pela difusão. Além disso, a penetração do oxigênio, substância essencial para o progresso do processo catódico, também se dá por difusão (SANTOS, 2006).

São definidos dois estágios distintos do fluxo por difusão: o estágio estacionário, caracterizado pelo fluxo constante das substâncias em difusão, e o estágio não estacionário no qual o fluxo é dependente do tempo e da profundidade de penetração. Estes estágios podem ser representados pelas primeira e segunda leis de Fick, respectivamente (RIBEIRO, 2010).

Para verificar o processo de avanço da corrosão, existem técnicas de análise não destrutivas. Segundo Assouli; Ballivy e Rivard (2008), o potencial de corrosão de circuito aberto e a resistividade elétrica são as técnicas mais comuns para avaliar a corrosão das armaduras, mesmo que sejam técnicas meramente qualitativas de avaliação da termodinâmica do processo, não fornecendo dados sobre a cinética do fenômeno.

Entre os métodos eletroquímicos de avaliação do risco de corrosão das armaduras no concreto, a medida do potencial de corrosão através de eletrodo de referência e eletrodo de trabalho é o método mais simples e mais utilizado

devido ao seu caráter não destrutivo ao custo relativamente baixo. (OLLIVIER e VICHOT, 2014). Na prática, podem ser utilizados três tipos de eletrodos de referência: o eletrodo de calomelano saturado, o eletrodo de prata-cloreto de prata e o eletrodo de cobre-sulfato de cobre.

A medida do potencial de corrosão é usada para classificar a probabilidade de corrosão de reforços de aço carbono imersos em concreto, de acordo com a norma ASTM C-876 (ASTM, 2015). O valor de potencial medido em relação a um eletrodo de referência, permite, em teoria, chegar a um posicionamento acerca do estado ativo ou passivo da armadura embutida no concreto, sendo, portanto, classificado como um ensaio de caráter qualitativo. O esquema do ensaio é mostrado na Figura 2.3.

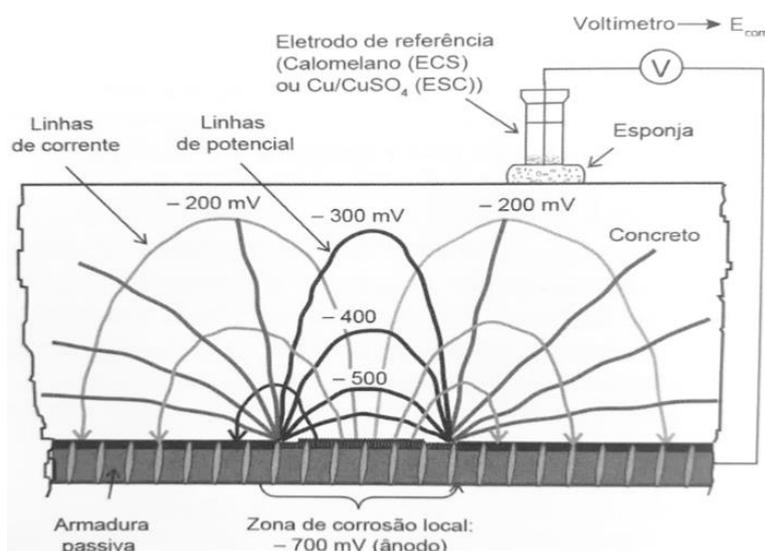


Figura 2.3 - Medida do potencial de eletrodo de uma armadura (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

O registro da diferença de potencial é proporcionado em virtude da formação de uma pilha de corrosão, através do eletrodo constituído pelo aço/concreto e o eletrodo de referência que mantém o potencial estável. A partir disso, há uma relação entre a existência de atividade ou passividade no elemento metálico e o potencial obtido, de maneira que valores mais negativos indicam atividade corrosiva e valores menos negativos sugerem a passivação do aço (CASCUDO, 1997).

Com o uso adequado dessa técnica e a combinação com determinações de teor de cloretos, resistividade elétrica do concreto, profundidade de cloreto e profundidade de carbonatação, por exemplo, é possível estabelecer um

panorama da situação da corrosão na estrutura de concreto armado ou no corpo de prova em laboratório através de um mapeamento da peça inspecionada, indicando áreas com diferentes probabilidades de corrosão (MEDEIROS *et al.*, 2017).

De acordo com Song e Saraswarhy (2007), a solução aquosa contida na rede de poros do concreto atua como um eletrólito e, dessa forma, o aço desenvolve um potencial elétrico que pode variar de um local para outro das peças estruturais em função das descontinuidades que possam ser geradas na estrutura de concreto armado como: carbonatação, contaminação por cloretos, variações na porosidade e na umidade, entre outros.

Diante da importância de compreender o processo de corrosão para prolongar a vida útil das estruturas, estudos de monitoramento e métodos de análise vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos. Medeiros *et al.* (2017) analisaram a influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobertura através do potencial de corrosão. Para tal, foram realizadas leituras de potencial de corrosão utilizando um voltímetro de alta impedância conectado a um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre e à armação das amostras (cubos de concreto armado).

2.3.2 Ataque ao concreto por íons cloreto

Dentre os mecanismos de ataque às estruturas de concreto armado, o realizado pelos íons cloreto (Cl^-) é considerado um dos mais severos, devido ser do tipo puntiforme. Os íons de água e cloreto podem penetrar o concreto através de uma combinação de mecanismos de transporte, nomeadamente absorção por ação capilar, difusão e permeação (DODDS, 2017).

A corrosão de barras de reforço de aço pode iniciar uma grande quantidade de consequências problemáticas, como a perda da área da seção transversal da barra de aço, o crescimento de rachaduras de concreto e até mesmo o desprendimento da cobertura de concreto. Considerando o fato de que a velocidade de corrosão é, em geral, mais elevada na presença de cloreto, os mecanismos físico-químicos básicos não são ainda perfeitamente explicados (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Mejía de Gutiérrez e Aguirre (2013) afirmam que a presença de cloretos no interior do concreto pode ter origem em duas fontes principais: a mistura de concreto (agregados contaminados, água do mar ou água poluída e aditivos com alto teor de cloreto) e o ambiente externo. Uma vez que os íons cloreto penetram no concreto, eles se espalham como cloretos livres e cloretos combinados.

Os cloretos realmente nocivos às armaduras são os livres. Estes se difundem através da matriz cimentícia até atingirem o aço; essa difusão causa dissolução localizada da camada passiva e ataca em pontos específicos, o que pode reduzir significativamente as propriedades estruturais do aço (REAL *et al.*, 2015).

Os cloretos combinados correspondem aos cloretos que são quimicamente ligados através da reação com o C₃A e C₄AF hidratados (produtos da hidratação do cimento) ou adições minerais formando novos produtos, os cloroaluminatos de cálcio, em particular, o monocloroaluminato de cálcio hidratado ou sal de Friedel – C₃A.CaCl₂.10H₂O, que possui como característica não ser expansivo (MEJÍA DE GUTIÉRREZ E AGUIRRE, 2013).

Para a corrosão induzida por cloreto ser iniciada, a camada passivadora deve ser penetrada. Os íons cloreto que cercam o reforço reagem em locais anódicos (como fissuras e defeitos) e destroem a película de proteção passiva no aço. Esta área serve como ânodo, enquanto o resto da superfície não danificada serve como um cátodo. Este efeito é geralmente chamado de corrosão por pite (BURGOS *et al.*, 2017).

Segundo Ollivier e Vichot (2014), concentrações muito baixas de cloretos (da ordem de 0,01%) podem provocar modificações na morfologia da camada passiva, formando o composto FeOOH; além disso, para valores iguais ou superiores a essa ordem de grandeza de concentração de Cl⁻, há o risco de ocorrência de íons complexos instáveis (FeCl₃⁻), que consomem os íons hidroxilas presentes segundo as reações (2.5 e 2.6):



Os elétrons liberados das reações de oxidação deslocam-se pelo metal até as zonas catódicas. De acordo com as reações anteriores, o processo leva à diminuição do pH e à reciclagem dos íons cloreto como ilustrado na Figura 2.4.

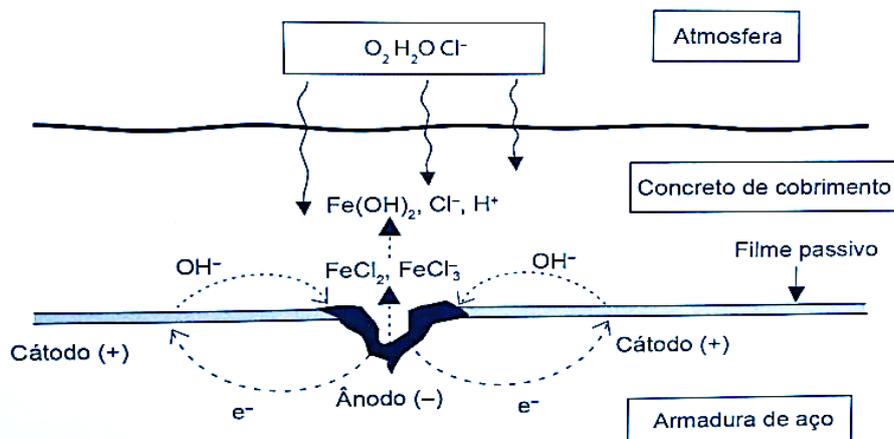


Figura 2.4 - Mecanismo da corrosão em presença de cloretos (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Corroborando com o exposto, Ribeiro *et al.* (2014) cita que por essas reações continuarem sem consumir o ânion cloreto, mesmo pequenas quantidades de cloreto podem ser responsáveis por grandes processos corrosivos.

Uma alternativa para diminuir o ataque por íons cloreto nas estruturas de concreto é o uso de adições minerais nas composições dos concretos. Materiais cimentícios suplementares, tais como cinzas volantes, metacaulim e sílica ativa tem significativa contribuição sobre a capacidade de o concreto resistir à penetração de íons cloreto, devido à capacidade desses materiais se ligarem aos cloretos (WONGKEO *et al.*, 2014).

Jung *et al.* (2018) estudaram o uso da microsílica ou sílica ativa (SF) em concreto, com a justificativa de seus benefícios de alta resistência inicial e baixa permeabilidade. Como a reação pozolânica da SF é muito ágil para formar o gel C-S-H, incorporando-se com o $Ca(OH)_2$ precipitado, o tamanho e quantidade dos poros tendem a diminuir e desse modo acontece a redução da permeabilidade aos íons externos.

Devido à significância deste problema, as investigações sobre o mecanismo do transporte de íons de cloreto no concreto são amplamente realizadas. Nos últimos anos, uma grande quantidade de estudos sobre o ataque

de cloreto em diferentes tipos de concreto vem sendo realizada e uma das formas de análise é através dos testes de imersão em sal (LIU *et al.*, 2017).

2.3.3 Ataque ao concreto por carbonatação

Segundo Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011), a hidratação do cimento gera, em linhas gerais, o C-S-H, relacionado ao ganho de resistência, e, C-H, principal responsável pelo desenvolvimento de um ambiente alcalino (pH aproximadamente, entre 12,5 e 13,8), e, no concreto armado, o pH elevado gera uma camada passivadora ao longo das barras de aço, que as protegem do fenômeno da corrosão.

O processo de carbonatação é devido à entrada de CO₂ da atmosfera para o interior do concreto; ambientes urbanos e poluição ambiental são fontes necessárias deste fenômeno. A carbonatação diminui o pH do concreto para aproximadamente nove. Quando o pH cair para abaixo de 9,5, a película de passivação na superfície de aço começa a se decompor e a corrosão se inicia (ZHANG; SHAO, 2016; HAN; PARK; YANG, 2013).

O dióxido de carbono presente no ar penetra sob forma gasosa no interior do concreto, através das redes de poros ou pelas fissuras. Na presença de água ocorre uma reação química de carbonatação com a pasta de cimento hidratada. Esta reação transforma os produtos da hidratação, notadamente o hidróxido de cálcio (portlandita – Ca(OH)₂), em carbonato de cálcio (CaCO₃). Apesar de que os outros compostos hidratados (aluminatos e silicatos de cálcio) são também sensíveis ao ataque de CO₂ produzindo igualmente a calcita. Desse modo a carbonatação envolve uma cadeia de reações (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Segundo Ribeiro *et al.* (2014), a perda da alcalinidade do concreto, em processo de neutralização por ação, principalmente, do CO₂, transforma os hidróxidos do cimento em carbonatos, é um mecanismo chamado de carbonatação, segundo a reação principal (2.7):



Na presença do líquido intersticial, em quantidade suficiente na porosidade do concreto, permite ao CO₂ presente na atmosfera sob forma de gás dissolver-se para formar íons CO₃²⁻, resultando na diminuição do pH do

meio. Na sequência, esses íons carbonato combinam-se com íons Ca^{2+} oriundos, principalmente, da portlandita para formar calcita e água (OLLIVIER; VICHOT, 2014). De forma esquemática, a Figura 2.5 apresenta a sucessão das reações elementares do processo de carbonatação.



Figura 2.5 - Mecanismo de carbonatação do Ca(OH)_2 (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Para alcançar a carbonatação, o dióxido de carbono deve entrar em contato com a água e os componentes alcalinos nos poros do concreto. A penetração depende de fatores ambientais, como a umidade relativa entre 50% e 70%, a temperatura e a concentração de CO_2 . O último fator pode atingir um valor máximo de aproximadamente 0,1% em ambientes urbanos (NASSER *et al.*, 2010). Outros fatores que contribuem para a propagação do CO_2 são a cura inadequada, a compactação deficiente e a alta relação água-cimento, que geram concreto altamente permeável (AGUIRRE-GUERRERO; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; MONTÊS-CORREIA, 2016).

Helene (1993) chama a atenção de que embora as adições minerais melhorem consideravelmente várias propriedades do concreto, reduzindo a permeabilidade e a porosidade e aumentando a resistência à compressão, aumentam a velocidade de carbonatação, o que é explicado devido ao teor de álcalis disponível para as reações de carbonatação.

As afirmações de Helene (1993), são preocupantes para os CAAs devido, normalmente, utilizarem as adições minerais como agente de controle da viscosidade, evitando os fenômenos de exsudação e segregação. Esse fato, tem ainda maior relevância nos estudos da viabilidade técnica de concretos com baixíssimos teores de cimento em benefício da sustentabilidade.

Mejía de Gutiérrez *et al.* (2009) determinaram que a profundidade de carbonatação para amostras misturadas com metacaulim após 28 dias de cura é ligeiramente maior que a profundidade de carbonatação para amostras de concreto apenas com cimento. No entanto, a taxa de carbonatação diminui após aumentar o tempo de cura. Kim, Lee e Moon (2007) afirmam que a profundidade da carbonatação aumenta em concretos com adições minerais.

Outros estudos avaliam a interferência do uso de adições minerais na ocorrência de carbonatação, Camacho *et al.* (2016) observou uma queda da alcalinidade na solução dos poros do concreto contendo cinzas volantes, provavelmente, devido a diminuição dos teores de C-H pelas reações pozolânicas promovidas pela cinza volante, gerando uma frente carbonatada elevada e quase duplicada em apenas 3 meses de exposição ao CO₂. Por outro lado, a densificação da mistura através da formação do CaCO₃ pode ser uma forma de mitigação da entrada de outros agentes agressivos, como os íons cloreto.

2.3.4 Ação combinada da difusão de íons cloreto e CO₂ em concretos

Poucos foram os trabalhos encontrados de concretos autoadensáveis submetidos a ação combinada de ataque de íons cloreto e carbonatação, e, não foram observados estudos dessa natureza com concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento utilizando RBC e MK. Dos trabalhos analisados, percebe-se que os pesquisadores ainda não chegaram a um entendimento sólido sobre o comportamento das matrizes cimentícias quando submetidas a ação combinada desses agentes corrosivos.

Cardoso *et al.* (2017) afirmam não haver um consenso entre os pesquisadores sobre a influência da carbonatação no ingresso de cloretos para o interior do concreto, talvez devido à falta de padronização sobre os diferentes parâmetros envolvidos nos ensaios utilizados, tais como o tipo de ensaio, o tipo e o período de cura das amostras, a temperatura, a umidade, a concentração de NaCl e CO₂ e as diferentes formas de ciclos de indução.

Segundo Monteiro e Pereira (2015) corpos de prova que sofreram carbonatação possuem profundidade de penetração de cloreto superior em

relação aos CPs não carbonatados, submetidos às mesmas concentrações de cloreto e mesmas condições de ciclos de molhagem e secagem.

Em contraponto, Cardoso *et al.* (2017) analisaram o comportamento de argamassas com metacaulim e sílica ativa submetidas a ação combinada da carbonatação e íons cloreto, e, concluíram que a profundidade de penetração de íons cloreto foi menor nos corpos de prova (CPs) carbonatados. Este fato pode estar relacionado com o refinamento dos poros causado pela carbonatação, o que leva a crer que há uma dificuldade da passagem dos íons cloretos através da zona carbonatada das argamassas. Porém, o contrário foi observado para a carbonatação, quanto maior o teor de substituição maior foi a profundidade de carbonatação.

Neste mesmo estudo, os pesquisadores concluem que os benefícios que as adições trazem às características do concreto sobrepõem-se a possível redução da reserva alcalina, pois os acréscimos da profundidade carbonatada foram pequenos em comparação as amostras sem adições, e provavelmente não serão suficientes para a despassivação das armaduras, considerando concretos com alcalinidade inicial elevada e um revestimento adequado.

Liu *et al.* (2017) corrobora com Cardoso *et al.* (2017), pois, os concretos submetidos à carbonatação apresentaram profundidades inferiores de penetração de cloretos, o que pode ser explicado pelo possível preenchimento dos poros capilares pela deposição de carbonato de cálcio formado a partir da carbonatação. Os autores concluíram que os concretos sob ataque combinado de dióxido de carbono e cloreto geralmente têm menos porosidade do que os concretos expostos ao ataque exclusivo de cloretos.

No estudo de Malheiro *et al.* (2014), realizado em argamassas, são apresentados resultados que aponta para consonância com Cardoso *et al.* (2017) e Liu *et al.* (2017), pois a penetração de cloretos alcançada para a situação combinada ($\text{CO}_2 + \text{Cl}^-$) foi menor que a penetração alcançada para a situação onde houve apenas penetração de cloretos (Cl^-), além disso, foi possível observar a existência de um "pico de cloretos" logo após o término da zona carbonatada. Se por um lado há um aumento da quantidade de cloretos livres provocada pela carbonatação, por outro há uma densificação dos poros e consequente redução da permeabilidade causada pela mesma carbonatação e

pontuam ainda que os agentes agressores em estudo (cloretos e gás carbônico), combinados ou não, alteram a permeabilidade à água e a absorção capilar dos provetes.

Wang *et al* (2017), estudaram não somente a ação combinada de íons cloreto e carbonatação em concretos quanto a influência da sequência da exposição, chegando a conclusões discrepantes aos de Malheiro *et al.* (2014). Os pesquisadores concluem que nos concretos submetidos a exposição de cloretos seguido de carbonatação, os íons cloreto são redistribuídos durante o estágio de carbonatação e a extensão dessa redistribuição está relacionada ao grau de carbonatação das amostras. No entanto, quando os concretos carbonatados são expostos a cloretos, há uma penetração de cloretos muito mais profundas no concreto devido à possível presença de microfissuração induzida por carbonatação na região próxima da superfície.

Outro estudo que apresentou resultados piores para penetração de íons cloreto quando combinado à carbonatação foi o de Camacho *et al.* (2016). Os pesquisadores comprovam que, quando submetidas à ação combinada, as amostras de concreto apresentaram uma maior profundidade de penetração de íons cloreto, e a adição de Cinza Volante (CV) piorou o desempenho do concreto:

“Com base nos resultados obtidos, é possível concluir [...] que a carbonatação tem uma influência negativa sobre o coeficiente de difusão dos cloretos, funcionando como um "caminho privilegiado" para a penetração dos mesmos. A adição de CV, apesar de ser benéfica para o aumento da resistência à penetração dos cloretos, quando exposta à ação do CO₂ e ao teste de migração em regime não estacionário, seguidamente, reduz a resistência aos Cl⁻, aumentando 249% o coeficiente de difusão de cloretos, em relação à amostra de referência, no 3º mês de ensaio.” (CAMACHO *et al.*, 2016).

Diante da revisão e das diferentes conclusões apresentadas é sensível a necessidade de intensificação das pesquisas no assunto para o preenchimento das lacunas percebidas.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho fundamentou-se em compreender o comportamento de concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento através da incorporação de RBC e MK, com o foco principal na análise dos indicativos de durabilidade. Os CAAs foram submetidos ao ataque de carbonatação acelerada e íons cloreto, de forma individual e combinada, oportunizando assim a verificação da influência desses ataques na deterioração dos CAAs, principalmente, em relação ao processo de corrosão.

Foram produzidos concretos autoadensáveis com altos teores de adições minerais, em proporções de até 50%, partindo da premissa de obter concretos estruturais com propriedades mecânicas e de durabilidade satisfatórias. Inicialmente, foi utilizado um traço de referência sem adição mineral, com consumo de cimento aproximado de 450 kg/m³, e, a partir desse, foram produzidos outros quatro traços substituindo parcialmente o cimento por resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim.

Segundo trabalhos anteriores (ANJOS *et al.*, 2015; LE e LUDWIG, 2016; UYSAL e YILMAZ, 2011; KAVITHA *et al.*, 2015; SAFIUDDIN; WEST e SOUDKI, 2010; WONGKEO *et al.*, 2014), a porcentagem utilizada de 50% de substituição do cimento por outros materiais é considerada elevada.

O programa experimental utilizado foi dividido em quatro etapas: a) caracterização e beneficiamento dos materiais constituintes dos concretos autoadensáveis, b) a definição dos traços, c) produção dos concretos, moldagem de corpos de prova e os ensaios no estado fresco e endurecido destes, d) com os resultados obtidos durante a execução da pesquisa, discutiu-se a respeito do desempenho desses CAAs no que se refere a influência dos materiais utilizados, a efetividade de cada uma das adições minerais e ao efeito sinérgico dessas adições. De forma esquemática, a Figura 3.1 apresenta o fluxograma do planejamento experimental desta pesquisa.

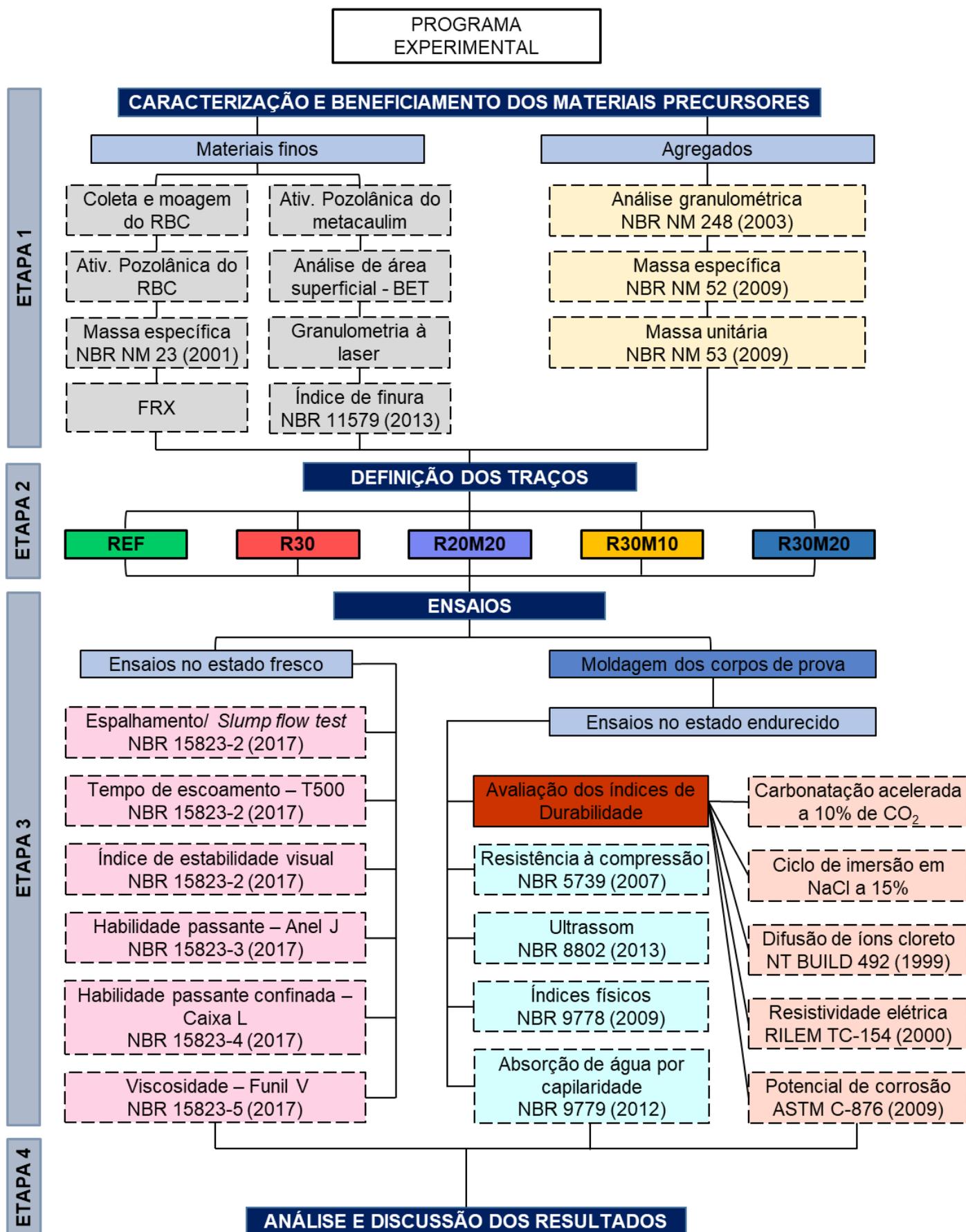


Figura 3.1 - Fluxograma do programa experimental.

3.1 Materiais utilizados

Diante do que foi exposto nos capítulos anteriores, os materiais foram selecionados de modo que possibilitassem produzir concretos autoadensáveis capazes de fluir com coesão e sem apresentar exsudação e segregação. Sendo assim, foram utilizados os seguintes materiais:

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI) fabricado no município de Pitimbu, litoral sul da Paraíba e fornecido pela empresa Nacional Cimentos, do Grupo Brennand. A escolha deste tipo de cimento se deu pelo fato deste não possuir adições pozolânicas em sua composição. Desse modo, a composição de cimento não interferiu nas alterações proporcionadas pelas adições minerais em estudo, o que facilita e torna mais verídica a análise da influência causada pelo RBC e MK nas composições de concreto autoadensável.

3.1.2 Adições Minerais

3.1.2.1 Metacaulim

Foi utilizado o Metacaulim BZ (MK), fabricado pela Caulim Nordeste, situada em Ipojuca/PE. A escolha por usar esse tipo de adição mineral foi devido este ser mais comumente utilizada na Região Nordeste.

3.1.2.2 Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar

O resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) foi obtido a partir da queima do bagaço nas caldeiras de uma usina sucroalcooleira produtora de açúcar, etanol e energia do grupo BIOSEV, localizada na Vila Estivas, região de Arez/RN. A coleta foi realizada na descarga da limpeza das caldeiras.

Como a usina usa sistema de filtração com auxílio de água, no ato da coleta, o RBC apresenta-se com uma umidade elevada. Desse modo, com a finalidade de retirar totalmente a umidade, foi necessário submeter o resíduo a um processo de secagem em estufa a temperatura de 105°C por um período de 24 horas, antes dos procedimentos seguintes de beneficiamento.

Posteriormente, com a intenção de aumentar a sua reatividade e melhorar o índice de pozolanicidade, optou-se por moer o resíduo. Essa prática de beneficiamento é comum em trabalhos anteriores que utilizam o RBC como material pozolânico, por exemplo, Anjos *et al.* (2013); Cordeiro, Tavares e Toledo Filho (2016); Jagadesh, Ramachandramurthy e Murugesan (2018); Rossignolo *et al.* (2018). Além disso, diante da diversidade de moagens documentadas, é perceptível não haver um consenso de qual o tempo e método específico para melhoramento do resíduo.

Nessa pesquisa, para a realização da moagem do RBC, foi utilizado um moinho de bolas rotativo do tipo SONNEX do laboratório de materiais e estruturas - LABEME da UFPB. O ciclo de obtenção e beneficiamento do RBC a partir da coleta na usina até a finalização da moagem está ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2- Esquema do ciclo de obtenção e beneficiamento do RBC.

A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de corpos moedores e suas respectivas características para moer uma carga de 2 kg de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar seco, com uma frequência rotacional equivalente a 61,5 RPM, totalizando 14999 rotações para cada ciclo de moagem.

Tabela 3.1 – Características dos corpos moedores do moinho de bolas.

Diâmetro (mm)	Massa unitária (g)	Quantidade	Massa total (g)
20	29,6	503	14875,0
25	56,7	101	5730,0
30	103,5	44	4555,0
40	264,7	20	5295,0

3.1.3 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi uma areia quartzosa fina oriunda de leito de rio da região de Serrinha/RN. Por sua vez, como agregado graúdo utilizou-se brita granítica da mesma região com diâmetro característico de 12,5 mm. O uso destes tipos de areia e brita se justifica devido à alta fluidez e tendência à segregação do concreto autoadensável necessitando, portanto, de materiais mais finos.

3.1.4 Aditivo químico para concreto

Com a finalidade de possibilitar a fluidez requerida pelo concreto autoadensável, foi utilizado um aditivo superplastificante de terceira geração livre de cloretos e à base de Éter Policarboxílico de nome comercial MasterGlenium® SCC 160, fornecido pela empresa MasterBuilders/BASF. As informações técnicas disponível no manual do produto estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados técnicos do aditivo superplastificante (Ficha técnica do produto).

Propriedade	Especificação
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido branco turvo
Densidade (g/cm ³)	1,067 a 1,107
pH	7,00 a 9,00
Teor de sólidos (%)	38,00 a 42,00

3.1.5 Água

Para a confecção dos concretos foi utilizado a água fornecida pela concessionária local de abastecimento água do RN – CAERN e para a preparação de algumas soluções específicas foi utilizada água destilada de grau 1, sendo caracterizada pela sua alta pureza e condutividade elétrica máxima de 0,1 μ S/cm a 25°C.

3.1.6 Aço

Na produção dos corpos de prova de concreto armado para medição do potencial de corrosão foram utilizadas 180 barras de aço CA-50 com superfície rugosa de diâmetro de 10mm e comprimento variável de 150mm e 165mm fabricadas pela GERDAU.

Todas barras antes de serem utilizadas na moldagem dos concretos armados foram submetidas a um processo de limpeza para retirada do filme de óxidos presente em sua superfície. Este procedimento foi adotado como uma tentativa de padronização da condição superficial inicial das barras utilizadas. A Figura 3.3 ilustra a situação da barra de aço antes e após o procedimento de limpeza.



Figura 3.3 - Barras de aço antes e após o procedimento de limpeza.

O procedimento de limpeza foi realizado no laboratório de Durabilidade e Química dos Materiais do IFRN e foi dividido em duas etapas. A primeira chamada de decapagem química foi executada com base nas recomendações explícitas na norma ASTM G-1/03: 1999 (*“Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens”*).

A segunda etapa, chamada decapagem mecânica, foi realizada para assegurar a total retirada dos óxidos que pudessem ter ficado após a primeira etapa. Consistiu na escovação mecânica das barras através de uma escova metálica rotativa de 75mm de diâmetro engatada em uma furadeira BOSCH de 750W até que as barras ficassem com o aspecto de aço branco. Ao concluir o processo de limpeza, as barras ficavam armazenadas em um dessecador até o momento da moldagem dos corpos de prova. Segue abaixo, detalhadamente, o procedimento de limpeza realizado nas barras:

- Imersão das barras em uma solução de ácido clorídrico em água destilada 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina ($C_6H_{12}N_4$) por quinze minutos para a remoção dos óxidos presentes, sem atacar o metal (Figura 3.4a);
- Lavagem e escovação das barras de aço em água corrente com a utilização de uma escova com cerdas plásticas para remoção final dos óxidos (Figura 3.4b);

- Escovação e enxague das barras com água destilada de grau 1 (Figura 3.4c);
- Imersão das barras em acetona (C_3H_6O) por dois minutos para retirada de elementos gordurosos e facilitar a evaporação da água (Figura 3.4d);
- Secagem das barras com jato de ar quente (Figura 3.4e);
- Escovação das barras com escova metálica rotativa de 75mm acoplada em uma furadeira (Figura 3.4f) e;
- Armazenamento à vácuo das barras em um dessecador até o momento da concretagem dos corpos de prova (Figura 3.4g).

A Figura 3.4 ilustra o procedimento de limpeza realizado nas barras metálicas.



Figura 3.4 – Procedimento de limpeza das barras metálicas.

Além disso, durante e após a limpeza das barras, até a imersão dos corpos de prova de concreto armado, elas foram manuseadas somente com a

utilização de luvas plásticas descartáveis, com a finalidade de impedir qualquer tipo de contaminação que invalidasse os procedimentos realizados.

3.1.7 Reagentes e soluções químicas utilizados nos ensaios

Para realização de alguns ensaios e preparação dos ciclos de agressão foram utilizadas algumas soluções químicas descritas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Informações das soluções químicas utilizadas.

Utilização	Solução química
Índice de atividade pozolânica	Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de padrão analítico (PA)
Limpeza das barras metálicas	Solução de ácido clorídrico de padrão analítico (HCl) 1:1 com 3,5 g/l de hexametilenotetramina ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$)
	Água destilada de grau 1
	Acetona ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) de padrão analítico
Proteção do aço exposto nas amostras de concreto armado	graxa branca à base de lítio, comercialmente chamada de graxa náutica.
Limpeza das barras de aço antes do ensaio de potencial de corrosão	Desengordurante de cozinha – Princípio ativo: Álcool etoxilado, solvente (Dipropileno glicol n-butil éter), tensoativo aniônico (Laurato de sódio), 1,2 Benzotiazolin-3-ona, atenuador de espuma, agente de Controle de pH, corante, fragrância e água
Ciclo de agressão de CO_2	Dióxido de carbono de alta pureza armazenado sob pressão em cilindro de 25 kg (Concentração da fase líquida: 99,99%)
Controle de umidade da câmara de CO_2	Sílica gel azul com indicador de umidade, esferas de 4,0 mm a 8,0 mm
Ensaio de profundidade de CO_2	Indicador de pH com fenolftaleína: 2g de fenolftaleína PA ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) + 120 ml de álcool etílico PA ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) + 80 ml de água destilada
ciclo de agressão Cl^-	Solução salina com C=15%: 18,75kg de NaCl comercial (sal de cozinha) + 100 kg de água da torneira
Ensaio de profundidade de Cl^- e difusão de cloreto	Solução de nitrato de prata 0,1M: 5,1 g Nitrato de prata PA (AgNO_3) + 300 ml de água destilada
Ensaio de difusão de cloreto	Solução saturada de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$: dissolução de hidróxido de cálcio em água destilada até a presença de corpo de fundo
	Solução anódica: 12g de hidróxido de sódio PA (NaOH) + 1000g de água destilada
	Solução catódica: 1 kg de NaCl comercial + 9kg de água natural

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Espectrometria por fluorescência de raios X – FRX

O FRX é uma técnica de caracterização química microestrutura usada na determinação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos que compõem a amostra. Foi realizado o FRX no cimento, metacaulim e RBC.

Para realização do FRX utilizou-se o equipamento da marca Shimadzu modelo EDX-720, onde os espectros de fluorescência de raios X foram obtidos a partir de, aproximadamente, 300mg de amostra em pó fino depositado em um porta-amostra formado por um filme plástico de polietileno, que apresenta baixa absorção de raios X na faixa de energia de interesse. Sendo este realizado no laboratório de caracterização estrutural dos materiais-LACEM do departamento de Engenharia dos Materiais da UFRN.

3.2.2 Determinação da área superficial (Método BET)

A área superficial é uma propriedade dos finos importante para o estudo dos concretos autoadensáveis, visto a contribuição no entendimento de parâmetros físico-químicos que influenciam nas propriedades do concreto no estado fluido, como a viscosidade, e, no estado endurecido, exerce influência na compacidade da mistura. Além disso, nos materiais pozolânicos, essa propriedade está ligada com a sua reatividade, sendo maior quanto mais fino for o material.

Foi realizado o ensaio de determinação de área superficial pelo método de Brunauer, Emmett e Teller (BET) apenas do cimento, metacaulim e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar. Este consiste na determinação do volume de gás adsorvido pelo material que relacionado através de equações é fornecido a superfície específica do material.

As áreas superficiais destes materiais foram analisadas em um equipamento de modelo BELSORP II-MINI da marca BEL JAPAN através de adsorção/dessorção de nitrogênio a 77K. As amostras passaram por um tratamento térmico inicial a 200 °C por duas horas, em fluxo de nitrogênio, para remoção de possíveis gases adsorvidos nas amostras. Estas análises foram

realizadas no Laboratório de Caracterização e Desenvolvimento de Nanomateriais (LANANO) – IFPB, campus João Pessoa.

3.2.3 Atividade pozolânica das adições minerais

A análise da atividade pozolânica do metacaulim e do RBC utilizados neste estudo é um importante parâmetro para se entender a contribuição dada pelas adições minerais no comportamento dos concretos no estado endurecido.

O ensaio de atividade pozolânica foi feito conforme a NBR 5751 (ABNT, 2012), onde foram produzidas argamassas compostas de uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), nove partes de areia normalizada (ABNT NBR 7214, 2015) e mais uma quantidade de material pozolânico, que corresponde ao dobro do volume de hidróxido de cálcio. A partir do valor médio de resistência à compressão aos 7 dias de três corpos de prova determina-se o índice de atividade pozolânica (IAP). Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da DIACON – IFRN Campus Natal Central.

3.2.4 Análise da composição granulométrica

Os materiais caracterizados quanto à granulometria são: cimento, metacaulim e RBC, chamados no fluxograma de materiais finos, e os agregados miúdos e graúdos.

Os materiais finos, devido ao pequeno tamanho das partículas, foram caracterizados a partir de granulometria à laser. Foram separados aproximadamente dez gramas de material, seco em estufa, e realizado o ensaio. O equipamento utilizado foi o CILAS 1090, com faixa de leitura entre 0,1 μm a 500 μm dividido em 100 classes, por via seca, no Laboratório de Materiais Metálicos da Universidade Federal da Paraíba - UFPB.

As granulometrias dos agregados foram realizadas no laboratório de Durabilidade e Química dos materiais do IFRN a partir de peneiramento manual baseado na normativa NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2.5 Massa específica

Para determinação das massas específicas do cimento e das adições minerais os ensaios seguiram as diretrizes da NBR NM 23 (ABNT, 2001). As

massas específicas do agregado miúdo foram obtidas mediante a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009). As massas específicas real e aparente do agregado graúdo foram determinadas conforme os ensaios previstos na NBR NM 53 (ABNT, 2009). Todos os ensaios foram realizados no laboratório de Durabilidade e Química dos materiais do IFRN.

3.2.6 Determinação do índice de finura

Foram realizados os ensaios de finura do cimento, metacaulim e RBC através do método explicitado na NBR 11579 (ABNT,2013) que determina a finura do material a partir da peneira de abertura de 75 μm . Este ensaio foi realizado no laboratório de Durabilidade e Química dos materiais do IFRN.

3.3 Definição dos traços

A escolha da composição referência foi baseada em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa como Medeiros (2016), Fonseca (2016) e Diniz (2018) variando as adições minerais que substituíram o cimento e a porcentagem de substituição. Nesses trabalhos, as reduções de cimento chegaram a 60%, mantendo-se resistências acima de 35 MPa aos 91 dias, sendo tal desempenho aplicável às estruturas de concreto armado. Optou-se nesta pesquisa, partir desse pressuposto, e produzir concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento, avaliando-se o efeito da redução do cimento de até 50%. Para tanto, definiu-se um traço referência de concreto autoadensável apenas com cimento (REF), com consumo aproximado de 450 kg/m³.

A redução do teor de cimento foi realizada em misturas binárias e terciárias, através da substituição em massa do cimento (CIM) pelas adições minerais em estudo: metacaulim (MK) e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC). Os traços com as respectivas porcentagens de substituição do cimento pelas adições e as proporções dos agregados e da água estão apresentados na Tabela 3.4.

Foram produzidos e analisados cinco traços: o primeiro, somente com o cimento como ligante, denominado traço referência, e os demais com substituições de 30%, 40% e 50% do cimento por adições minerais. Com a finalidade de se conhecer a influência apenas do RBC nos concretos optou-se

por produzir um traço com substituição de 30% utilizando apenas este tipo de adição mineral como substituto do cimento.

Tabela 3.4 - Composição dos traços em estudo.

Traços	finos (f)			Areia	Brita	Água/finos
	CIM	RBC	MK			
REF	100%	-	-	1,64	2,16	0,48
R30	70%	30%	-	1,64	2,16	0,48
R20M20	60%	20%	20%	1,64	2,16	0,48
R30M10	60%	30%	10%	1,64	2,16	0,48
R30M20	50%	30%	20%	1,64	2,16	0,48

Após a definição das porcentagens de substituição de cada traço, os consumos de materiais, em kg/m³, foram calculados de acordo com as massas específicas dos respectivos materiais utilizados conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Consumo e parâmetros das misturas realizadas.

Traços		REF	R30	R20M20	R30M10	R30M20
Consumo (kg/m ³)	CIM	444,13	303,57	260,99	259,68	215,74
	RBC	0,00	130,54	86,91	129,84	129,44
	MK	0,00	0,00	86,91	43,37	86,30
	AM	728,37	710,36	712,50	708,93	707,62
	AG	959,32	938,03	939,56	934,85	931,99
	ÁGUA	213,18	208,25	208,79	207,74	207,11
	Adit. SP	2,31	5,77	13,04	13,81	14,12
Parâmetros	% (adit. SP) sobre finos	0,52%	1,33%	3,00%	3,19%	3,27%
	Fator água/finos (a/f)	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
	Finos (kg/m ³)	444,13	434,11	434,81	432,89	431,48
	Pasta (litros/m ³)	355,95	370,94	369,55	372,70	374,30
	Teor de argamassa seca (%)	55%	55%	55%	55%	55%
	(AM + AG) / finos	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80

* CIM – cimento; MK – metacaulim; RBC – resíduo da biomassa da cana-de-açúcar; AM – agregado miúdo; AG – agregado graúdo; adit. SP – aditivo superplastificante

Todos os traços apresentam o mesmo fator água/finos igual a 0,48. Optou-se por tornar constante a quantidade de água dos traços sem prejudicar

as características de autoadensabilidade do concreto, bem como para este não ser um fator influente nas análises. Por essa mesma razão, também se optou por não variar o teor de argamassa e a relação agregados/finos. Por sua vez, o volume de pasta e a quantidade de finos varia de acordo com o teor de adições e suas respectivas massas específicas.

Com a fixação da relação água/finos dos traços, a quantidade de aditivo superplastificante foi definida possibilitando-se produzir concretos autoadensáveis com as mesmas características de espalhamento (*slump flow*) do traço de referência e, conseqüentemente, a mesma classificação em SF2 de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT,2017). Para alcançar a quantidade certa de aditivo de cada traço, foi feita uma mistura de teste com apenas 8 litros de concreto na qual avaliou-se apenas o *slump flow* e foram feitos os ajustes necessários para alcançar as características requeridas.

3.4 Preparo da mistura e moldagem das amostras

O processo de mistura é baseado no trabalho de Celik *et al.* (2014) e Diniz (2018). Todas as misturas foram realizadas no anexo lateral da diretoria de construção civil - DIACON do IFRN Campus Natal Central.

A produção dos concretos autoadensáveis iniciou-se com a pesagem dos materiais referente ao volume total necessário do traço dividido por quatro betonadas. Essa necessidade de divisão ocorreu em função da capacidade da betoneira suportar, aproximadamente, 30 litros por vez, totalizando, aproximadamente, 120 litros de concreto por composição, necessário para a realização dos ensaios no estado fresco e moldagem dos corpos de prova dos ensaios no estado endurecido. Após a pesagem, a parte interna da betoneira foi umedecida e, posteriormente, iniciou-se o procedimento de mistura. A cada betonada de 30 litros, a betoneira era lavada para iniciar a próxima mistura.

Com o intuito de obter melhor ligação entre os materiais, garantir que todos estes formassem uma matriz homogênea e que os traços tivessem o mesmo modo de mistura utilizou-se a sequência de inserção dos materiais na betoneira descrita na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Sequência da colocação dos materiais da mistura na betoneira.

Sequência de mistura na betoneira		
Ordem	Materiais e teores	Tempo
1º	Agregado graúdo + 30% da água	30 seg
2º	50% da areia + 20% da água	30 seg
3º	Cimento + 50% da areia + 40% da água	2 min
4º	50% do Aditivo	2 min
5º	RBC e/ou MK + 10% da água + 50% do aditivo	3 min

Cada betonada teve duração de, aproximadamente, nove minutos e foi realizado em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 150 litros com motor de potência de 1CV. Durante o processo de mistura, houve paradas no funcionamento da betoneira para raspagem do fundo possibilitando a remoção das partículas finas que pudessem ter ficado aderidas nas paredes da betoneira.

Devido a particularidade dos testes discutidos neste trabalho, foram moldados três diferentes tipos de corpos de prova:

3.4.1 Cubo de concreto – Corpo de prova TIPO A

Para realizar o ensaio de carbonatação através da medida da profundidade de penetração de CO₂ e o ensaio de profundidade de cloreto, ocorrido devido aos ciclos de agressividade, foram moldadas 12 amostras de concreto por traço.

As formas para a moldagem dos corpos de prova possuem formato cúbico com arestas de 10 cm, fabricada em acrílico transparente. O procedimento de moldagem consistiu em apenas verter o concreto autoadensável nas formas acrílicas e depois passar uma régua biselada, para dar um melhor acabamento na superfície. O adensamento do concreto foi dispensado devido a sua característica de autoadensabilidade.

3.4.2 Cubo de concreto armado – Corpo de prova TIPO B

Para realizar o ensaio de potencial de corrosão foram moldados 9 corpos de prova prismáticos de concreto armado com aresta de 15,0 cm para cada mistura.

A armação dos cubos é composta por quatro barras de aço CA-50 com diâmetro de 10mm e com comprimentos variados de 150 mm e 165 mm, posicionadas com espessuras de cobrimento de concreto iguais a 30 mm e 15 mm nas Faces 1 e 2, respectivamente. Além disso, para ser possível o contato direto no aço, fundamental para a realização do ensaio de potencial de corrosão, foi deixado 30mm de aço sobressaindo na face superior de cada amostra, como mostrado na representação esquemática na Figura 3.5.

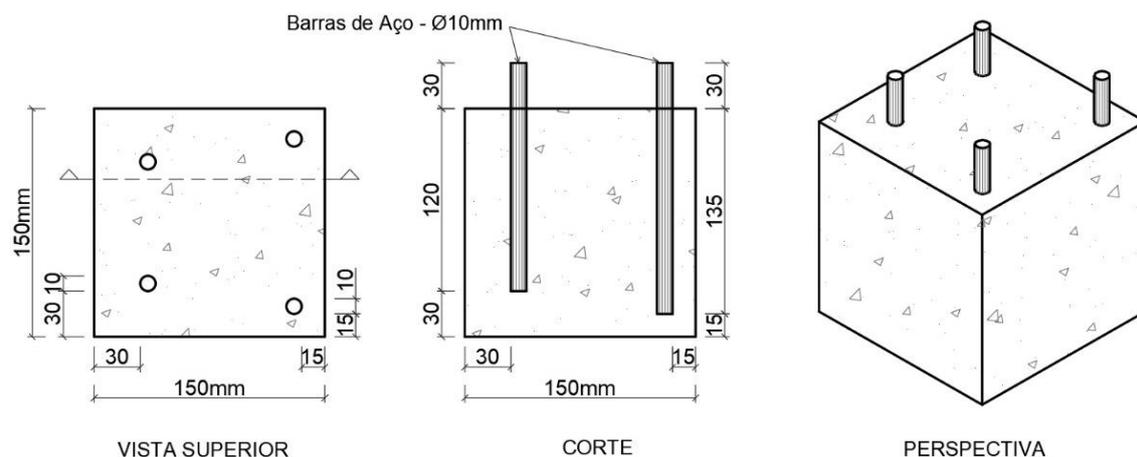


Figura 3.5 – Detalhamento das medidas do corpo de prova cúbico de concreto armado para ensaio de potencial de corrosão.

O cobrimento de 15 mm foi escolhido para simular edifícios que não cumprem a cobertura mínima estabelecida em projetos estruturais de concreto armado submetidos a ambientes de agressividade média, mas que ainda fazem parte da realidade de muitos edifícios operacionais. Por outro lado, a cobertura de concreto de 30 mm foi escolhida para simular pilares e vigas em atmosfera marinha em um ambiente interno e protegido de acordo com classe de agressividade II da NBR 6118 (ABNT,2014) (MEDEIROS *et al.*, 2017).

Para facilitar a desmoldagem e manuseio dos corpos de prova optou-se por fabricar as formas em madeirite plastificado de espessura de 18mm, travadas com parafusos de rosca infinita. Cada forma possui capacidade de moldar dois cubos por vez, como ilustrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Forma de madeira para produção dos cubos de concretos armados.

Antes de iniciar a moldagem, com a finalidade de evitar danos às fôrmas, bem como facilitar na retirada da amostra, foi passado desmoldante indicado para uso em superfícies de madeira. A moldagem foi feita de modo que o topo do corpo de prova com as barras de aço sobressalientes ficassem para baixo presas nos orifícios da fôrma.

O processo de moldagem está representado na Figura 3.7. Inicialmente, as barras são fixadas nos orifícios das fôrmas localizados com o espaçamento adequado para o estudo (Figura 3.7a), depois preenche-se até a metade com o CAA (Figura 3.7b), em seguida, para assegurar que as barras ficassem posicionadas com o cobrimento requerido, foram utilizados espaçadores plásticos para a melhor alocação das barras de aço (Figura 3.7c e Figura 3.7d), após a colocação do concreto até o topo das barras, os espaçadores são removidos e, por fim, é acrescentado mais concreto até completar a forma (Figura 3.7e).

Todo o manuseio de preparação e moldagem desse tipo de corpo de prova foi feito com luvas plásticas descartáveis para evitar o contato direto das barras de aço com as mãos que pudesse prejudicar a situação de limpeza destas.

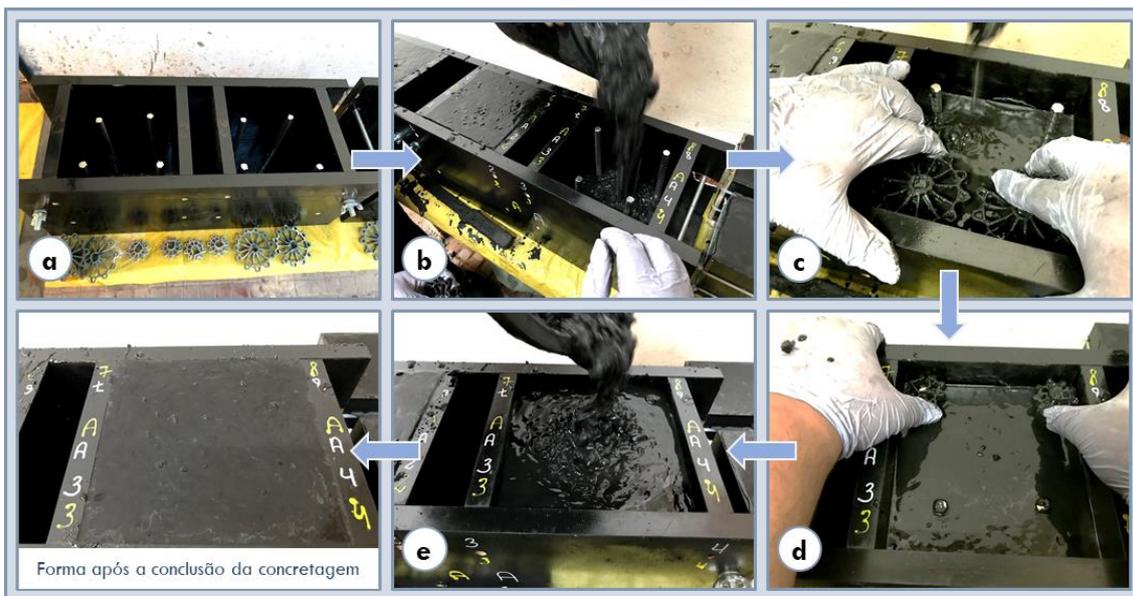


Figura 3.7 - Detalhamento do processo de moldagem dos cubos armados.

A Figura 3.8 mostra a área das barras de aço que ficaram expostas ao meio ambiente sendo protegida com graxa branca à base de lítio, indicada para uso náutico e para situações que exijam uma maior proteção contra corrosão. Este procedimento foi realizado após a demoldagem e antes de iniciar a cura das amostras. A graxa era retirada para a realização do ensaio de potencial de corrosão nas datas estabelecidas. Após o término do ensaio, a graxa era colocada novamente para viabilizar o uso dos mesmos corpos de prova nas análises futuras. Esse processo se repetiu até concluir os nove ciclos de agressividade propostos nesse trabalho.



Figura 3.8 - Aplicação de graxa náutica para proteção na parte exposta das barras de aço.

3.4.3 Cilindro – corpo de prova TIPO C

Para realizar os demais ensaios no estado endurecido, descritos no fluxograma de ensaios (Figura 3.1), foram moldados 48 corpos de prova cilíndricos com altura de 200mm e diâmetro de 100mm, embasado na NBR 5739 (ABNT,2007), porém sem a necessidade do adensamento. Durante a moldagem, o concreto autoadensável apenas era despejado dentro das fôrmas metálicas cilíndricas e depois realizado o acabamento na superfície com régua biselada.

3.5 Propriedades do concreto autoadensável no estado fresco

A principal diferença entre o concreto autoadensável e o concreto normalmente vibrado são as características no estado fresco. Com a finalidade de comprovar a autoadensabilidade dos concretos em estudo, foram realizados uma série de ensaios normatizados em território nacional. Os ensaios foram realizados no anexo lateral da diretoria de construção civil - DIACON do IFRN Campus Natal Central, logo após o término do procedimento de mistura.

3.5.1 Espalhamento, tempo de escoamento T_{500} e Índice de estabilidade visual

O *slump flow test*, normatizado pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017), é considerado o ensaio fundamental para concretos autoadensáveis, pois a partir dele pode-se avaliar a capacidade de fluxo. Analisa-se o espalhamento caracterizado pelo diâmetro, expresso em milímetros (mm), do círculo formado após a estabilização do concreto quando retirado o tronco de cone, chamado de *slump flow* (SF).

Também foi medido o tempo de escoamento necessário para, após a retirada do tronco de cone, preencher um círculo de 500 mm de diâmetro, sendo o tempo obtido um parâmetro da viscosidade do CAA chamado de T_{500} e apresentado em segundos.

Um outro parâmetro determinado pelo ensaio de espalhamento é feito a partir de uma análise visual. Consiste em verificar a presença predominante ou não de agregados nas bordas da circunferência do concreto e assim determinar o índice de estabilidade visual (IEV), utilizando como utensílio de caracterização um gabarito disponível em norma para as diferentes situações, como mostrado

na Figura 3.9. Através da análise da figura, nota-se que o índice de estabilidade visual “IEV 0” apresenta a melhor situação de uniformização da mistura, sendo, portanto, a condição ideal.

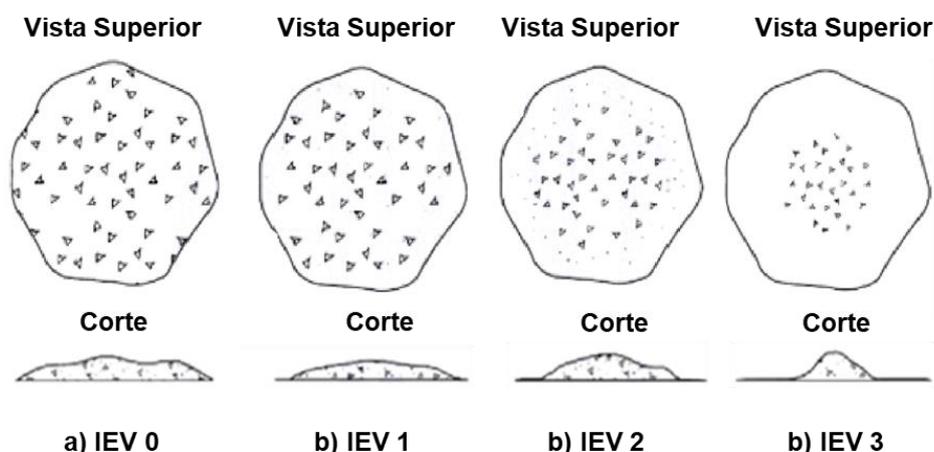


Figura 3.9 – Classes do índice de estabilidade visual (adaptado da NBR 15823-2, ABNT 2017).

3.5.2 Habilidade passante – Método do Anel J

Este ensaio é semelhante ao *slump flow test*, porém com a presença de obstáculos de modo a permitir a simulação da armação em formas de concreto armado. Possui o objetivo de medir a habilidade passante do concreto em fluxo aberto e é normatizado pela NBR 15823-3 (ABNT, 2017). Esse ensaio é representado pelo PJ que é o valor referente à diferença entre o diâmetro médio de espalhamento obtido com e sem a utilização do anel J, expressa em milímetros (mm).

3.5.3 Habilidade passante – Método da caixa L

Assim como o método do anel J, o método da caixa L também mede a habilidade passante com a diferença do concreto escoar em fluxo confinado. Este ensaio é normatizado pela NBR 15823-4 (ABNT, 2017) e consiste numa câmara com parte de trecho vertical e outra horizontal, em formato de L, que possui 3 barras de aço como obstáculos por onde o concreto deve escoar. A habilidade Passante (HP) é uma medida adimensional determinada através da razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da câmara horizontal.

3.5.4 Determinação da viscosidade – Método do funil V

O ensaio do funil em V é realizado seguindo os parâmetros da NBR 15823-5 (ABNT, 2017), para avaliar a capacidade de preenchimento e a viscosidade do CAA. O método propicia analisar a velocidade de passagem e a habilidade passante do concreto por um funil em forma de V. O resultado encontrado refere-se ao tempo em segundos da passagem total do concreto.

3.6 Propriedades do concreto autoadensável no estado endurecido

Com a finalidade de se investigar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos, foram moldados por mistura: 12 corpos de prova cúbicos do tipo A, 9 corpos de provas cúbicos do tipo B e 48 corpos de prova do tipo C. Esses corpos de prova foram distribuídos igualmente em três condições de exposição com diferentes formas de ataques.

3.6.1 Condições de exposição agressivas

Todas as amostras foram desmoldadas 24h após produzidas. Em seguida, foram colocadas em cura por imersão em água na temperatura de $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 28 dias. Durante esse período as amostras só eram retiradas da cura apenas para a realização dos ensaios previstos e, ao finalizar-se os ensaios, eram colocadas novamente na condição de cura submersa.

Após o período inicial de cura submersa por 28 dias, as amostras ficaram expostas ao ar até os 50 dias de idade. Posteriormente, as amostras foram submetidas a três condições de exposição agressivas com base no trabalho de Ye *et al.* (2016) que analisaram concretos submetidos à carbonatação e aos ciclos de molhagem e secagem com cloreto de forma independente e combinada.

Existem três processos distintos durante um ciclo completo de ataque acelerado. Primeiramente, independente da condição de exposição, todas as amostras foram secas superficialmente em estufa programada para $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante dois dias. Em seguida, foram colocados em uma das três situações de

ataque a depender da sua condição de exposição (I, II ou III). Cada ciclo de agressão se repetiu nove vezes até a conclusão do trabalho.

A Tabela 3.7 apresenta as três condições de exposição de agressão utilizada no decorrer da pesquisa. Especificamente, três amostras de cada traço foram submetidas apenas a quatro dias em carbonatação e depois ficaram expostos ao ar natural, aguardando as datas de ensaio em ambiente laboratorial (condição de exposição I – CE-I). Outras três amostras foram submetidas à carbonatação por quatro dias e ciclos de imersão em água salina por mais quatro dias (condição de exposição II – CE-II). E mais três amostras foram submetidas apenas ao ataque por íons cloreto através da imersão em água salina durante quatro dias e depois ficaram expostas ao ar natural por mais quatro dias (condição de exposição III – CE-III).

Tabela 3.7 - Detalhamento das condições de exposição estudadas.

Procedimento experimental para um ciclo de teste				
Tempo de exposição		2 dias	4 dias	4 dias
Condição de exposição	CE- I (CO ₂)	Secagem em estufa a 60°C	Carbonatação acelerada	Exposição ao ar
	CE- II (CO ₂ + Cl ⁻)		Carbonatação acelerada	Imersão em solução de NaCl a 15%
	CE – III (Cl ⁻)		Imersão em solução de NaCl a 15%	Exposição ao ar

A exposição ao CO₂ foi realizada em uma câmara de carbonatação acelerada, programada para uma concentração de CO₂ de, aproximadamente, 10%. Ye *et al.* (2016) indicam utilizar uma concentração de 20% de dióxido de carbono, porém esta condição não foi obedecida pois os sensores da câmara de carbonatação utilizada nessa pesquisa possuem capacidade de leitura de até 10% de concentração de gás carbônico.

O equipamento utilizado foi a câmara de carbonatação acelerada programada para uma concentração de CO₂ de 10±2%, temperatura de 25±5 °C e 55±5 % de umidade relativa. Para manter esse nível de umidade utilizou-se no interior da câmara pérolas de sílica gel azul reutilizáveis que, quando úmidas, ficavam rosas indicando a necessidade de secagem para continuar o uso, daí eram secas em estufa e estavam prontas para serem reutilizadas.

Para possibilitar o controle da umidade e temperatura, a câmara foi implementada com a instalação de sensores no interior da câmara com ligação para um visor externo. Tanto o controle quanto a utilização da sílica gel fizeram-se necessários pois os sensores de CO₂ tinham o funcionamento limitado a uma faixa de umidade compreendida entre 0% e 80%. A Figura 3.10 apresenta os detalhes da câmara de carbonatação utilizada.

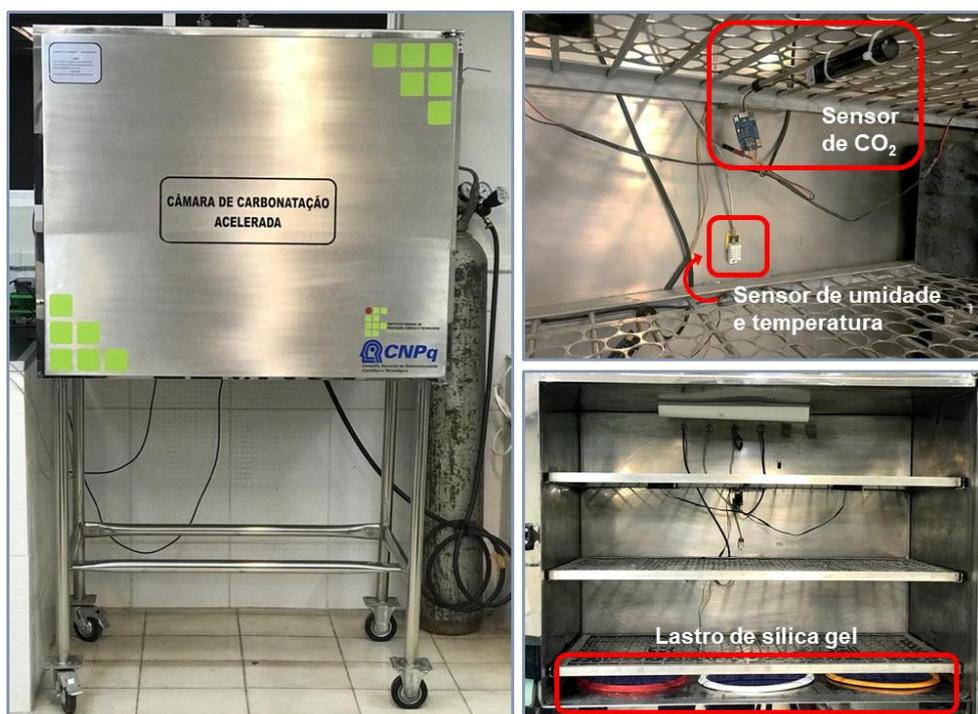


Figura 3.10 – Câmara de carbonatação utilizada com detalhamento do interior.

Além disso, estudos mostram que a taxa de umidade influencia na carbonatação. O processo de carbonatação requer a presença de água porque o CO₂ se dissolve na água formando ácido carbônico (H₂CO₃). Se o concreto estiver muito seco (UR < 40%), o CO₂ não pode se dissolver e não ocorre a carbonatação. Se, por outro lado, estiver muito úmido (UR > 90%), o CO₂ não poderá entrar, logo o concreto não será carbonatado. Condições ótimas para carbonatação ocorrem a uma UR aproximada de 50% (RUIXIA, 2010).

Por sua vez, a temperatura também influencia na carbonatação. À medida que a temperatura ambiente aumenta, a taxa de reação de carbonatação de concreto aumenta. Com o aumento da temperatura, o espalhamento de moléculas de CO₂ na solução de concreto poroso, a migração dos materiais que podem ser carbonizados e as reações químicas aceleram (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2011).

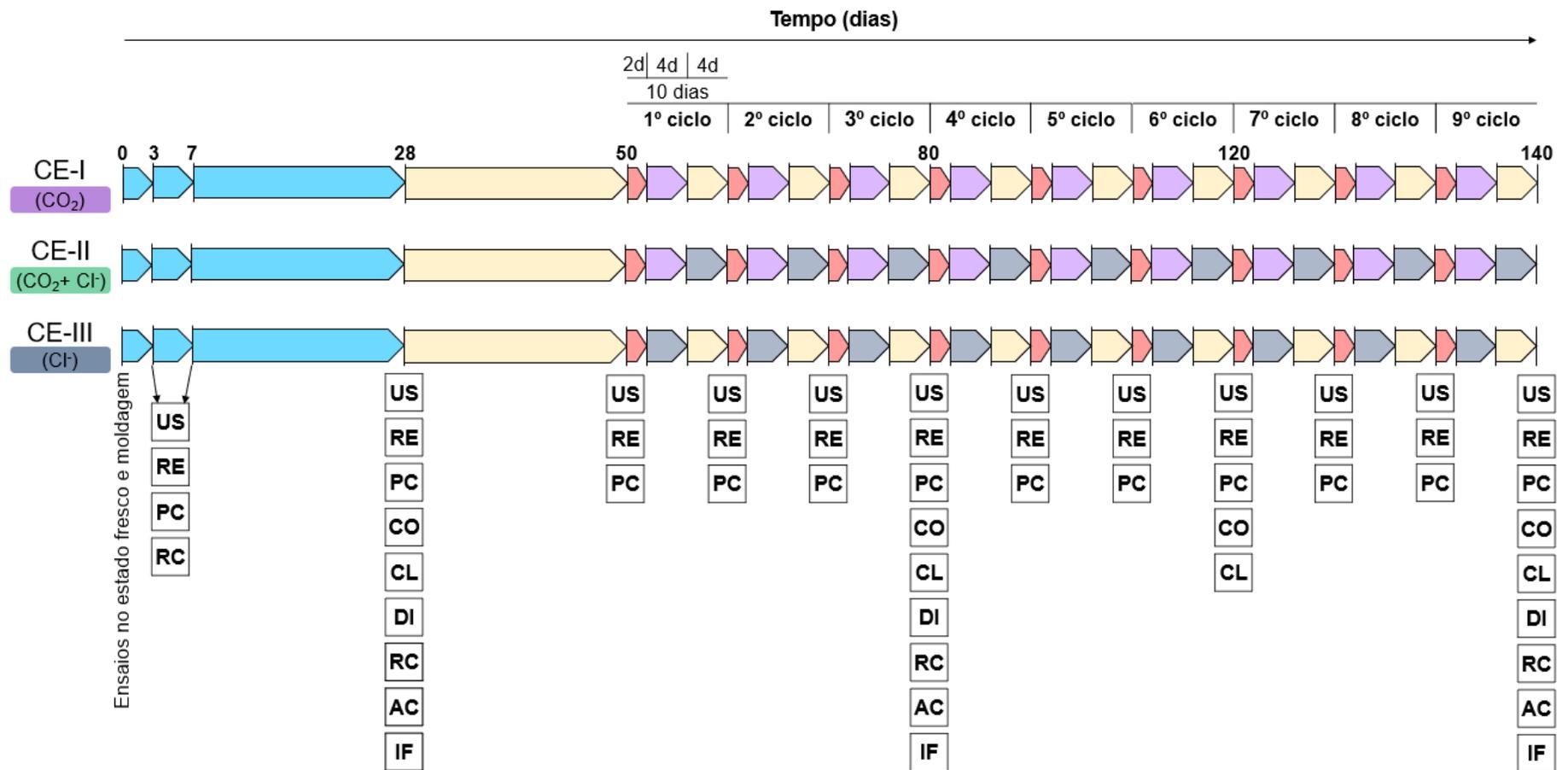
Na exposição de ataque por íons cloreto, as amostras ficaram imersas em um recipiente plástico com solução altamente concentrada de NaCl a 15% (18,75kg de NaCl comercial + 100 kg de água da torneira) durante quatro dias, como mostra a Figura 3.11. A troca da solução salina foi feita a cada 10 dias para garantir a quantidade de cloreto livre entre as trocas de ciclos. No outro tipo de situação, exposição ao ar natural, as amostras ficaram em ambiente laboratorial com temperatura de 25 ± 5 °C.



Figura 3.11 - Recipiente com os corpos de prova imersos na solução salina.

Para definição das datas de realização dos ensaios, os testes no estado endurecido foram divididos em duas categorias de ensaios: não destrutivos e destrutivos. Os ensaios não destrutivos foram realizados nas idades iniciais no período de cura submersa, aos 3, 7 e 28 dias, após terem ficados 22 dias expostos ao ar em ambiente laboratorial até o início dos ciclos agressivos, aos 50 dias, e ao final de cada ciclo (isto é, um ciclo é como indicado na Tabela 3.2). Por outro lado, os ensaios mecânicos destrutivos foram realizados também nas idades iniciais, aos 3, 7 e 28 dias, e, posteriormente, apenas após o terceiro e último ciclo de exposição agressiva, mais precisamente aos 80 e 140 dias de moldagem.

Essas condições altamente severas foram necessárias para haver a possibilidade de detecção de corrosão das armaduras nas amostras ensaiadas e assim poder comparar a influência das adições. A Figura 3.12 representa um esquema resumo com todos os ensaios que foram realizados nos concretos autoadensáveis em estudo e suas respectivas idades de acordo com o ciclo de agressão submetido.



TIPO DE AMBIENTE:

- Cura por imersão em água (Temp. 25±5 °C)
- Exposição ao ar livre (Temp. 25 ± 5 °C)
- Secagem em estufa (Temp. 60 ± 5 °C)
- Imersão em água salina (Conc. de NaCl 15%)
- Câmara de carbonatação acelerada (Conc. De CO₂ 10 ± 2% | Temp. 25 ± 5 °C | Umid. 55 ± 5%)

ENSAIO REALIZADO:

- US Velocidade de Pulso ultrassônico
- RE Resistividade elétrica
- PC Potencial de corrosão
- CO Profundidade de penetração de carbonatação
- CL Profundidade de penetração de cloreto
- DI Difusão de íons cloreto
- RC Resistência à compressão axial
- AC Absorção por capilaridade
- IF Índices físicos (Absorção por imersão | Índice de vazios | Massas específicas real, seca e saturada)

Figura 3.12 - Fluxograma dos ensaios e ciclos realizados.

3.6.2 Penetração de CO₂ através de método acelerado

Para este ensaio foram utilizados corpos de prova cúbicos com 10cm de aresta para todas as composições estudadas. Esses corpos de prova foram submetidos à cura submersa em água por 28 dias e depois foram colocados numa estufa a 60°C durante dois dias.

Após tal procedimento, as amostras tiveram quatro faces seladas com tinta à base de poliuretano acrílico alifático, em 3 demãos, deixando apenas duas faces opostas livres, para que a carbonatação ocorresse exclusivamente nesse sentido. Durante a pintura, as duas faces que não receberam a tinta foram protegidas com fita adesiva e, após secagem da tinta, essas fitas foram removidas como ilustrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Processo de pintura para selagem das quatro faces do cubo de concreto.

Não foi utilizado parafina para a selagem das laterais, como acontece na maioria dos trabalhos desse tipo, devido à secagem dos corpos de prova entre os ciclos ser realizada em estufa a 60°C. Caso tivesse sido utilizado tal temperatura, a parafina entraria em fusão, visto que o seu ponto de fusão está compreendido entre 58°C e 62°C.

Devido ao trabalho conter ciclos que envolvem carbonatação e imersão em cloreto de modo interligado, metade do cubo foi utilizado para a medida de profundidade de carbonatação e a outra metade aproveitada para medir a penetração de cloreto.

O procedimento de execução na câmara de carbonatação e posterior leitura de penetração de CO₂ é realizado conforme ilustrado na Figura 3.14. Depois de seladas, as amostras foram submetidas aos ciclos de exposição apresentados anteriormente na Tabela 3.7. Nas datas de ensaio apresentadas no fluxograma dos ensaios (Figura 3.12), a amostra foi rompida

transversalmente, no sentido do fluxo de CO_2 , numa prensa (Figura 3.14b). Sobre uma das metades é aspergido Fenolftaleína (Figura 3.14c), um indicador de pH, com ponto de viragem de 9,5. A fenolftaleína apresenta coloração róseo-avermelhada com valores de pH iguais ou superiores a 9,5 e incolor abaixo desse valor.

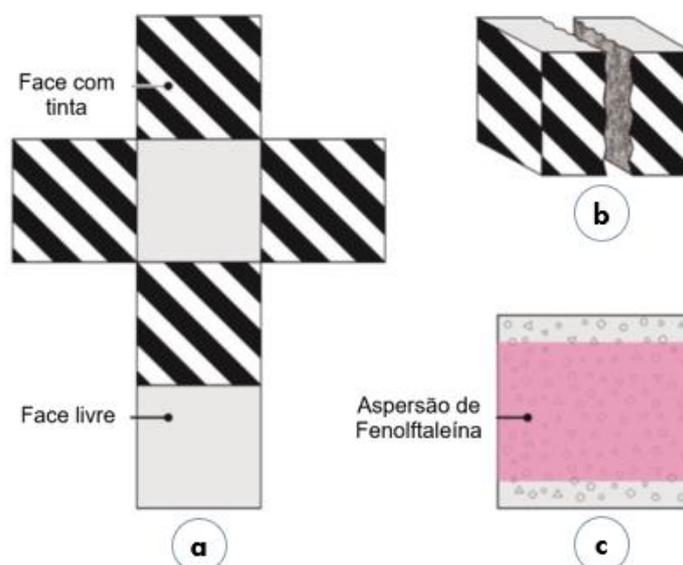


Figura 3.14 - Amostra submetida à carbonatação: a) faces livres e com proteção; b) sentido do corte de seção; c) aspersão de fenolftaleína. (Adaptado de DINIZ, 2018).

Após a aspersão da fenolftaleína, espera-se ocorrer a mudança de coloração e a substância secar. Posteriormente, perpendicularmente à frente de carbonatação, com auxílio de um paquímetro digital, realiza-se a medição da espessura que a solução ficou transparente sobre o concreto, caracterizando que naquela região houve a penetração de CO_2 . São realizadas quatro leituras em cada face carbonatada, num total de oito determinações por cubo. O resultado apresentado é a média das profundidades expressa em milímetros, representando qual a profundidade de CO_2 da amostra.

3.6.3 Penetração de cloreto por ciclo de molhagem e secagem

Devido à metodologia possuir ataque tanto por carbonatação quanto por cloreto, faz-se necessário identificar a quantidade de cloreto penetrado na amostra. Assim como o ensaio de penetração de CO_2 , foi realizado o ensaio de penetração de cloreto. Para tal, utilizou-se a outra metade do mesmo corpo de prova cúbico do ensaio anterior. Esse teste foi realizado nas datas apresentadas no fluxograma dos ensaios (Figura 3.12).

O ensaio consiste em aspergir uma solução de nitrato de prata ($0,1M$ $AgNO_3$) na superfície do concreto imediatamente após a ruptura. Com o indicativo da solução é possível observar, por processo colorimétrico, a frente de penetração dos íons cloreto através da precipitação de cloreto de prata ($AgCl$) sobre a região afetada. Tal precipitação de cloreto de prata forma uma região branca quando está úmida e arroxeadada após a secagem da solução, indicando onde houve a penetração do $NaCl$. A Figura 3.15 ilustra o momento da aplicação da solução.



Figura 3.15 - Aplicação da solução indicadora de nitrato de prata no ensaio de profundidade de cloreto.

3.6.4 Difusão de íons cloreto

A resistência à penetração de cloreto foi avaliada também pelo método rápido descrito na NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) e de acordo com a especificação E-463 (LNEC, 2004). Foi realizado nas datas previstas na Figura 3.12). Este procedimento permite a determinação do coeficiente de difusão dos íons cloreto na amostra de concreto autoadensável por meio do ensaio de migração em regime não estacionário. O fato deste ensaio ser acelerado por corrente elétrica possibilita determinar o coeficiente de difusão com até 72 horas de ensaio, dependendo apenas da qualidade do concreto que se deseja ensaiar.

Os provetes utilizados na realização deste ensaio têm uma seção de 50 ± 5 mm de altura com 100 ± 2 mm de diâmetro extraído do corpo de prova cilíndrico de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro; de cada corpo de prova é possível retirar 3 provetes, como mostrado na Figura 3.16. O corte foi realizado após as amostras completarem 28 dias e antes de iniciar os ciclos de agressão.

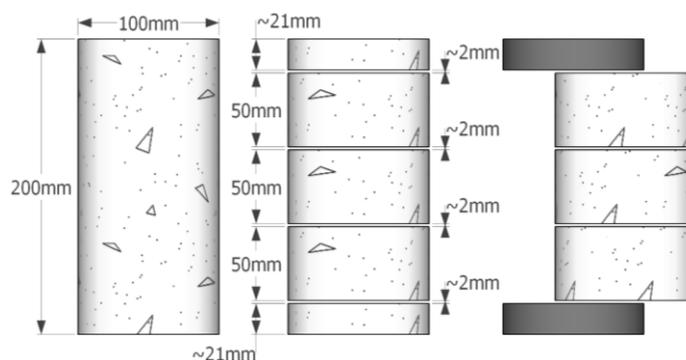


Figura 3.16 - Provete para realização do ensaio de difusão de cloreto.

Para o ensaio, a preparação do provetes se dá com o tratamento por vácuo e imersão em solução saturada de Ca(OH)_2 . Este procedimento tem o intuito de garantir que o ingresso de cloretos na amostra se dê predominantemente por difusão. De acordo com a padronização, é utilizado uma solução anódica (0,3M NaOH) e outra catódica (10% NaCl) e é aplicada inicialmente uma voltagem de 30V nos provetes; se necessário, é realizada uma correção da voltagem regida em norma de acordo com a quantidade de corrente passante. O esquema do ensaio de migração de cloreto está ilustrado na Figura 3.17.

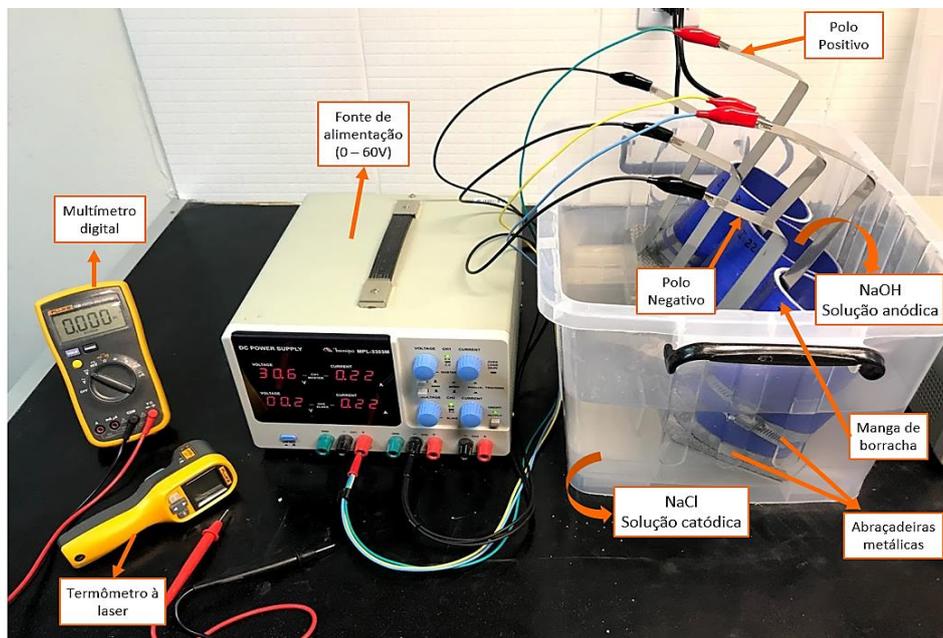


Figura 3.17 – Esquema do ensaio de migração de cloreto pelo método NT BUILD 492.

Assim como no ensaio de profundidade de cloretos, através da aspersão da solução de nitrato de prata (solução com 0,1M de AgNO_3) é possível observar, por processo colorimétrico, a frente de penetração dos íons cloreto através da

precipitação do cloreto de prata (AgCl) sobre a região afetada. A partir daí, mede-se a profundidade de penetração como mostrado na Figura 3.18.

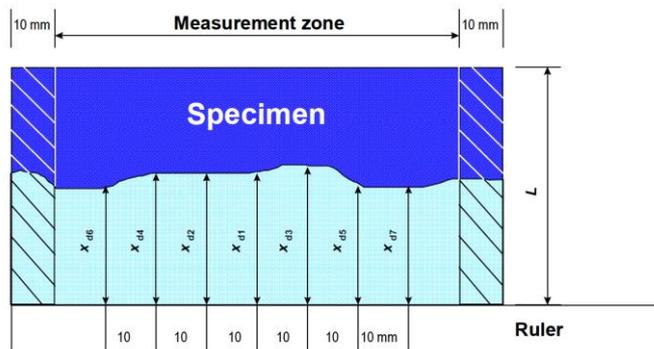


Figura 3.18 - Esquema da medição da profundidade de penetração. (NT BUILD 492 - NORDTEST METHOD, 1999).

Após todo o procedimento de ensaio, aplicam-se os valores obtidos na equação modificada Nernt-Planck (NORDTEST, 1999), equação 3.1; a partir daí determina-se o coeficiente de difusão do concreto analisado.

$$D = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (3.1)$$

Onde D é o coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$; U é o valor absoluto da voltagem aplicada em volts (V); T é o valor médio das temperaturas inicial e final no anólito em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$); L é a espessura do provete em milímetros (mm); x_d é o valor médio da profundidade de penetração em milímetros e t é a duração do ensaio em horas. O coeficiente de difusão foi obtido a partir da média de três provetes retirados de corpos de prova distintos e submetidos à mesma situação de exposição.

3.6.5 Resistência à compressão axial

Para esse ensaio foi utilizado uma prensa hidráulica Servo-controlada da marca CONTENCO, localizada no laboratório de materiais de construção do IFRN- Campus São Paulo do Potengi, com capacidade de 200 toneladas e regulada para uma velocidade de carga de 0,45 MPa/s, seguindo o procedimento da norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Com a finalidade de evitar picos de tensão provocados por alguma imperfeição nos topos do corpo de prova, esses foram retificados através de disco de corte diamantado em uma retífica de eixo horizontal. Foram rompidos três corpos de prova para cada idade de ensaio, 3,

7 e 28 dias e após o 3º e 9º ciclo de agressão. O resultado, em MPa, foi apresentado pela média dos três corpos de prova e o seu respectivo desvio padrão.

3.6.6 Velocidade de pulso ultrassônico (Ultrassom)

O método baseia-se na medição da velocidade de propagação no concreto de uma onda sonora num intervalo de frequências entre 20 a 300 KHz. Quanto maior a velocidade da onda ultrassônica, melhor é a qualidade do concreto. Esta técnica, apesar de possibilitar identificar características relativas à qualidade do concreto, não possibilita avaliar a evolução do estado corrosivo das armaduras (RIBEIRO *et al.*, 2014).

O aparelho utilizado na medida de velocidade de pulso ultrassônico foi o Pundit Lab+, da marca Proceq SA, com dois transdutores de ondas ultrassônicas 54 kHz e resolução de 0,1 μ s. Tal ensaio foi realizado no laboratório de Durabilidade e Química dos materiais do IFRN, campus Natal Central, consoante a NBR 8802 (ABNT, 2013). As amostras foram ensaiadas aos 3, 7 e 28 dias e após o final de cada ciclo de agressão, sendo o resultado representado pela média da leitura em três amostras cilíndricas com o desvio padrão.

Independente de qual condição de exposição estavam submetidos, antes da realização do ensaio, os corpos de prova ficaram submersos em água durante, aproximadamente, 3h objetivando a saturação superficial. Além disso, o aparelho era calibrado e, como recomendado, foi aplicado gel para ultrassonografia no contato dos transdutores com o corpo de prova, para melhorar o contato e evitar distorção dos resultados, conforme ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Realização do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.

A Tabela 3.8 apresenta faixas de valores de velocidade de pulso ultrassônico correspondentes à qualidade do concreto, de acordo com a norma técnica BS EN 12504-4 (British Standards, 2004).

Tabela 3.8 – Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico e a qualidade do concreto (adaptado de BS EN 12504-4).

Velocidade longitudinal da onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
$V < 2000$	Muito fraca
$2000 < V < 3000$	Fraca
$3000 < V < 3500$	Média
$3500 < V < 4000$	Boa
$4000 < V < 4500$	Muito boa
$V > 4500$	Excelente

3.6.7 Resistividade elétrica

A resistividade é uma propriedade do concreto que está relacionada à durabilidade, a qual indica a resistência à passagem de corrente elétrica, decorrente dos íons presentes na solução aquosa dos poros do concreto.

O ensaio foi realizado através do método dos quatro eletrodos com sonda Wenner, normalizado pela ASTM G57 (ASTM,2012) e RILEM TC 154 (VENNESLAND; RAUPACH; ANDRADE, 2007). O equipamento utilizado foi o Resipod da marca Proceq, modelo de espaçamento de 50 mm entre as sondas. Assim como no ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, antes da realização do ensaio de resistividade, o corpo de prova foi saturado superficialmente, ficando submerso em água durante, em média, 3 horas.

O valor da resistividade elétrica, em $k\Omega.cm$, foi obtido pela média da determinação em 3 amostras e para cada amostra foram realizadas quatro determinações. Os corpos de prova utilizados para esse ensaio foram os mesmos da velocidade de pulso ultrassônico.

Além disso, foi feita a classificação da probabilidade de corrosão a partir do resultado de resistividade. O boletim europeu CE - COST 509 (1997) apresenta alguns critérios de avaliação quanto à resistividade, que tem grande aceitação no meio técnico-científico (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 - Critérios de avaliação do concreto armado quanto a resistividade com relação ao risco de corrosão – COST 509 (RIBEIRO, 2014).

Resistividade do concreto ($k\Omega \cdot cm$)	Indicação de probabilidade de corrosão
≥ 100	Insignificante
50 a 100	Baixo
10 a 50	Moderado
< 10	Elevado

O ensaio de resistividade foi realizado nos corpos de prova cilíndricos aos 3, 7, 28 e 50 dias de idade do CAA e após a finalização de cada ciclo de agressão. O esquema de medição é representado na Figura 3.20.

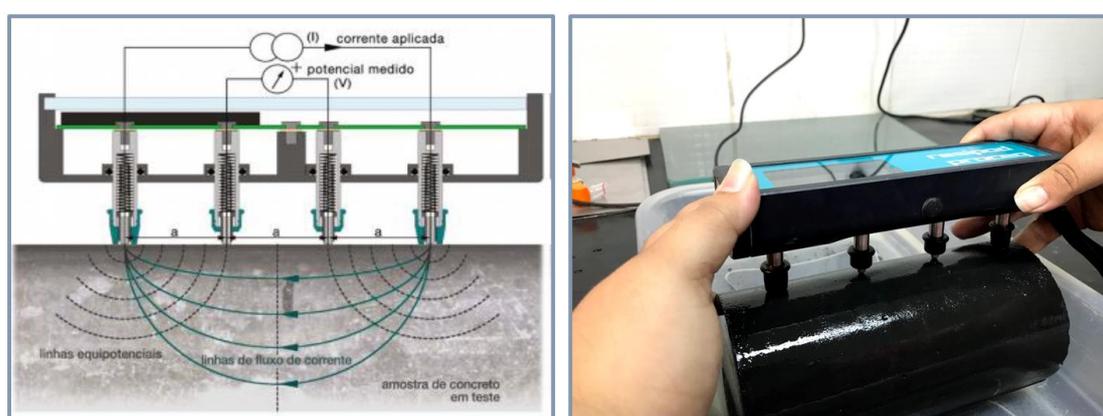


Figura 3.20 - (a) Mecanismo de ensaio de resistividade elétrica (Manual do equipamento PROCEQ, 2019) e (b) realização do ensaio em laboratório.

3.6.8 Potencial de corrosão

Para a realização desse ensaio foram utilizados, para cada condição de exposição, três cubos de concreto armado, corpos de prova do tipo B, nas idades de 3, 7, 28, 50 dias e após o final de cada ciclo de agressão. Isso só foi possível pelo fato de o ensaio ser de caráter não destrutivo, possibilitando que os mesmos corpos de prova fossem utilizados durante todo o estudo.

Antes da realização do ensaio, era retirada a graxa de proteção do aço que fica exposto no topo do corpo de prova, limpo com o auxílio de desengordurante e esponja de algodão para garantir a retirada total da graxa. Posteriormente, as amostras eram submersas em água durante, aproximadamente, 3 horas. Após esse procedimento iniciavam-se as leituras de potencial de corrosão. Em todas as repetições, a leitura era realizada no mesmo ponto do corpo de prova, nas faces laterais, no mesmo alinhamento da barra de aço e distante 10 cm do topo do cubo onde era dado o contato direto com o aço,

ilustrado na Figura 3.21. Sendo assim, foram realizadas quatro leituras para cada tipo de revestimento da amostra, totalizando oito leituras de potencial por corpo de prova. Finalizadas as leituras, era aplicada novamente a graxa de proteção do aço. Esse procedimento se repetiu todas as vezes que o ensaio foi realizado.

O equipamento utilizado foi o Canin+ da marca Proceq que serve para medir o potencial de corrosão e consiste em um voltímetro (capaz de registrar medidas de diferença de potencial), um eletrodo de referência e uma esponja de alta condutividade. A realização do ensaio está representada na Figura 3.21



Figura 3.21 - Realização do ensaio de Potencial de corrosão.

Como eletrodo de referência foi utilizado um eletrodo de cobre/sulfato de cobre, bastante utilizado em pesquisas dessa natureza. Este eletrodo é composto por um tubo de plástico, dentro do qual existe uma haste de cobre imersa em uma solução aquosa saturada de sulfato de cobre. Para garantir a saturação da solução aquosa, utilizou-se uma quantidade de sulfato de cobre suficiente para provocar a acumulação deste composto no fundo da solução. A extremidade de contato do eletrodo foi feita por um ponto poroso, um conjunto de madeira porosa com esponja para proporção da continuidade elétrica do eletrodo de referência com o eletrodo de trabalho (sistema de ferro/ concreto).

Como característica do procedimento de ensaio adotado, é possível que haja uma variação entre o potencial de corrosão das barras, com valores mais negativos ou menos, em função do ciclo ao qual o corpo de prova foi submetido.

Isso ocorre devido à umidade, à resistividade e a outras propriedades do material que afetam o valor do potencial (RIBEIRO *et al.*, 2014).

Diante do exposto, alguns autores indicam não analisar o potencial de corrosão apenas pelo valor absoluto do potencial de corrosão, haja visto não ser possível, apesar dos cuidados que foram tomados e procedimentos de preparação adotados, garantir as mesmas condições em todas as idades de realização do ensaio.

A ASTM, em sua norma C-876 (2015), apresenta como critério de avaliação da corrosão uma correlação entre os intervalos de potenciais e a probabilidade de ocorrência de corrosão, a partir do eletrodo de referência o de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄,Cu²⁺), o mesmo que foi utilizado nessa pesquisa. A Tabela 3.10 apresenta os valores adotados e suas respectivas faixas de probabilidade de corrosão.

Tabela 3.10 - Probabilidade de ocorrência de corrosão de acordo com o valor de potencial de corrosão utilizando eletrodo de Cu/CuSO₄,Cu²⁺ (adaptado de ASTM - C-876/2015).

Potencial de corrosão (eletrodo de Cu/CuSO ₄ ,Cu ²⁺)	Indicação de probabilidade de corrosão
> -200 mV	<10%
-200 mV a -350 mV	Incerta
<-350 mV	>90%

3.6.9 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio permite avaliar a capacidade de o concreto evitar a percolação de água pelos poros o que, de forma indireta, pode ser considerado um parâmetro de qualidade do concreto.

O ensaio normatizado brasileiro de absorção de água por capilaridade em concreto consiste em imergir corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, previamente secos em estufa, em uma lâmina de água com 5 mm de espessura. Com o decorrer do tempo a água vai tendendo a adentrar pelos capilares da amostra. As amostras foram ensaiadas aos 28 dias de idade e após o 3º e 9º ciclo de agressão. Foram utilizados dois corpos de prova previamente retificados para tornar as superfícies do topo e do fundo lisas para cada situação analisada.

Os resultados foram obtidos realizando pesagens com duas amostras de cada mistura na condição seca por estufa e após a imersão em 3h, 6h, 24h, 48h e 72 horas. O ensaio seguiu as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012).

A partir daí foi possível calcular a capilaridade dividindo a quantidade de água absorvida nos respectivos tempos de imersão pela área da seção transversal do corpo de prova. Com esses dados traçou-se a curva de absorção por capilaridade onde no eixo vertical estão expressos os valores de absorção em g/cm^2 e no eixo horizontal estão os valores das raiz quadrada do tempo de exposição em minutos.

Além disso, foi calculado o coeficiente de absorção por capilaridade para cada amostra através da inclinação inicial da curva de capilaridade entre os períodos de 0h e 6h. Apesar de não mencionado na norma de absorção capilar brasileira, essa forma de apresentação é utilizada há muito tempo em trabalhos internacionais dessa natureza, como Khatib e Mangat (1995). A escolha pela determinação do coeficiente de absorção capilar se deu para se ter um único valor e não uma curva para representar a absorção capilar por mistura, facilitando a análise de resultados.

3.6.10 Índices físicos

Os índices físicos determinados foram as massas específicas real, seca e saturada, o índice de vazios e a absorção de água por imersão. Para essas determinações foram utilizados os mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de absorção por capilaridade, ou seja, cilindros de CAA de 200mm de altura e 100mm de diâmetro. O procedimento utilizado conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009).

Os procedimentos para a realização dos ensaios foram executados no Laboratório de Durabilidade e Química dos materiais do IFRN Campus Natal Central, de acordo com as etapas relacionadas abaixo:

- Secagem das amostras em estufa a 105°C por 72 horas. Após a remoção da estufa, as amostras foram resfriadas em temperatura ambiente (23°C) para posterior determinação da massa seca em estufa (m_s);

- Imersão das amostras em águas a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 72 horas, posteriormente, foi realizada a pesagem submersa através de balança hidrostática (m_i);
- Após a pesagem hidrostática, as amostras foram secas com pano úmido e retirada a massa da amostra saturada de superfície seca (m_{SSS}).

Após esses procedimentos foram calculados os índices físicos das amostras a partir das fórmulas explícitas na norma NBR 9778 (ABNT,2009).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais finos

4.1.1 Análise química por FRX

Foi realizada a análise da composição química dos materiais finos através da fluorescência de raio X, onde foram determinados, em termos percentuais, quais os óxidos presentes. A Tabela 4.1 apresenta os resultados do FRX do cimento (CIM), metacaulim (MK) e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) utilizado nesse trabalho.

Tabela 4.1 – Composição química dos materiais finos no estado anidro.

Composto químico	Teor em cada material (%)			
	CIM	MK	RBC	
			Sem moagem	Após moagem
CaO	70,10	0,12	10,35	1,79
SiO ₂	13,80	55,34	39,75	75,58
Fe ₂ O ₃	7,60	7,14	19,20	9,91
Al ₂ O ₃	4,00	33,55	4,49	2,50
SO ₃	3,32	0,09	0,84	0,78
K ₂ O	0,49	0,84	12,12	1,89
TiO ₂	0,27	1,32	1,58	0,56
MgO	-	0,83	2,95	2,82
ZrO ₂	0,17	0,08	2,24	0,17
P ₂ O ₅	-	0,27	4,80	2,51
Na ₂ O	-	0,21	-	0,36
Outros (teor <1%)	0,25	0,21	1,68	1,13

A partir do FRX, é possível perceber a predominância do óxido de cálcio (CaO) na composição do cimento, esse fato é coerente visto que o calcário é a principal matéria prima para a sua fabricação. No metacaulim há destaque na quantidade de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) e no resíduo da biomassa da cana-

de-açúcar prevalece a quantidade de sílica e o segundo maior percentual é do óxido de ferro (Fe_2O_3).

Confrontando os teores de dióxido de silício do RBC antes da moagem (RBC-S) e do RBC após moagem (RBC-M) é perceptível o aumento percentual do teor de SiO_2 após a moagem. Isso se deve ao fato de que no procedimento preparatório da amostra do RBC sem moagem, todo o material foi passado na peneira de 75 μm , excluindo assim grande quantidade dos grãos de areia proveniente do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar. Conseqüentemente, o resultado oculta a real quantidade de SiO_2 presente na amostra, influenciando assim nos outros teores dos compostos químicos. Por sua vez, na amostra do RBC-M não foi necessário submeter ao peneiramento antes do ensaio de FRX, visto que o material possui a finura adequada para o ensaio.

Em relação à quantidade de óxido de ferro do RBC, em trabalhos anteriores, Medeiros (2016) e Diniz (2018) acreditavam-se ser devido à contaminação dos corpos moedores durante o processo de moagem no moinho de bolas metálicas. Relacionando o RBC-S com o RBC-M é possível perceber que a amostra sem moagem contém óxido de ferro, possivelmente proveniente do solo da região, como citado por Soares (2014) que utilizou em seu trabalho bagaço da cana-de-açúcar proveniente da mesma usina. Outro possível motivo está relacionado à própria cana-de-açúcar possuir ferro em sua composição. De acordo com Soares (2017), para cada 100mg da parte comestível da cana-de-açúcar, 0,8 mg é de óxido de ferro.

Desse modo, admite-se que haja contaminação durante a moagem, porém a quantidade de óxido de ferro presente no resíduo da biomassa da cana-de-açúcar não é exclusivamente devido a esta situação. No que diz respeito à redução da quantidade de óxido de ferro após a moagem, tal condição pode ser explicada pelo fato dos teores dos compostos químicos serem dependentes entre si, como houve um aumento do teor de outros componentes, acontece uma redução proporcional do teor de Fe_2O_3 .

Em conformidade com a NBR 12653 (ABNT, 2014) os materiais pozolânicos necessitam cumprir algumas exigências químicas para serem classificados como tal. Tanto o metacaulim quanto o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar se enquadram, a partir das características detectadas pelo

ensaio de FRX, em materiais pozolânicos do tipo E, como mostrado na Tabela 4.2. A importância dessa constatação é devido à pozolanicidade ser uma das principais propriedades das adições minerais, fazendo com que estas atuem na influência de algumas características dos concretos.

Tabela 4.2 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos.

Requisito	Exigência normativa para pozolana tipo E	MK	RBC após moagem
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	>50%	96,03%	87,99%
SO ₃	<5%	0,09%	0,78%
Na ₂ O	<1,5%	0,21%	0,36%

4.1.2 Área superficial

Para os materiais finos utilizados nessa pesquisa foram determinadas as suas respectivas áreas específicas e volume total de poros através do método BET, descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Área superficial específica dos materiais finos no estado anidro.

Material	Área superficial específica (m ² /g)	Volume total dos poros (cm ³ /g)
Cimento	2,76	4,61x10 ⁻³
RBC	60,32	3,91x10 ⁻²
Metacaulim	14,51	2,97x10 ⁻²

Pode-se observar na Tabela 4.3 que o cimento é o material com menor área superficial. O valor apresentado é condizente aos valores de área superficial para cimento do tipo CP V fabricados no Brasil. Conseqüentemente, devido à menor área superficial, apresenta uma maior granulometria e partículas menos porosas.

As adições minerais utilizadas na pesquisa, apresentam uma área superficial maior que a do cimento, com destaque para o RBC. Anjos *et al.* (2013) também utilizou RBC com finura elevada cuja área específica foi de 43,04 m²/g. Em outro trabalho, Anjos, Ferreira e Borja (2012) observaram que a maior finura do RBC induz a melhores propriedades das argamassas analisadas.

4.1.3 Índice de atividade pozolânica das adições minerais

O ensaio de atividade pozolânica do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e do metacaulim foi feito conforme a NBR 5751 (ABNT, 2012). Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Índice de atividade pozolânica das adições minerais.

Material	IAP (MPa)
RBC	2,59
Metacaulim	13,85

A NBR 12653 (ABNT, 2014) determina que a resistência à compressão das argamassas nessas condições tem que ser superior a 6,0 MPa para materiais pozolânicos. Como pode ser visto na Tabela 4.4, o RBC não atende a esse requisito. Apesar disso, como a argamassa com RBC apresentou resistência aos 7 dias de 2,59 MPa, isso indica possuir atividade pozolânica, porém em um grau menor do que as pozolanas comerciais.

Em estudos anteriores de Medeiros (2016) e Diniz (2018), que utilizaram o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar proveniente da mesma usina, BIOSEV localizada em Arês/RN, o IAP do RBC também ficou abaixo do requisito normativo e mesmo assim foi possível produzir concretos com resistências satisfatórias, acima de 35 MPa.

4.1.4 Granulometria à laser

A granulometria à laser foi realizada para os três materiais finos utilizados. A Figura 4.1 ilustra o gráfico de granulometria à laser. No eixo das ordenadas estão as porcentagens passante acumuladas e no eixo das abscissas estão os diâmetros dos grãos.

Através da granulometria à laser foi possível determinar também o diâmetro médio de cada material. O RBC possui diâmetro médio de 2,99 μ m, o metacaulim de 14,37 μ m e o cimento de 20,32 μ m. Como pode ser verificado na Figura 4.1, no RBC os grãos são mais finos do que o cimento e o metacaulim.

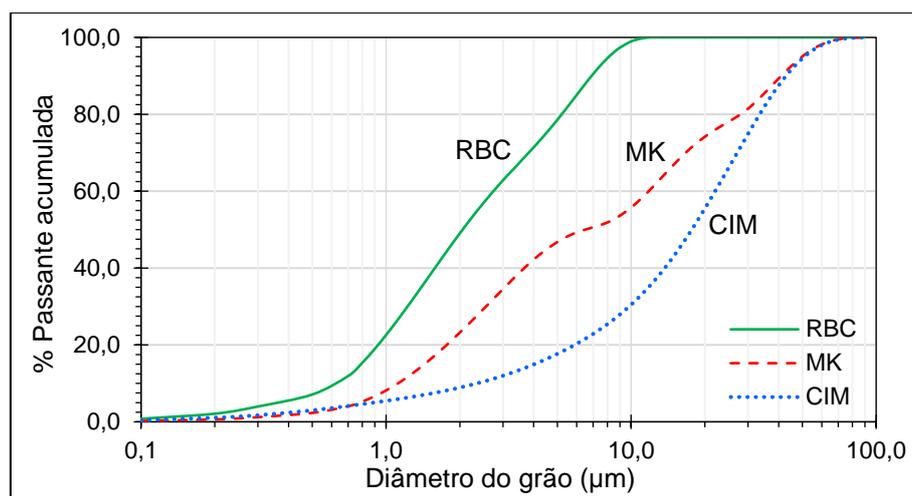


Figura 4.1 – Granulometrias à laser dos materiais finos.

4.1.5 Massa específica, massa unitária e índice de finura

As massas específicas dos materiais, apresentadas na Tabela 4.5, foram utilizadas para calcular o consumo de material por metro cúbico de cada traço de concreto. Com a finalidade de complementar as características físicas dos materiais também foram calculados as respectivas massas unitárias e o índice de finura, sendo esse caracterizado pela porcentagem de material que fica retido na peneira de 75 µm. A diferenciação das características dos materiais se deve à suas composições mineralógicas.

Tabela 4.5 - Massa específica, massa unitária e índice de finura dos materiais finos.

Característica	Material		
	CIM	RBC	MK
Massa específica (g/cm ³)	3,11	2,00	2,59
Massa unitária (g/cm ³)	1,01	0,54	0,53
Índice de finura (%)	0,00	1,40	0,20

4.2 Caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados, areia e brita, foi realizada apenas fisicamente. Foram realizadas as granulometrias através da NM 248 (ABNT,2003). As curvas granulométricas estão apresentadas na Figura 4.2 e Figura 4.3, de onde foi possível determinar o módulo de finura e diâmetro máximo do agregado, cujo valores são apresentados nos respectivos gráficos de granulometria.

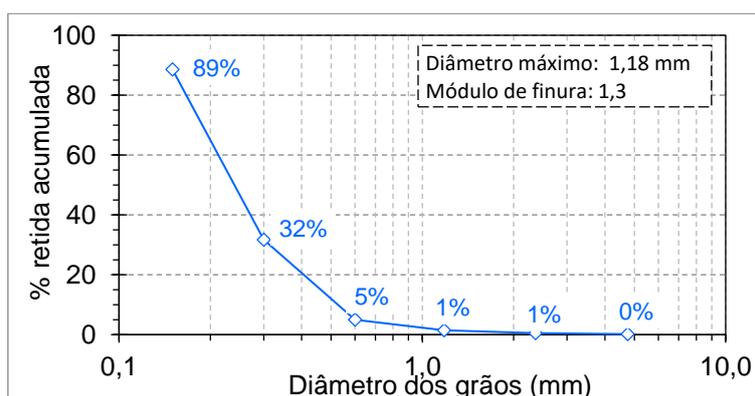


Figura 4.2 - Granulometria da areia.

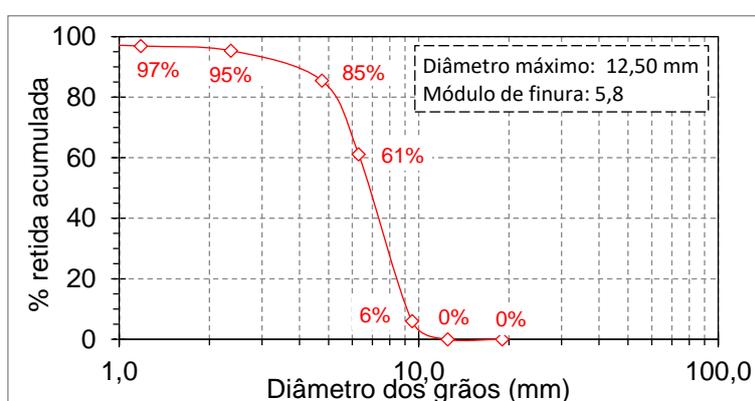


Figura 4.3 - Granulometria da brita.

Além disso, também foram feitos os ensaios de massa específica e massa unitária, conforme as normas NM 52 e NM 53 (ABNT, 2009), cujos valores estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Massa específica e massa unitária dos agregados.

Propriedade	Valor		Unidade
	Areia	Brita	
Massa específica	2,632	2,612	g/cm ³
Massa unitária no estado solto	1,513	1,410	g/cm ³
Massa unitária no estado compactado	-	1,448	g/cm ³

4.3 Ensaios no estado fresco

4.3.1 Análise das composições

As composições de concretos autoadensáveis são mostradas na Tabela 4.7; faz-se constar o consumo de materiais para um metro cúbico de concreto e alguns parâmetros que influenciam nos respectivos comportamentos, incluindo

os parâmetros descritos pela EFNARC (2005) para cada mistura desenvolvida, comparando-as com as faixas indicadas.

Tabela 4.7 – índices dos traços utilizados com os respectivos parâmetros da EFNARC (2005).

Composições		EFNARC (2005)	REF	R30	R20M20	R30M10	R30M20
Consumo (kg/m ³)	CIM	–	444,13	303,57	260,99	259,68	215,74
	RBC	–	0,00	130,54	86,91	129,84	129,44
	MK	–	0,00	0,00	86,91	43,37	86,30
	AM	–	728,37	710,36	712,50	708,93	707,62
	AG	750 – 1000	959,32	938,03	939,56	934,85	931,99
	ÁGUA	150 – 200	213,18	208,25	208,79	207,74	207,11
	Adit. SP	–	2,31	5,77	13,04	13,81	14,12
Parâmetros	% (adit. SP) sobre finos	–	0,52%	1,33%	3,00%	3,19%	3,27%
	Fator água/finos (a/f)	–	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
	Finos (kg/m ³)	380 – 600	444,13	434,11	434,81	432,89	431,48
	Pasta (litros/m ³)	300 – 380	355,95	370,94	369,55	372,70	374,30
	argamassa seca (%)	–	55%	55%	55%	55%	55%
	AM (% em peso do total de agregados)	48 – 55	43,2%	43,2%	43,2%	43,2%	43,2%
	Razão água/finos (l/m ³)	0,85 – 1,1	1,5	1,3	1,3	1,3	1,2

* CIM – cimento; MK – metacaulim; RBC – resíduo da biomassa da cana-de-açúcar; AM – agregado miúdo; AG – agregado graúdo; adit. SP – aditivo superplastificante

Na produção dos CAAs utilizados na pesquisa partiu-se de um traço referência (REF) utilizando-se apenas o cimento Portland como aglomerante. Esse traço inicial possui um consumo de cimento igual a 444,13 kg/m³, aproximado ao consumo dos concretos utilizados em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa de Medeiros (2016) e Diniz (2018).

Utilizou-se como premissa produzir concretos autoadensáveis com substituição de até 50% do cimento por adições minerais e que possuíssem as mesmas classificações de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017) do concreto referência. Foram feitas substituições de 30%, 40% e 50%. Em um dos traços foi utilizado apenas o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar como adição mineral. Essa escolha foi para verificar a influência apenas do RBC nas propriedades do CAA.

4.3.2 Ensaios de caracterização no estado fresco

Para atestar a autoadensabilidade dos concretos, foram feitos os ensaios de caracterização dos concretos autoadensáveis prescritos pelas normas NBR 15823 – parte 1 a 5 (ABNT, 2017). Foram realizados, primeiramente, os ensaios de *slump flow test* de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017). A partir dele é possível determinar o espalhamento, Figura 4.4, e classificá-lo de acordo com o valor obtido. Todos os concretos se classificaram como SF2, sendo um concreto autoadensável de espalhamento médio, adequado para a maioria das aplicações de concreto armado.

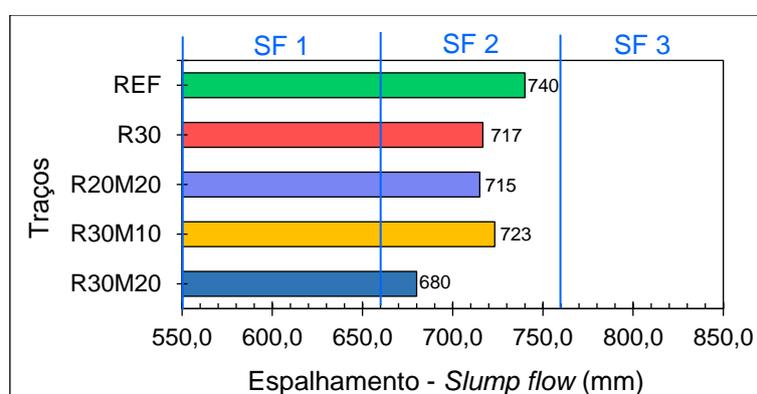


Figura 4.4 - Espalhamentos dos CAAs obtidos pelo *slump flow test*.

A Figura 4.5 mostra o índice de estabilidade visual dos concretos. Percebe-se que todas as composições são classificadas como IEV-0, pois não há indícios de segregação e exsudação e, além disso, há presença de agregados até a borda da circunferência formada pelos CAAs.

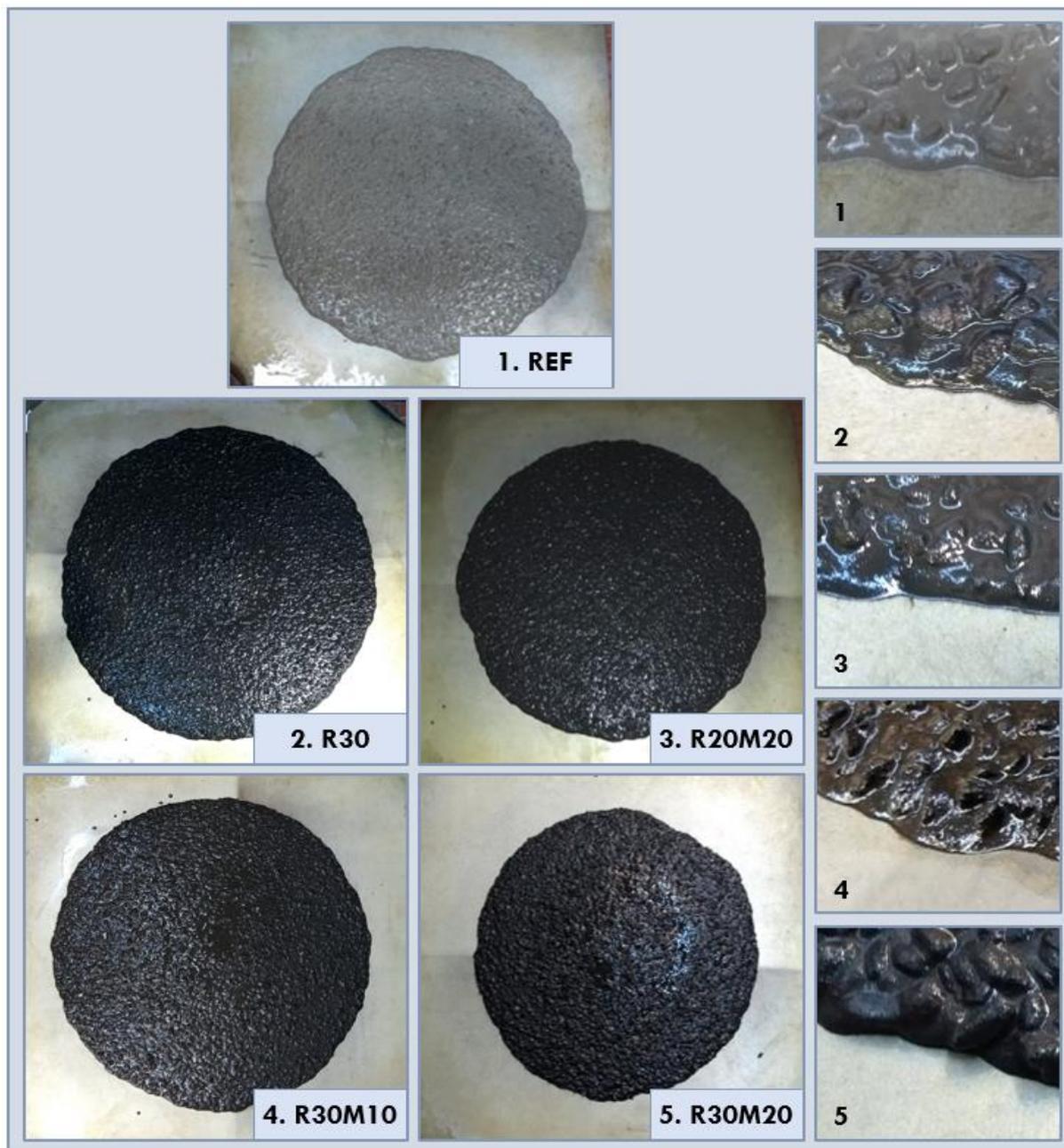


Figura 4.5 - Índice de estabilidade visual com detalhamento da borda do concreto na circunferência.

Para discutir a influência das adições minerais nos percentuais utilizados de aditivo e no espalhamento, foi necessário observar a relação entre o espalhamento e o percentual de aditivo superplastificante, que revela a eficiência do espalhamento de acordo com o consumo de aditivo, para produzir um metro cúbico de concreto. Na Figura 4.6, é apresentado um gráfico com essa relação, mostrando a superioridade da eficiência do aditivo no concreto REF.

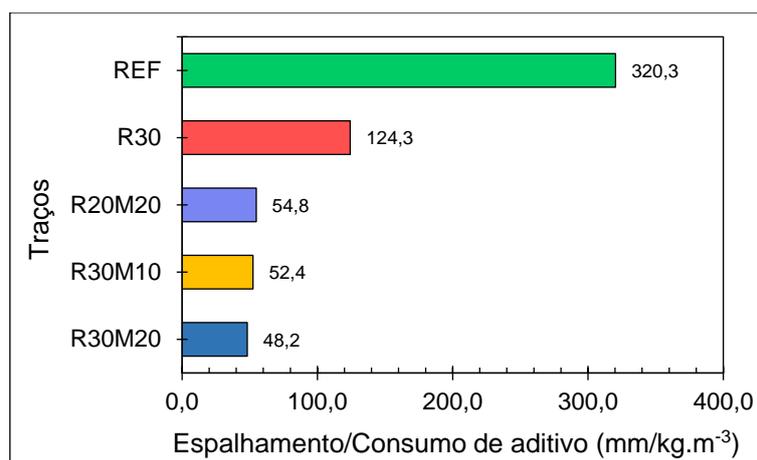


Figura 4.6 - Relação entre o espalhamento e o consumo de aditivo superplastificante.

É justificável o aumento da quantidade de aditivo utilizada visto que as adições minerais possuem partículas mais finas em comparação ao cimento, como pode ser visto a partir do ensaio de granulometria e área específica superficial apresentados na Figura 4.1 e Tabela 4.3. Segundo Chi (2012), devido ao aumento da área de superfície e à natureza higroscópica do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, os valores de fluxo diminuiram constantemente com o aumento da substituição da cinza do bagaço.

Chusilp, Jaturapitakkul e Kiattikomol (2009) informam ser necessário uma maior dosagem de superplastificante para misturas de concreto com resíduo da cana-de-açúcar do que o concreto referência para manter o valor de espalhamento, confirmando a diminuição da fluidez.

Akram *et al.*, 2009 afirmam ser necessária uma dosagem de no mínimo 3% de superplastificante (SP) para manter o valor ideal de espalhamento nos concretos autoadensáveis com cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Em estudos anteriores, realizados com concreto normalmente vibrado e concreto autoadensável, com substituição parcial do cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar pode-se observar que a adição do RBC geralmente resulta em perda de trabalhabilidade na matriz de concreto, devido à sua natureza absorvente de água (GOPINATH *et al.*, 2018).

Na Figura 4.7 estão apresentados os resultados dos ensaios de tempo de escoamento no *slump flow*, o T₅₀₀, e o ensaio no funil V, permitindo classificar o concreto quanto à sua viscosidade. Os CAAs foram classificados, para o ensaio

de T_{500} , como VS1 e, para o ensaio de funil V, foram classificados como VF1 de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Essa classificação, segundo a própria norma, indica concretos adequados para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos. Apesar de mesma classificação de viscosidade para todas as misturas, é perceptível que existe um aumento da viscosidade decorrente da maior quantidade de adições minerais utilizadas, sendo mais marcante nos concretos que possuem metacaulim na sua composição.

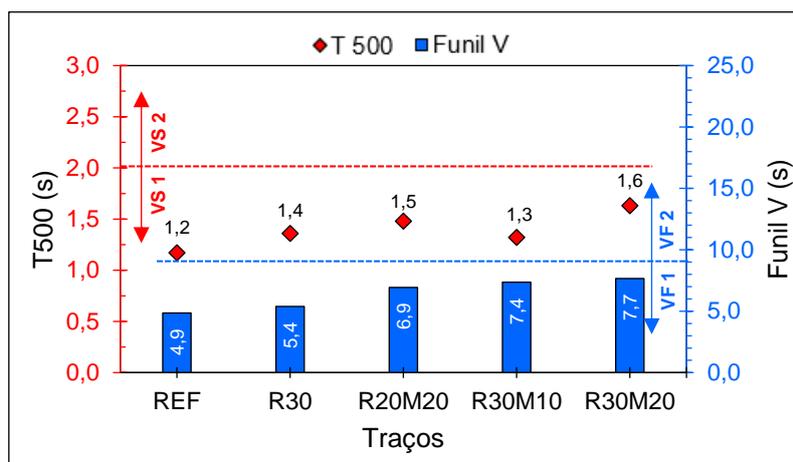


Figura 4.7 - Viscosidade dos CAAs pelo ensaio de T_{500} e funil V.

A última característica analisada no estado fresco foi relacionada à possibilidade de segregação dos concretos, sendo esta aferida através dos ensaios de habilidade passante, anel J e caixa L, de acordo com as partes 3 e 4 da norma NBR 15823 (ABNT, 2017). A Figura 4.8 apresenta os resultados do ensaio de caixa L e anel J.

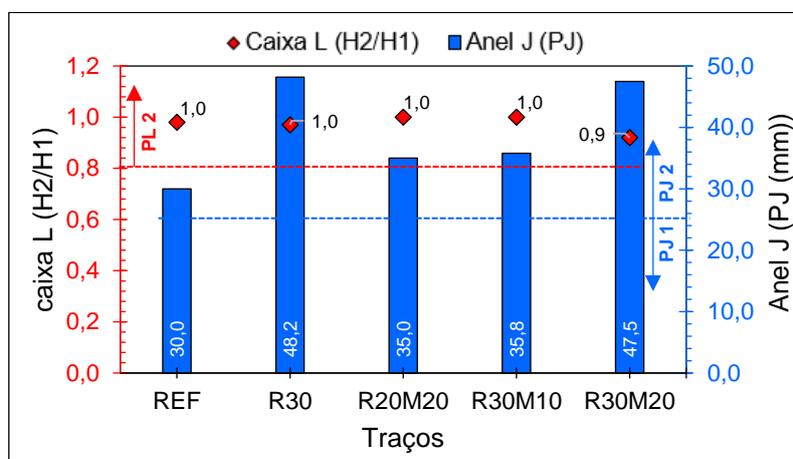


Figura 4.8 - Análise da habilidade passante dos CAAs pelo método da caixa L e do anel J.

Como apresentado na Figura 4.8, a partir dos ensaios de caixa L e de anel J, os concretos foram classificados como PL2 e como PJ2, respectivamente. Essa classificação indica que os concretos produzidos podem ser utilizados em elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 mm a 100 mm.

Diante de tais características conclui-se que todos os concretos produzidos atenderam aos mesmos requisitos normativos de concreto autoadensável, atestando, portanto, a viabilidade desses concretos em relação às características no estado fresco. A Tabela 4.8 apresenta um resumo de todas as características dos concretos no estado fresco.

Tabela 4.8 - Propriedades dos concretos autoadensáveis no estado fresco.

Traços	Propriedade						
	Slump flow test		Tempo de escoamento Funil V (s)	Anel J			Caixa L (H2/H1)
	Espalhamento SF (mm)	T ₅₀₀ (s)		J _F (mm)	T ₅₀₀ c/ anel J (s)	J _F - SF (PJ)	
REF	740,0	1,17	4,86	710,0	1,56	30,0	0,98
R30	716,7	1,36	5,39	668,5	1,63	48,2	0,97
R20M20	715,0	1,48	6,93	680,0	2,12	35,0	1,00
R30M10	723,3	1,32	7,36	687,5	1,96	35,8	1,00
R30M20	680,0	1,63	7,66	632,5	2,59	47,5	0,92

4.4 Propriedades dos CAAs no estado endurecido

Nesse tópico, serão discutidos os ensaios realizados nos concretos autoadensáveis no estado endurecido. Inicialmente, será realizada a análise apenas do impacto das adições minerais na resistência mecânica dos concretos em condições normais de cura submersa em água.

Posteriormente, serão discutidas as demais propriedades dos CAAs, com ênfase nos parâmetros de durabilidade, levando em consideração as três condições de exposição às quais foram submetidos como forma de agredí-los de modo acelerado, evidenciadas na Tabela 3.7 e na Figura 3.12.

4.4.1 Análise do ganho de resistência mecânica e eficiência do consumo de cimento

A Figura 4.9 mostra a evolução da resistência à compressão axial dos concretos autoadensáveis, dos 3 dias até os 28 dias, período esse que os corpos

de prova ficaram na situação de cura submersa em água. O valor apresentado no gráfico é a média de três corpos de prova e a respectiva barra de erro do desvio padrão amostral dos resultados de cada composição de CAA.

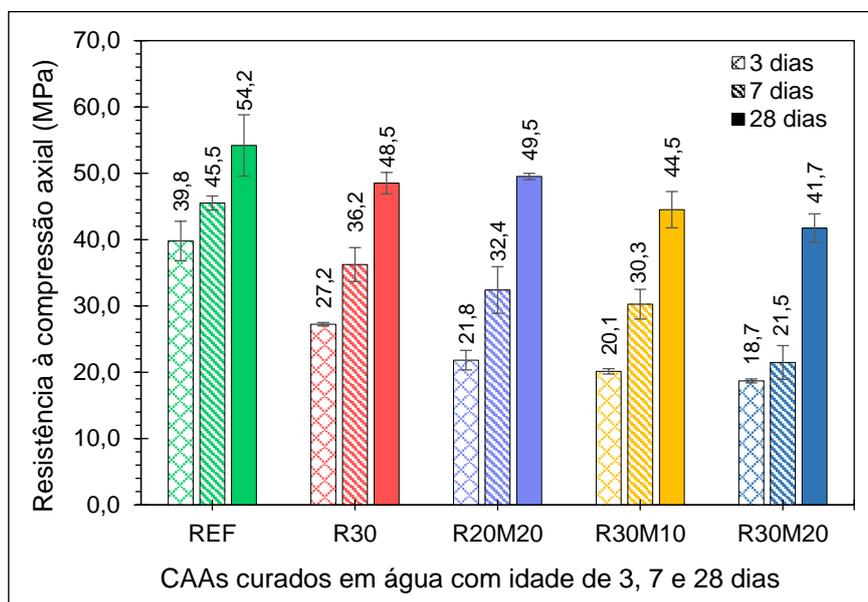


Figura 4.9 - resistência à compressão axial dos CAA, sob cura em água, dos 3 aos 28 dias.

Como pode ser visto na Figura 4.9, a resistência mecânica teve uma redução com o aumento dos níveis de substituição ao cimento, uma vez que o RBC, substituição em maior percentual nas misturas e presente em todos os traços com adição, apresenta apenas uma leve atividade pozolânica. A redução na resistência foi considerada pequena visto que o concreto de maior substituição, o R30M20 composto por 30% de RBC e 20% de MK em substituição parcial do cimento, apresentou uma redução na resistência de apenas 23% em relação ao traço apenas com cimento (REF).

Outro fato a se destacar é a possibilidade de se produzir concretos autoadensáveis com resistências consideradas elevadas, todas acima de 40MPa aos 28 dias, para os traços com adições minerais, que apresentam consumos de cimento bem inferiores ao traço de referência. Destaca-se o CAA apenas com RBC em substituição ao cimento, o RBC30, que possui uma resistência próxima a 50MPa aos 28 dias. Além disso, possivelmente haverá um aumento de resistência em idades mais avançadas, visto que, devido à grande quantidade de adições minerais presente nos concretos autoadensáveis com baixo consumo, as reações pozolânicas continuam acontecendo, como mostra os estudos de Medeiros (2016), Fonseca (2016) e Diniz (2018) os quais as

composições, com teores de incremento de adições minerais aproximados ao estudado nessa pesquisa, apresentaram ganho de resistência aos 90 dias.

Jagadesh, Ramachandramurthy e Murugesan (2018) analisaram concreto normalmente vibrado com RBC e Moretti, Nunes e Sales (2018) estudaram o uso do RBC em concretos autoadensáveis. Ambos observaram que a resistência à compressão diminui com o aumento dos níveis de reposição, chegando a uma redução de, aproximadamente, 50% quando se utilizou 30% de substituição de cimento por cinza de bagaço da cana-de-açúcar. Este efeito explica-se pela baixa atividade pozolânica deste material.

Apesar de trabalhos anteriores apresentarem reduções elevadas na resistência de concretos com RBC, é importante ressaltar a contribuição do metacaulim na resistência à compressão, visto esse ser uma pozolana comercial de alta reatividade. A razão da pequena redução na resistência dos CAAs com o incremento do RBC e MK está associada ao efeito do preenchimento dos vazios e reação pozolânica causada pelo conjunto das adições (GILL & SIDDIQUE, 2017).

Outra constatação realizada a partir da Figura 4.9 e da Tabela 4.9, é o ganho de resistência de 3 para 28 dias, bem como de 7 para 28 dias, ser mais relevante nos concretos com adições minerais.

Tabela 4.9 - Porcentagem do ganho de resistência entre as idades iniciais.

Traço	% do ganho de resistência		
	De 3 para 7 dias	De 7 para 28 dias	De 3 para 28 dias
REF	14,4%	19,1%	36,2%
R30	33,1%	33,9%	78,1%
R20M20	48,5%	52,8%	127,0%
R30M10	50,3%	47,1%	121,1%
R30M20	14,9%	94,3%	123,2%

Isso se deve ao fato de as adições minerais necessitarem reagir com o hidróxido de cálcio, proveniente da reação de hidratação do cimento, para dar início à reação pozolânica, através da formação de silicatos e aluminatos de cálcio secundários formados a partir das reações com as adições minerais. Como será visto ao decorrer dessa discussão, estudos anteriores (LE; LUDWIG,

2016; ARIF, CLARK; LAKE, 2017) que analisaram concretos autoadensáveis com alto índice de substituição de cimento por adições minerais também apresentaram essa particularidade.

Os CAAs que possuem uma porcentagem maior de adições minerais em substituição ao cimento e, conseqüentemente, possuem menor consumo de cimento apresentam um ganho de resistência mais acentuado. Com destaque para o traço R30M20 que teve um aumento de 123% dos 3 para os 28 dias, sendo o crescimento mais acentuado no período de 7 para 28 dias. Isso corrobora ser influência do tempo necessário para acontecer as reações referentes à atividade pozolânica do material.

Le e Ludwig (2016) apresentam uma situação semelhante com a pozolana da casca do arroz e cinza volante e citam que a baixa resistência nas primeiras idades é devido à demora de reação da sílica amorfa com o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do cimento.

Arif, Clark e Lake (2017) observaram um aumento acentuado da resistência à compressão entre as idades dos concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar, apesar de afirmar que as cinzas de bagaço têm efeito de carga dominante no concreto, a partir de uma atividade pozolânica muito reduzida, devido às mudanças de fase polimórfica de quartzo para o α -quartzo, em vez da α -cristobalita frequentemente relatada para sílica derivada do bagaço.

Apesar da redução da resistência mecânica observada com o acréscimo da substituição das adições minerais é válido analisar a relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão obtida. A Figura 4.10 apresenta a relação de eficiência do uso do cimento em cada mistura calculada pela razão entre o consumo de cimento para 1 m³ de concreto, em kg/m³, e a resistência à compressão em megapascal (MPa). Através desse índice é possível perceber a contribuição de quantos quilos de cimento foram necessários para cada unidade de resistência.

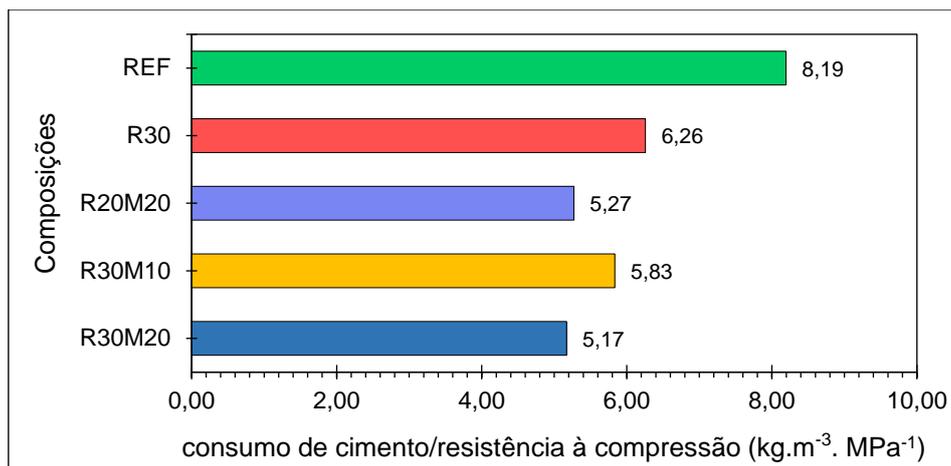


Figura 4.10 - Relação entre consumo de cimento e resistência à compressão.

Todos os CAA's com adições minerais apresentaram eficiência maior do que a composição referência, logo não houve redução proporcional da resistência quando diminuído a quantidade de cimento. É possível perceber que o concreto que apresentou melhor eficiência foi o R30M20, sendo necessário apenas 5,17 quilos de cimento para cada megapascal de resistência adquirida. Por sua vez, o traço referência necessita de 8,19 quilos de cimento para cada unidade de resistência.

Como mostrado na Tabela 2.1, vários trabalhos anteriores, como Sukumar, Nagamani e Raghavan (2008); Vejmelková *et al.* (2011); Uysal e Sumer (2011); Long *et al.* (2017), entre outros, conseguiram uma eficiência de cimento para concretos autoadensáveis com adições minerais numa faixa de 5,2 a 6,3 kg.m⁻³. MPa⁻¹, semelhante às obtidas nesse trabalho. Como também outros trabalhos apresentaram eficiências menores e superiores às obtidas nos CAAs analisados também mostrados na Tabela 2.1. Partindo desse princípio, afirma-se que foi possível produzir concreto autoadensável com baixo consumo de cimento utilizando resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim com resistência satisfatória, comparáveis as publicações anteriores.

4.4.2 Análise da profundidade de carbonatação

A Figura 4.11 mostra a profundidade de carbonatação das composições dos concretos autoadensáveis em estudo realizado sob as três diferentes condições de exposição: apenas carbonatação, combinação de carbonatação com imersão em cloreto e, apenas imersão em cloreto.

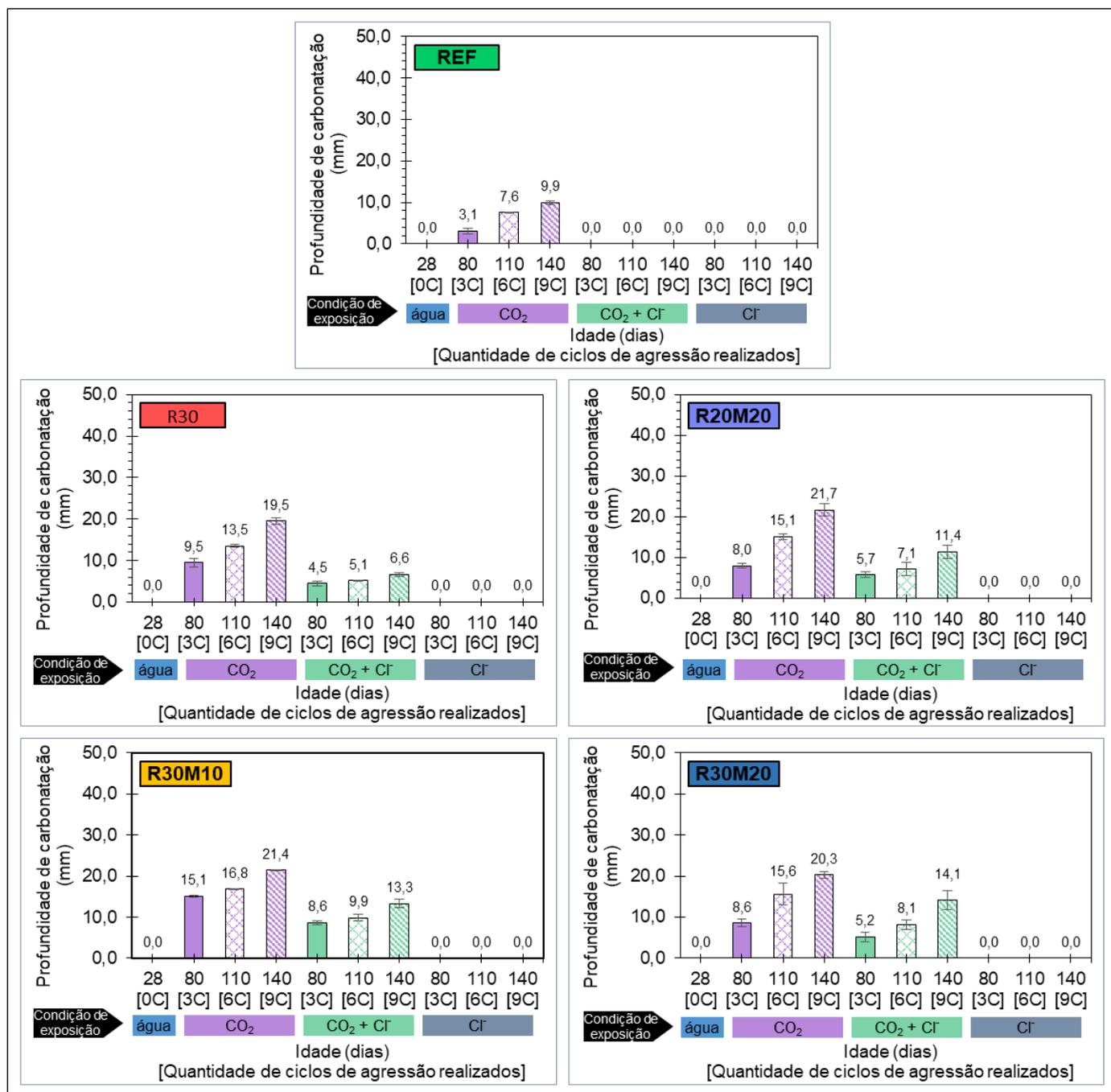


Figura 4.11 - Influência das condições de exposição na profundidade de carbonatação dos traços de CAA.

A primeira verificação da profundidade de carbonatação nos traços foi após os 28 dias, quando os concretos estiveram submersos apenas em água. Como esperado, nenhum concreto apresentou frente de carbonatação visto que eles ficaram todo o período submersos em água sem contato com dióxido de carbono. Isso serviu como parâmetro com a finalidade de provar que todos os concretos tinham iniciado os ciclos de agressão sem apresentar carbonatação,

evidenciando que qualquer carbonatação apresentada em sequência seria proveniente das diferentes condições de exposição aos quais foram submetidos.

Analisando os CAAs apenas na primeira condição de exposição, quando são submetidos somente à carbonatação (representado pela cor lilás na Figura 4.11) percebe-se que em todas as composições, ao avançar dos ciclos de agressão, houve aumento na profundidade de carbonatação. O traço referência (REF) foi o que apresentou uma menor profundidade de carbonatação. Por sua vez, os traços com adições minerais se mostraram mais suscetíveis a entrada de CO₂ o que, conseqüentemente, elevou a frente de carbonatação, apresentando assim maiores valores em relação ao concreto apenas com cimento.

Os traços R30, R20M20, R30M10 e R30M20 com diferentes teores de adições minerais apresentaram profundidades de carbonatação semelhantes ao final do nono ciclo. Desse modo, a diferença nas quantidades de adições minerais não foi de grande relevância ao final do período de exposição. Provavelmente isso é devido à inexistência ou ao baixíssimo teor de portlandita (Ca(OH)₂) em todas as misturas com RBC e MK. Devido a essa situação o pH dos CAAs com adições minerais tende a ser menor que o traço REF, o que favoreceu ainda mais a penetração de CO₂. Outra possível explicação para a similaridade na profundidade de carbonatação está na porosidade aberta dos CAAs com MK e RBC também ser praticamente a mesma, como será visto mais adiante.

Quando existe uma menor quantidade de hidróxido de cálcio disponível na mistura, no caso das composições R30, R20M20, R30M10 e R30M20, o pH da matriz é reduzido, facilitando assim a carbonatação dos compostos por tornar o ambiente mais ácido. Isso acontece devido à menor quantidade de cimento presente e à atividade pozolânica das adições minerais.

Corroborando com o apresentado, Silva, Andrade (2017) afirmam que o aumento do nível de adições minerais pozolânicas, a carbonatação do concreto aumenta. Este fenômeno é principalmente devido à redução do teor de álcali nos materiais cimentícios e porque o C-S-H da reação pozolânica absorve mais íons alcalinos, diminuindo assim o nível de pH no concreto.

Plusquellec *et al.* (2017) afirmam que a portlandita é responsável por manter o alto pH do concreto, numa faixa de 12,5 a 13,8, caracterizando-o como material alcalino. Lu *et al.* (2018) atribuem assim a característica de o concreto ser uma barreira química contra a corrosão da armadura em estruturas de concreto armado, visto que com esse valor de pH é proporcionado a passivação do aço. Muitos autores (ATIŞ, 2003; HAN-SEUNG; WANG, 2016; KHALIL; ANWAR, 2015; KULAKOWSKI; PEREIRA; MOLIN, 2009; MERAH; KROBBA, 2017; RIBEIRO; SANTOS; GONÇALVES, 2018; SISOMPHON; FRANKE, 2007; etc) consideram a maior susceptibilidade à carbonatação como a principal desvantagem da utilização de materiais pozolânicos em substituição ao cimento na produção de materiais cimentícios.

Kurda, Brito e Silvestre (2019) analisaram o efeito de altas taxas de incorporação de cinzas volantes (FA) e agregados de concreto reciclados (RCA) na resistência à carbonatação do concreto. Os resultados mostraram que a profundidade de carbonatação do concreto aumentou de 3 a 6 vezes ao incorporar 30% e 60% de cinzas volantes, respectivamente, e 100% de RCA levou a um incremento de até 2,7 vezes. Ainda nesse estudo, eles indicam como possível solução aumentar a camada de cobrimento de concreto para misturas feitas com FA e/ou RCA para obter uma vida útil equivalente à do concreto referência.

Branch *et al.* (2016) estudaram o impacto da alcalinidade na carbonatação, substituindo o cimento Portland por diferentes cinzas volantes em concretos avaliando as mudanças na microestrutura e migração de seus constituintes. Foi verificado que a taxa e capacidade de reação de carbonatação foi inversamente proporcional à alcalinidade do sistema. Sendo assim, as cinzas volantes são prejudiciais quando os concretos são carbonatados.

Outro fator importante para entender o menor avanço da carbonatação no traço REF está relacionado à redução da porosidade total através da formação do CaCO_3 . Existe uma tendência da frente de carbonatação ser mais lenta no concreto apenas com cimento pois à medida que o CO_2 entra, vai reagindo com o hidróxido de cálcio presente na mistura, formando o CaCO_3 causando uma densificação da amostra, ocupando os espaços anteriormente vazios, fazendo

com que o processo de carbonatação leve mais tempo para acontecer em relação aos traços com adições minerais.

Nos concretos que possuem uma quantidade de hidróxido de cálcio disponível inferior, como é o caso dos traços com adições minerais, o CO_2 entra com maior facilidade, visto que não há a barreira física formada pelo carbonato de cálcio, provocando assim uma maior frente de carbonatação. Embora ocorra uma redução na porosidade total com a substituição do cimento por adições minerais devido ao refinamento dos poros, há um aumento na carbonatação devido à redução no teor de C-H (SULAPHA *et al.*, 2003).

Em outra perspectiva, analisando os concretos submetidos à segunda condição de exposição, caracterizado nesse trabalho como a ação combinada de CO_2 e Cl^- (representado pela cor verde na Figura 4.11). Assim como na situação anterior, há o aumento da profundidade de carbonatação com o avançar da idade, porém em menor proporção. Além disso, a combinação do CO_2 e Cl^- proporcionou uma maior dificuldade à penetração de CO_2 causando assim uma menor frente carbonatada em comparação aos concretos submetidos somente ao dióxido de carbono.

Corroborando com o que foi apresentado, Liu *et al.* (2017) analisaram a ação combinada do CO_2 e Cl^- em concretos de cimento Portland. No estudo realizado, em umas das situações os concretos foram submetidos à carbonatação acelerada e aspersão de uma solução salina, situação próxima à realizada nesse trabalho. Eles chegaram a resultados indicando uma menor profundidade de carbonatação e um maior valor de pH quando os concretos estão sob o efeito da exposição ao aerossol de cloreto e carbonatação.

Ainda no trabalho de Liu *et al.* (2017), com o auxílio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura, foi verificado que os grandes poros do concreto carbonatado podem ser refinados, diminuindo a proporção dos poros, pela presença de ingresso de aerossol de cloreto, que contribui para retardar o processo de carbonatação, quando comparados com a ação individual da carbonatação.

Essa conclusão também é apoiada por uma investigação experimental sobre o efeito do íon cloreto na carbonatação da pasta de cimento usando a

técnica de tomografia computadorizada de raios-X (LIU *et al.*, 2016). Os pesquisadores descobriram que o aumento do íon cloreto na pasta de cimento pode refinar a estrutura porosa e diminuir a porosidade total. Como resultado, a resistência à penetração de dióxido de carbono na pasta de cimento é melhorada.

Ramezianipour, Ghahari e Esmaeili (2014) mostraram, através da análise de difração de raio-X (DRX), que nos concretos submetidos apenas à carbonatação acontece uma maior produção de CaCO_3 do que quando submetidos à condição combinada de CO_2 e Cl^- . De acordo com os resultados, o Ca(OH)_2 foi reduzido e o CaCO_3 foi aumentado consequentemente no ambiente de CO_2 . Entretanto, concretos mantidos na ação combinada de carbonatação e cloreto, possuem menor quantidade de carbonato de cálcio o que poderia ser devido ao efeito da umidade disponível na superfície o que reduz a pontencialidade da carbonatação. Além disso, a água salgada pode lavar o CO_2 que pode penetrar no concreto.

Kuosa *et al.* (2014) afirmam que a presença de íon cloreto também diminui a profundidade de carbonatação nos concretos. A explicação para este fenômeno está possivelmente relacionada a maior umidade e espessura do filme de água dentro dos poros devido à higroscopia de cloreto, que provoca a diminuição da taxa de carbonatação. Além disso, os poros também podem ser bloqueados como resultado da cristalização do sal na rede de poros.

Após a constatação de que houve uma redução da frente de carbonatação em todas as composições devido a ação combinada de CO_2 e Cl^- utilizadas nesta pesquisa, percebeu-se que a redução é mais acentuada quanto maior a quantidade de cimento, chegando a ser nula na composição apenas com cimento (REF).

A Tabela 4.10 mostra uma comparação entre a profundidade de carbonatação entre as duas situações, quando submetidos apenas a carbonatação e quando submetidos a ação combinada de CO_2 e Cl^- , após o nono ciclo de agressão e a respectiva porcentagem de redução entre elas.

Tabela 4.10 - Avaliação da variação da frente de carbonatação entre concretos expostos apenas a CO₂ e expostos a combinação de CO₂ e Cl⁻.

Traços	Frente de carbonatação nas condições de exposição (mm)		% de variação da frente de carbonatação
	CO ₂	CO ₂ + Cl ⁻	
REF	9,89	0,00	-100,0%
R30	19,50	6,64	-65,9%
R20M20	21,69	11,36	-47,7%
R30M10	21,42	13,34	-37,7%
R30M20	20,27	14,06	-30,7%

No traço REF a redução da carbonatação foi bem maior do que as outras composições. Uma das justificativas para essa redução mais acentuada é devido à frente de carbonatação já ser bastante inferior no concreto referência em relação aos demais concretos com adições minerais, fazendo com que pequenas alterações na mistura REF gerem um impacto de maior relevância no tamanho da camada carbonatada.

Desse modo, pode-se concluir que a ação combinada da carbonatação e cloretos causou uma maior densificação da estrutura de poros causada pela entrada adicional de cloreto, resultando em uma maior resistência do concreto contra a penetração de dióxido de carbono, o que leva a um valor de pH mais elevado e menor profundidade de carbonatação no concreto. Apesar disso, este efeito combinado não deve ser considerado como um benefício para estruturas de concreto reforçado com aço, visto que a entrada de íon cloreto na estrutura é bastante nocivo no processo de corrosão.

Na última situação a ser analisada, os concretos estão submetidos apenas a ciclos de molhagem e secagem em cloreto. Como esperado, todos os CAAs não apresentaram frente de carbonatação, haja visto que em momento algum eles foram submetidos a ambientes com CO₂. O ensaio foi realizado para aferir que não tinha carbonatação nesta condição de exposição.

Esse ensaio foi de grande importância para o desenvolvimento deste trabalho, visto que a partir da penetração de CO₂ houve diretamente impacto nas outras propriedades dos CAAs.

4.4.3 Análise da profundidade de cloreto

Foram analisadas as profundidades de cloreto nos CAAs submetidos as três condições de exposição propostas nesse trabalho. A Figura 4.12 mostra a profundidade de penetração de cloreto de todas as composições realizadas.

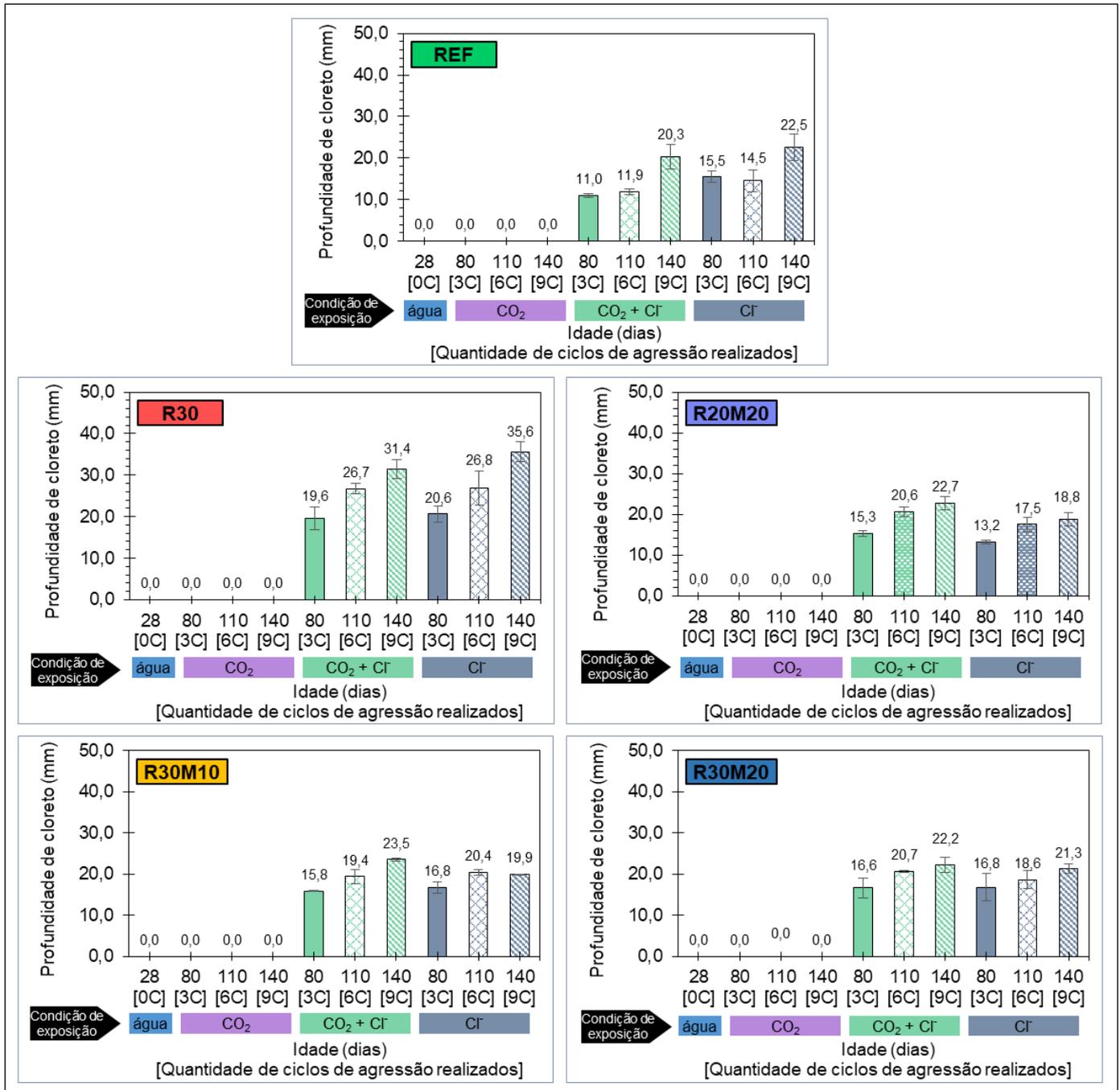


Figura 4.12 - Influência das condições de exposição na profundidade de penetração de cloreto dos traços de CAA.

Como previsto, os concretos autoadensáveis não apresentaram frente de Cl⁻ após os 28 dias iniciais, período esse que eles estavam submersos em água.

Além disso, não foi percebido penetração de cloreto nos concretos que foram submetidos apenas à carbonatação acelerada. Ambas as situações se justificam devido ao fato de a água em que os CAAs estavam submersos no período de cura inicial e na câmara de carbonatação não acontecer contato com qualquer substância que possua cloreto podendo a vir provocar alguma penetração indesejada de Cl^- , atestando assim a qualidade do experimento.

Na Figura 4.12 pode-se verificar que só ocorre penetração de cloreto nas condições de exposição $\text{CO}_2 + \text{Cl}^-$ e apenas Cl^- . Percebe-se que para todos os traços houve uma tendência de aumento da profundidade de Cl^- com o avançar da idade e, conseqüentemente, o maior número de ciclos de agressividade. Esse aumento é considerado normal pois o tempo de exposição ao cloreto também é maior com o decorrer do tempo.

Para facilitar o entendimento, foi feita uma compilação dos resultados da profundidade de penetração de cloreto das diferentes composições que estão submetidas apenas a ciclos de imersão e secagem em solução de água salina apresentados na Figura 4.13.

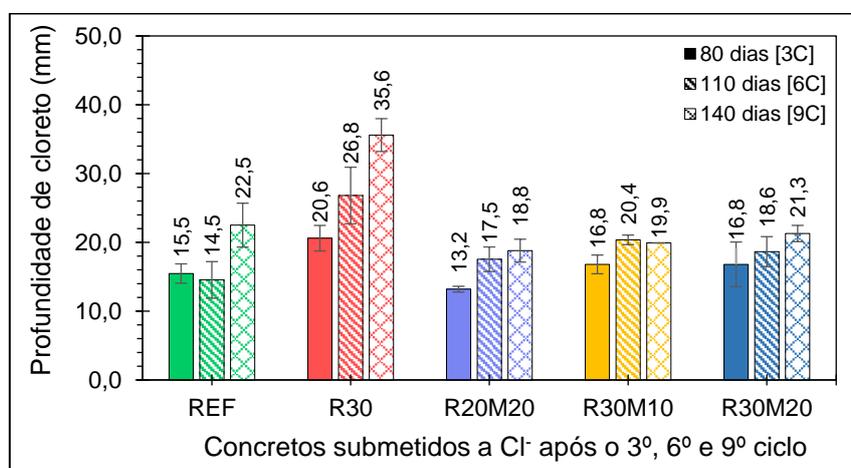


Figura 4.13 - Profundidade de cloreto nos CAAs expostos a ciclos de imersão e secagem em água salina.

É perceptível o aumento da profundidade de cloreto no traço R30 em comparação ao traço REF. Isso acontece devido ao traço referência possuir uma maior quantidade de cimento, possuindo assim uma maior quantidade de aluminatos (C_3A e C_4AF) que contribuem para a redução da quantidade de cloretos livres, visto que estes reagem com os cloretos e produzem

cloroaluminatos (ou sal de Friedel $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e cloroferratos de cálcio ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaO}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (WONGKEO *et al.*, 2014).

Isso é ratificado através da análise por FRX (Tabela 4.1), onde mostra que o RBC é rico em sílica e possui pouco Al_2O_3 o que não contribui com a fixação do Cl^- , fazendo com que haja uma maior facilidade na penetração de Cl^- por não auxiliar na formação de compostos hidratados mais resistentes que permita uma boa ligação com o cloreto ao penetrar.

Corroborando com os resultados apresentados nesse trabalho, Arif, Clark e Lake (2017) concluíram que quanto maior a substituição de cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar em concretos maior é a permeabilidade de cloreto.

Ademais, destaca-se que as composições R20M20, R30M10 e R30M20, mesmo com menores teores de cimento, apresentam menores profundidades de Cl^- . Isso se deve ao fato de o metacaulim possuir uma alta porcentagem de Al_2O_3 , compensando a menor quantidade de aluminatos devido à substituição do cimento, que fixa o Cl^- através da ligação entre a alumina e os cloretos livres formando o sal de Friedel.

Gbozee *et al.* (2018) mostraram que, em comparação com as amostras que tinham 10%, 20% e 30% de sílica ativa em substituição ao cimento, as pastas de cimento misturadas com metacaulim, nos mesmos níveis de substituição, apresentaram maior capacidade de ligação a cloretos. A alumina do metacaulim contribui para formar etringita, as fases de aluminatos de cálcio hidratado, e, além disso, o nível de substituição do metacaulim exerce influências na montagem de fases das pastas resultantes, reduzindo a disponibilidade de sulfato e cálcio, que surge principalmente do efeito de diluição e reação pozolânica do metacaulim.

Numa outra perspectiva de análise, a Figura 4.14 mostra a profundidade de cloreto quando os CAAs são submetidos a CO_2 e Cl^- de forma combinada.

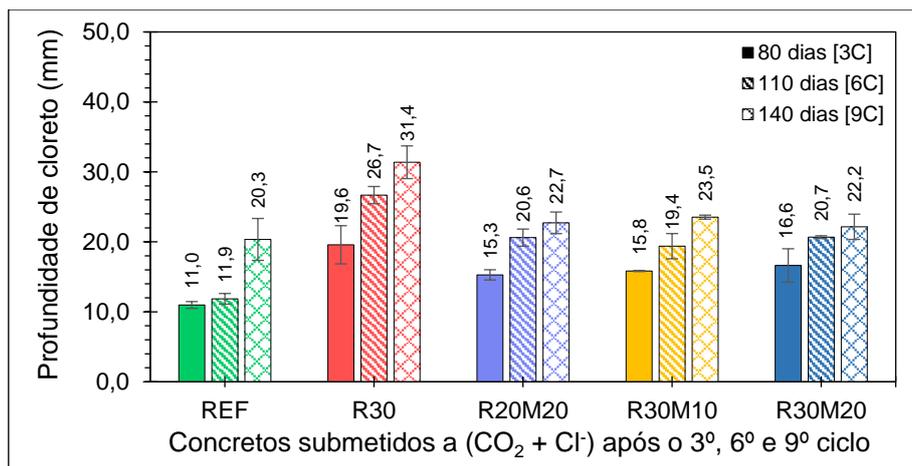


Figura 4.14 - Profundidade da penetração de cloreto nos CAAs submetidos a ação de carbonatação e cloreto.

Correlacionando a profundidade de Cl^- quando os CAAs são submetidos apenas a cloreto e a profundidade de penetração de cloreto quando os CAAs são submetidos a ação combinada de carbonatação e cloreto, conforme Tabela 4.11 percebe-se que, nessa segunda situação, houve uma discreta redução da profundidade para os concretos REF e R30 que são os que não apresentam metacaulim em sua composição e possuem uma maior quantidade de cimento; em compensação, houve um aumento para aqueles que possuem metacaulim em sua composição.

Tabela 4.11 - Avaliação da variação da penetração de cloreto entre concretos expostos apenas a Cl^- e expostos a combinação de CO_2 e Cl^- .

Traços	Frente de cloreto nas condições de exposição (mm)		% de variação da frente de cloreto
	Cl^-	$\text{CO}_2 + \text{Cl}^-$	
REF	22,51	20,35	-9,6%
R30	35,59	31,38	-11,8%
R20M20	18,80	22,72	+20,9%
R30M10	19,92	23,54	+18,1%
R30M20	21,29	22,15	+4,1%

No concreto, quando exposto à solução de NaCl , o monossulfoaluminato, produto hidratado do cimento, se liga ao cloreto e forma o sal de Friedel, tendo portando papel fundamental na ligação química de íons cloreto que é um aspecto benéfico para reduzir a presença de cloreto livre e aumentar a compacidade da

mistura, enquanto etringita e stratlingite não participa de forma efetiva na ligação química de íons cloreto (GBOZEE *et al.*, 2018).

Devido à reação de carbonatação, os poros capilares do concreto são parcialmente preenchidos e bloqueados pela deposição de carbonato de cálcio (CaCO₃), além disso o pH da mistura é reduzido. Como resultado, a intensidade da sucção capilar é reduzida devido a uma redução na porosidade capilar superficial e perda de conectividade no espaço poroso. Desse modo, os concretos sob a entrada combinada de dióxido de carbono e aerossol de cloreto geralmente têm menos porosidade do que os concretos expostos apenas ao ataque de aerossol de cloreto o que poderia reduzir a entrada de cloreto (LIU *et al.*, 2017).

Entretanto, é claramente constatado que o comprimento da zona de profundidade de cloreto nos concretos submetidos a CO₂ e Cl⁻ de forma simultânea é aumentado devido à presença de carbonatação. Esse fenômeno pode estar relacionado à reduzida capacidade de ligação aos cloretos no concreto que é previamente exposto ao dióxido de carbono. Além disso, devido à diminuição do valor do pH na solução de poros após a carbonatação, a capacidade de ligação ao cloreto é reduzida fazendo com que haja uma facilitação na difusão do Cl⁻ através do concreto (LIU *et al.*, 2017).

Zhu *et al.* (2016) analisaram a influência da combinação da carbonatação e cloreto na penetração de cloreto. Provou-se que a concentração de íons cloreto era máxima perto da frente da carbonatação. Embora a carbonatação e entrada de cloreto ocorressem simultaneamente, deve-se notar que a difusão de íons cloreto é muito mais rápida que a taxa de carbonatação. Assim sendo, antes da carbonatação, o concreto geralmente contém o sal de Friedel devido ao íon cloreto ligado ao concreto. Quando o sal de Friedel reage com o dióxido de carbono durante o processo de carbonatação, os íons de cloreto são liberados na solução dos poros no concreto, como mostrado na equação a seguir:



Esses íons cloreto liberados aumentam a concentração de cloreto livre significativamente maior do que a de uma simples difusão de íons cloreto da superfície para o interior.

Corroborando com o citado, Ye *et al.* (2016) afirmam que a carbonatação é capaz de dissolver os sais de Friedel e libertar os íons cloreto devido aos mecanismos de troca iônica entre CO_3^{2-} e Cl^- em solução sólida das fases de aluminato de cálcio hidratado, o CO_3^{2-} mostra uma afinidade mais forte em estruturas do tipo aluminatos- Cl^- . Como consequência, a concentração de cloreto livre perto da superfície exposta pode aumentar, desencadeando um gradiente de cloreto que facilita o ingresso de cloreto para dentro.

A capacidade de ligação do concreto ao cloreto também é influenciada pela carbonatação. Foi relatado que a capacidade de ligação residual é reduzida para menos de 20% da capacidade inicial após a carbonatação (YOON; ÇOPUROĞLU; PARK, 2007; LEE; JUNG, 2013).

Por outro lado, sabe-se que o portlandita é termodinamicamente preferida para ser carbonatada e pode servir como uma fase protectora para os sais de Friedel, postergando a libertação de cloreto livre (YE *et al.*, 2016). Esse fato, justifica o traço REF e R30, que possuem um maior teor de portlandita em relação aos demais traços, terem reduzido a profundidade de cloreto quando submetido a ação combinada de CO_2 e Cl^- , quando comparados com a ação apenas do Cl^- .

Nota-se que, em ambientes não carbonatados, a incorporação de materiais cimentícios suplementares (SCMs) tem mostrado influência positiva na prevenção da penetração de cloretos, principalmente devido ao aumento da ligação de cloretos e da estrutura de poros refinados. A quantidade considerável de alumina de alguns materiais cimentícios suplementares, como o metacaulim, promove a formação de fases aluminatos de cálcio hidratados, contribuindo para uma capacidade de ligação aos cloretos mais forte. Além disso, a estrutura refinada dos poros reduz a difusividade e penetração de cloretos. No entanto, os estudos atuais indicam que, no ambiente de carbonatação, a deficiência de portlandita devido à incorporação de SCMs domina os efeitos positivos, como o refinamento dos poros. Como consequência, os concretos com adições minerais são mais sensíveis ao movimento de cloreto induzido por carbonatação no interior das amostras (YE *et al.*, 2016).

Com base nos estudos experimentais apresentados, uma provável explicação para o aumento da profundidade de cloreto nos concretos que possuem metacaulim, quando expostos a $\text{CO}_2 + \text{Cl}^-$, é devido ao alto teor de alumina presente. Nessa condição a formação do sal de Friedel acontece de forma mais acentuada e quando este reage com o CO_2 há uma maior liberação de íons cloreto em comparação aos traços REF e R30, fazendo com que haja o aumento na camada de profundidade de cloreto.

4.4.4 Difusão de íons cloreto através da migração em regime não estacionário

A principal contribuição desse ensaio para análise da durabilidade dos concretos é verificar a influência da entrada de cloreto quando estes não foram expostos ao Cl^- , como é o caso quando eles são submetidos só a cura normal em água durante as primeiras idades e após 200 dias de moldagem, como também quando eles são submetidos apenas à carbonatação.

Esse ensaio possibilita avaliar a penetração de cloreto nas situações supracitadas, pois a entrada de cloreto é forçada durante o ensaio pela passagem de corrente elétrica. Em contrapartida, nas amostras de CAA que tiveram exposição ao cloreto previamente, no caso da condição de exposição combinada de carbonatação e cloreto e na exposição somente ao Cl^- , a leitura do ensaio de difusão não ocorreu de forma satisfatória, impossibilitando leituras confiáveis em relação a difusividade de cloreto.

Durante o ensaio, a penetração forçada de cloreto deve acontecer exclusivamente em uma única direção, de baixo para cima, o que permite a medida da profundidade de cloreto na amostra através do precipitado de cloreto de prata, caracterizado pela cor roxo, após a aspensão da solução de nitrato de prata (Figura 4.15.a).

Nas amostras que possuem cloreto livre em sua composição, devido à condição de exposição, situação combinada de carbonatação e cloreto e situação de apenas imersão em Cl^- , que submete o CP a penetração de cloreto em toda sua extensão (topo e área lateral), a penetração de cloreto não ocorreu apenas de baixo para cima, impossibilitando assim a medida do real coeficiente da difusão de cloreto nessas amostras (Figura 4.15.b). Assim sendo, há uma não

confiabilidade nos resultados obtidos devido a interferência do cloreto presente na amostra, visto que não é possível distinguir qual cloreto penetrou por difusão e qual penetrou devido a condição do ciclo.



Figura 4.15 - Amostras de concreto após aspersão de nitrato de prata no ensaio de difusão de cloreto sob diferentes condições de exposição antes do ensaio: (a) sob cura submersa em água ou carbonatação e (b) só a ação conjunta de carbonatação e cloreto ou apenas cloreto.

Pelos motivos apresentados anteriormente, optou-se por analisar a difusão de íons cloreto pelo método de migração em regime não estacionário apenas nas amostras que não têm contato prévio com cloreto, ou seja, quando curados apenas em água ou quando submetidos à carbonatação. Além do mais, nas outras duas situações, quando há presença de cloreto na condição de exposição, foi discutido a penetração de cloreto no tópico anterior.

A Figura 4.16 apresenta o coeficiente de difusão de íons cloreto nos concretos aos 28 dias e aos 200 dias quando submersos apenas em água.

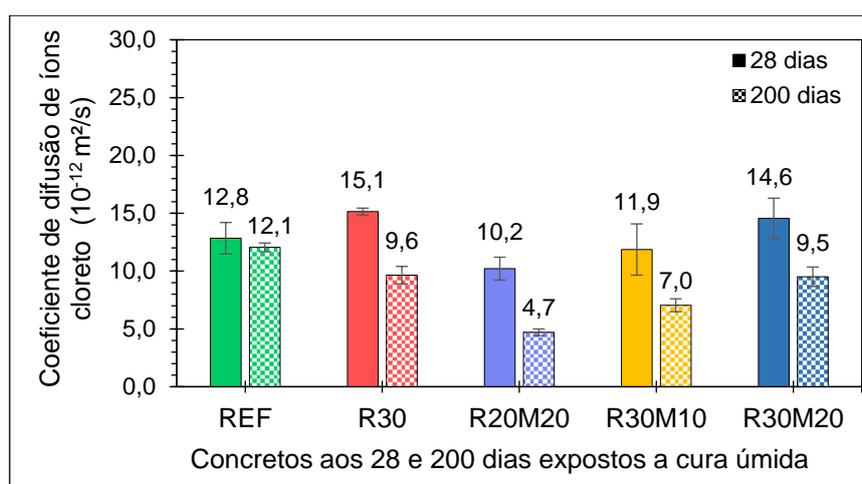


Figura 4.16 - Coeficiente de difusão dos CAAs expostos a cura submersa em água.

Houve a necessidade de fazer os testes de difusão nos concretos numa idade mais avançada, aos 200 dias, devido à alta porcentagem de material

pozolânico presente na maioria das amostras, posto que, aos 28 dias, os concretos com adições minerais em sua composição não terem completado suas reações de consolidação microestrutural.

A redução da difusão de cloreto foi pequena nos concretos com adições minerais em relação ao traço REF quando analisados aos 28 dias, ocorrendo inclusive um aumento da difusão no traço R30 e R30M20, no entanto, com o avançar das idades, houve uma redução na difusão de Cl^- em todas as composições, com destaque para os concretos com adições minerais.

Isso ocorre devido a formação de silicatos e aluminatos de cálcio secundários formados a partir das reações com as adições minerais ser mais lenta do que a formação dos produtos hidratados apenas no cimento, principalmente em se tratando de um cimento de alta resistência inicial, como é o caso do cimento utilizado nesse estudo. Isso justifica também o porquê de, aos 28 dias, as composições R30 e R30M20 apresentarem uma maior difusão de cloreto em relação ao concreto referência. Também justifica não haver uma grande variação no coeficiente de difusão entre as idades para o traço REF.

Analisando os concretos após duzentos dias de moldagem percebe-se que todos os concretos com adições minerais apresentaram um coeficiente de difusão de cloreto inferior ao traço apenas com cimento. Com destaque para os traços com quarenta por cento de substituição, traço R20M20 e R30M10, que tiveram o menor coeficiente. O metacaulim auxilia na formação do sal de Friedel e, conseqüentemente, reduz a quantidade de cloreto livre. Além disso, devido a maior finura das adições, esses CAAs tendem a ser menos porosos do que a composição referência.

A influência do metacaulim justifica também o traço R20M20 ter um menor coeficiente em relação ao traço R30M10 apesar de possuírem o mesmo consumo de cimento e a mesma porcentagem de substituição de cimento, porém o traço R30M10 possui mais RBC e menos metacaulim, o que provoca uma menor capacidade na ligação de cloreto, visto que o RBC possui atividade pozolânica reduzida e pouca alumina na sua composição.

No traço R30M20 na qual houve uma substituição de 50% do cimento, apesar de possuir 20% de metacaulim em sua composição não teve uma

redução tão acentuada no coeficiente de difusão quanto o traço R20M20. Isso ocorre devido ao efeito combinado da grande redução do cimento o que, conseqüentemente, reduz o teor de C_3A da mistura, fazendo com que a difusão seja maior do que o mesmo traço que possui 20% de metacaulim e reduziu apenas 40% de cimento (R20M20). Desse modo, a quantidade de metacaulim acrescentado não foi suficiente para compensar a redução de 50% do cimento no traço R30M20, diferentemente do R20M20.

Por sua vez, o traço R30 e o R30M20 não teve grande redução no coeficiente de difusão em relação ao traço referência devido a menor quantidade de cimento e a pouca atividade pozolânica do RBC citada anteriormente.

Oliveira e Cascudo (2018) evidenciam a contribuição dos materiais cimentícios suplementares, especialmente as pozolanas de alta finura e reatividade, como sílica ativa e metacaulim, no desempenho em relação ao ataque por cloretos. Isto é particularmente verdadeiro nos concretos de cimento Portland, nos quais as heterogeneidades são causadas pelas zonas de transição pasta-agregado. As imagens microestruturais dos concretos da pesquisa de Oliveira e Cascudo (2018) corroboram os comentários anteriores, destacando a estrutura mais densa e compacta dos concretos com adições minerais. Tudo isso reduz significativamente o transporte de massa dentro da estrutura porosa de concreto, fazendo-se observar uma diminuição drástica na difusão de cloretos.

Jin, Jiang e Zhu (2017) afirmam que concretos com material pozolânico de alta reatividade apresentam um melhor desempenho devido não só às mudanças físicas na pasta de cimento e melhorias na zona de transição pasta-agregado, como mencionado anteriormente, mas também a mudanças químicas na solução de poros.

Corroborando com os resultados encontrados nessa pesquisa, Rerkpiboon, Tangchirapat e Jaturapitakkul (2015) concluíram em seu trabalho de análise de concretos com resíduo da biomassa da cana-de-açúcar moído que, a partir dos resultados do teste de penetração de íon cloreto acelerado e da profundidade de penetração de cloretos pelo teste de imersão, o RBC pode ser usado efetivamente para aumentar a resistência ao cloreto do concreto.

Wang *et al.* (2019) afirmam que a composição química do ligante é considerada como um fator crucial para a capacidade de ligação a cloretos do concreto. Embora o C-S-H, de fato ligar-se aos cloretos, a alumina no cimento apresenta uma maior eficiência na ligação com os cloretos formando o sal de Friedel, uma vez que os cloretos ligados com a alumina é esmagadoramente mais do que em géis de hidróxido de cálcio. Sendo assim os cimentos de alta resistência inicial são favorecidos por possuir uma maior quantidade de C₃A.

Dousti, Beaudoin e Shekarchi (2017) concluíram que a principal contribuição de materiais cimentícios suplementares ricos em alumina no mecanismo de ligação a cloreto é geralmente atribuída ao teor de alumina reativa das misturas através da formação do sal de Friedel. Além disso, nas misturas sílica ativa-cal enriquecidas com sílica reativa, o cloreto é ligado pela fase CSH e a capacidade de ligação do C-S-H foi obtida para ser relevante para sua relação cálcio/sílica. Uma alta relação cálcio/ alumina, para a mistura de MK-cal, aumenta a quantidade de sal de Friedel, promovendo a transformação de estratlingita e/ou monocarboaluminato em sal de Friedel.

Um outro ponto de vista a ser analisado é o coeficiente de difusão de íons cloreto nos concretos após eles terem sido submetidos a ciclos de carbonatação acelerada. A Figura 4.17 mostra os coeficientes após 3 ciclos e 9 ciclos de carbonatação, respectivamente. É possível concluir que para as composições sem metacaulim, REF e R30, com o aumento da quantidade dos ciclos de carbonatação houve uma redução no coeficiente de difusão de íons cloreto. Todavia, nos traços que apresentam metacaulim na mistura, houve um aumento no coeficiente de difusão.

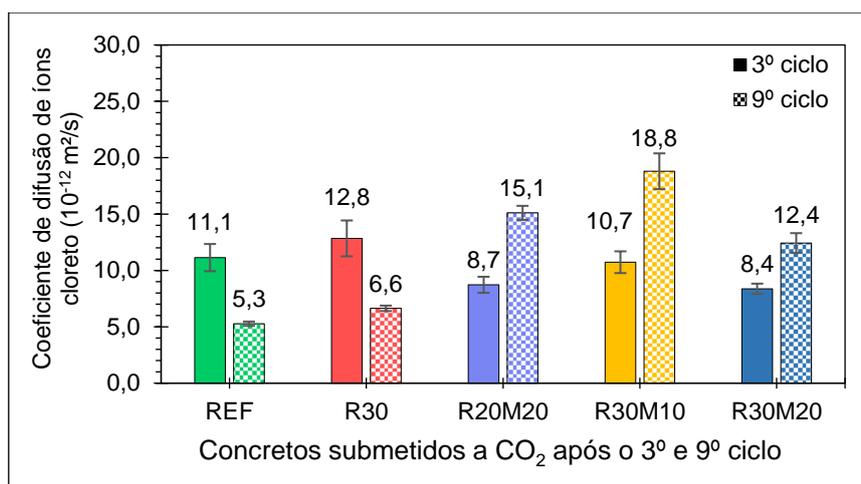


Figura 4.17 - Coeficiente de difusão dos CAAs expostos a carbonatação acelerada.

Isso se deve principalmente à maior quantidade de alumina disponível nas amostras que contém metacaulim, visto ser uma adição rica em óxido de alumina, quando em contato com o cloreto acontece a formação do sal de Friedel. Esse sal, quando em contato com o CO₂, reage liberando cloretos livres, aumentando assim o coeficiente de difusão de cloreto. Como citado por Zhu *et al.* (2016) mostrado na equação a seguir:



Reafirmando o que foi discutido, Saillio, Baroghel-bouny e Barberon (2014) concluem em seu trabalho que existe uma competição entre cloretos e carbonatos para reagir com as fases de monossulfatos (observadas por DRX e espectrometria de RMN de ²⁷Al). Com a carbonatação, são formadas as fases monocarboaluminadas. Quando a concentração de NaCl aumenta, a quantidade de monocarboaluminato diminui enquanto o sal de Friedel é formado (troca aniônica). Contudo, menos sal de Friedel parece formar-se no fim em comparação com a amostra de referência submetida apenas a Cl⁻. A descalcificação de monossulfato e etringita move o alumínio para C–S–H durante a carbonatação. O alumínio parece ser mais estável nesta fase (uma vez que está ligado a 3 ou 4 silícios) e forma menos sal de Friedel na presença de cloretos. A incorporação de alumínio em C–S–H altera a carga superficial dessa fase. Torna-se mais negativo. Consequentemente, o C–S–H perde parcialmente sua capacidade de ligação a cloretos, aumentando a difusão quando existe carbonatação e cloreto envolvidos no processo.

Esse comportamento apresentado nessa situação é semelhante ao que foi analisado na penetração de cloreto quando os concretos são submetidos a combinação de carbonatação e cloreto.

4.4.5 Análise da resistência à compressão sob condições de agressividade de CO₂ e Cl⁻

Foi analisada a variação da resistência à compressão nas três condições de exposição sugeridas nesse trabalho. Primeiramente, a Figura 4.18 apresenta os valores médios das resistências à compressão das composições antes e após serem submetidos a três e nove ciclos de carbonatação, respectivamente.

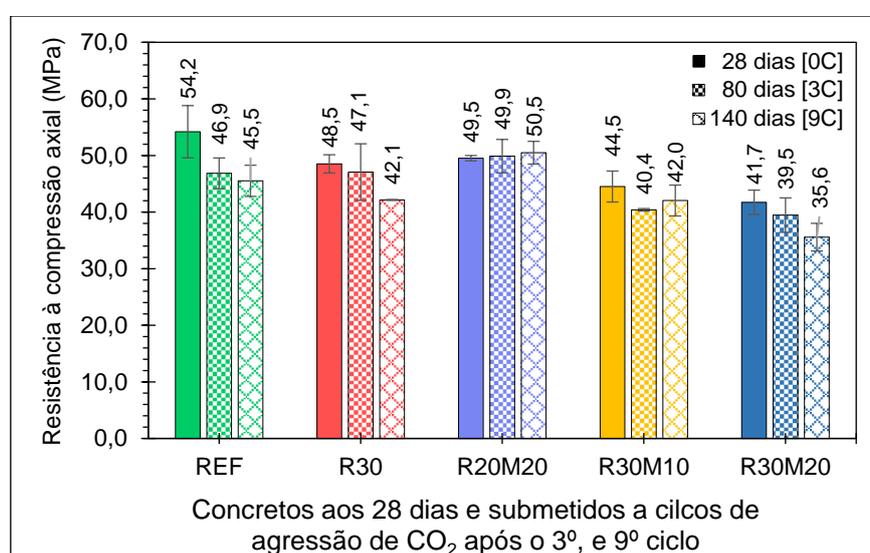


Figura 4.18 - Resistência à compressão axial dos CAAs antes e após serem submetidos a carbonatação.

A partir dos resultados expostos na Figura 4.18, considerando os desvios padrões das amostras ensaiadas, os ciclos de carbonatação não causaram alteração significativa na resistência à compressão dos SCCs. Esperava-se um aumento da resistência com a carbonatação devido a formação de calcita que tem maior densidade que a portlandita o que pode aumentar a densidade do concreto e, conseqüentemente, reduzir a porosidade e inicialmente aumentar a resistência à compressão (LIU *et al.*, 2018).

Merah e Krobba (2017) afirmam, a partir da análise do efeito da carbonatação e do tipo de cimento na ductilidade e na resistência à compressão do concreto, que a resistência à compressão axial aumenta com o tempo de exposição na câmara de carbonatação. Isso pode ser explicado pelo fato de a

carbonatação obstruir os poros formando calcita. Além disso, a reação de gaseificação produz calcita cujo volume molar ($35 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$) é maior que o volume molar da portlandita ($33 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$) consumido por essa reação, conseqüentemente os poros ficam entupidos e a resistência à compressão é melhorada.

Contudo, o aumento adicional de resistência é desprezível em comparação com a evolução total da resistência, uma vez que a área carbonatada é pequena em comparação com a área total da amostra. Portanto, pode-se concluir que a resistência à compressão da amostra é dificilmente alterada pela carbonatação (KIM *et al.*, 2009).

A Figura 4.19 apresenta as resistências à compressão dos CAAs antes e após serem submetidos a ciclos de imersão e secagem em solução salina. Nota-se que o ataque por íons cloreto de forma isolada tem grande influência na redução da resistência sobretudo nos traços que não tem metacaulim, com exceção do traço com 10% de metacaulim, que também apresenta uma redução na resistência, porém de forma bem mais leve.

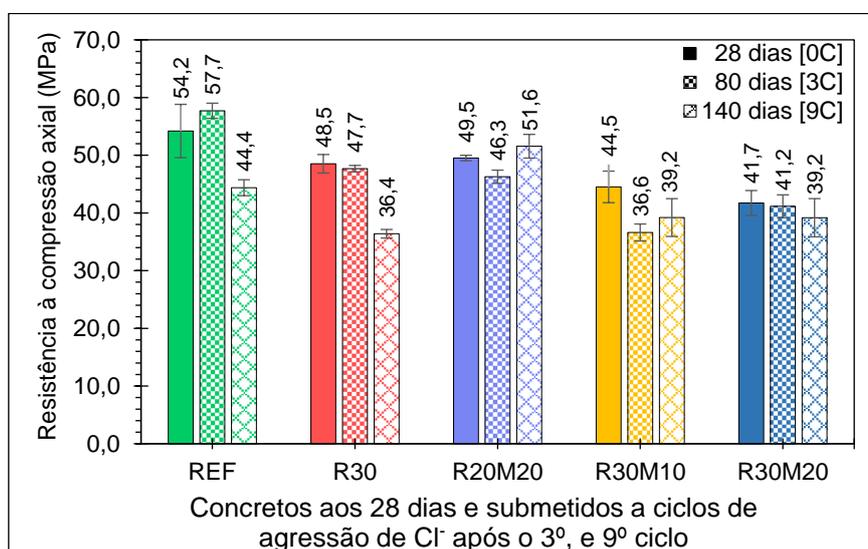


Figura 4.19 - Resistência à compressão axial dos CAAs antes e após exposição a cloreto.

Outro fator que merece destaque é a redução da resistência ser mais acentuada no concreto referência, caracterizando-o como mais susceptível ao ataque por íons cloreto. Também é observado que os demais traços com adições minerais apresentam resistência à compressão inferior em relação ao traço referência quando submetidos ao mesmo tempo de ataque por cloreto,

justificado pelo fato dos CAAs com RBC e MK já possuírem menores resistências à compressão antes do ataque por Cl⁻.

O ataque químico devido ao cloreto de sódio, após sua penetração na matriz cimentícia, é caracterizado pela reação desta solução com os hidratos e pela alteração na sua estrutura. Possivelmente, a formação desses produtos é expansiva levando à destruição da consolidação da pasta de cimento endurecida e subseqüentemente a sua fissuração afetando negativamente as propriedades mecânicas dos concretos (SHI *et al.*, 2011). Fodil e Mohamed (2018) concluíram que os concretos que continham a pozolana são mais resistentes à solução agressiva em relação ao concreto de referência, bem como o analisado por Parande *et al.* 2011. Apesar de ambos reduzirem a resistência a compressão quando atacados.

Isto pode ser parcialmente relacionado com a cinética de hidratação lenta de algumas misturas contendo adições minerais, bem como o efeito de certas adições minerais na ligação de cloreto, como a formação do sal de Friedel porém isso não está bem definido necessitando de estudos mais aprofundados (SHI *et al.*, 2012).

Analisando a influência da ação combinada de CO₂ e Cl⁻ na resistência à compressão dos concretos analisados, Figura 4.20, percebe-se que há uma redução acentuada na resistência à compressão do traço REF e do traço R30M20.

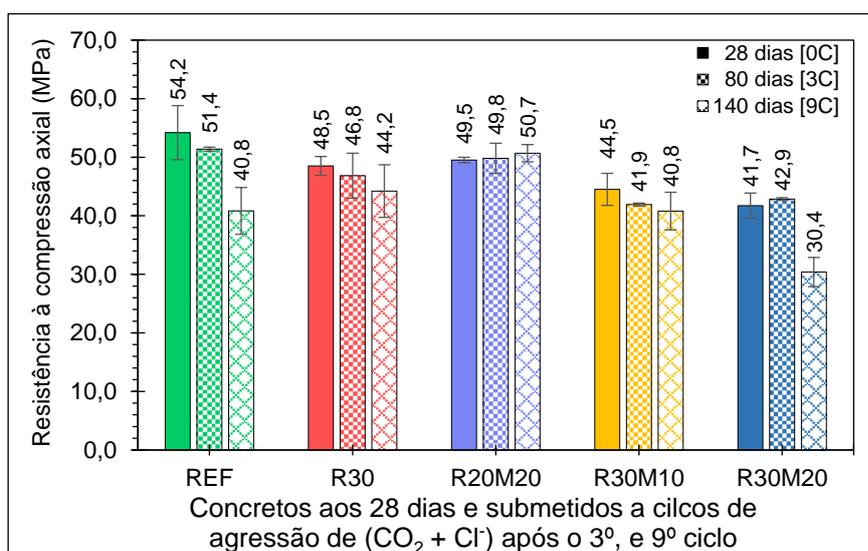


Figura 4.20 - Resistência à compressão axial dos CAAs antes e após serem submetidos ao efeito combinado de CO₂ e Cl⁻.

O primeiro caso pode ser devido ao ataque por cloreto e, no segundo, devido a alta redução do cimento comprometendo a solidez da microestrutura propiciando maior susceptibilidade ao ataque combinado de carbonatação e cloreto. Logo, esse tipo de exposição foi agressivo a ponto de reduzir significativamente a resistência nesses casos. A manutenção da resistência nos demais traços se deu, provavelmente, pela redução da porosidade causada pelo incremento de até 40% das adições minerais.

A fim de analisar qual condição de exposição teve alterações significativas na resistência à compressão das misturas, elaborou-se um gráfico, Figura 4.21, compilando os valores das resistências à compressão das misturas aos 28 dias e após o nono ciclo, aos 140 dias, em cada condição de exposição estudada.

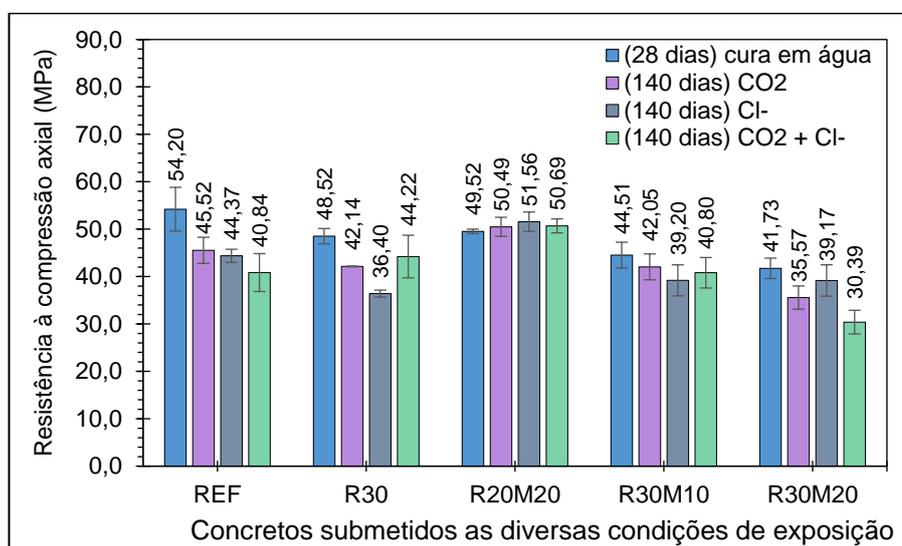


Figura 4.21 - Resistência à compressão axial dos CAAs antes e após os ambientes agressivos.

Comparando as diferentes situações que os concretos foram submetidos pode-se observar que não há uma tendência de variação da resistência comum entre os traços. Nos traços que possuem metacaulim, de modo geral, não houve mudança considerável entre os ciclos, exceto o traço R30M20, sendo a situação mais prejudicial a ação combinada de CO₂ e Cl⁻.

Por sua vez, no traço REF houve uma redução mais marcante na resistência quando os corpos de prova foram submetidos a cloreto de forma individual ou combinada com carbonatação, sendo o último considerado o ambiente de maior desgaste mecânico. O traço R30M20 também teve grande impacto negativo na resistência quando submetidos a uma situação combinada

de carbonatação e cloreto. Mas, quando submetidos aos ataques de forma individual não houve influência considerável na resistência.

O traço R30, no qual utilizou-se apenas RBC em substituição ao cimento, teve maior redução na resistência quando sujeito apenas a ciclos de imersão e secagem em água salina. Dentre todos, o traço R20M20 foi o que apresentou o melhor comportamento diante das agressões em relação a resistência à compressão axial por não haver mudança considerável na resistência mecânica.

Destaca-se também que, mesmo com consumos de cimentos inferiores, os traços com adições minerais tiveram resistências à compressão equiparáveis ao traço referência, mesmo quando submetidos a ambientes agressivos. Nesse estudo, a carbonatação, considerada por muitos pesquisadores (ATIŞ, 2003; HAN-SEUNG; WANG, 2016; KHALIL; ANWAR, 2015; KULAKOWSKI; PEREIRA; MOLIN, 2009; MERAH; KROBBA, 2017; RIBEIRO; SANTOS; GONÇALVES, 2018; SISOMPHON; FRANKE, 2007; etc) como o grande obstáculo para o uso de concretos com baixos consumos de cimento e/ou com adições minerais não teve grande influência na resistência à compressão.

Porém, para compreender melhor a influência da ação da carbonatação e do cloreto de forma independente e combinada, bem como a influência das adições minerais nas resistências à compressão dos concretos quando submetidos a esses ambientes são necessários estudos mais aprofundados.

4.4.6 Análise da velocidade do pulso ultrassônico

A velocidade do pulso ultrassônico (VPU) é utilizada por muitos pesquisadores para atestar a qualidade do material. Essa possui uma boa correlação com a resistência mecânica, como foi analisado por Madandoust e Mousavi (2012); Boukhelkhal *et al.* (2019), entre outros. Normalmente, através da VPU tem como explorar a uniformidade e integridade de amostras de concreto endurecido.

Os testes foram realizados nas idades iniciais e após o final de cada ciclo de agressão das três situações analisadas. A Figura 4.22 apresenta os valores da VPU dos concretos autoadensáveis aos 3, 7, 28 dias, período que estavam submersos em água, e após esse período os corpos de prova ficaram expostos ao ar até a nova idade de ensaio, 50 dias.

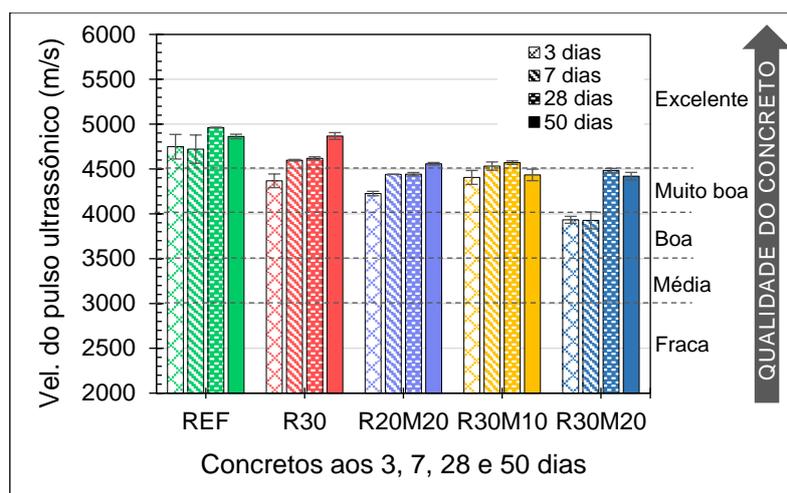


Figura 4.22 - Velocidade do pulso ultrassônico nas primeiras idades

Assim como ocorreu na resistência, com o avançar das idades, houve um aumento da velocidade do pulso ultrassônico. No entanto, a taxa de desenvolvimento da VPU foi mais lenta do que aquela concluída na resistência à compressão. Como discutido em tópicos anteriores, com o aumento da idade, as reações de hidratação vão acontecendo de modo a melhorar a consolidação microestrutural das amostras fazendo com que, conseqüentemente, haja um aumento na velocidade do pulso ultrassônico (GILL; SIDDIQUE, 2017).

Também é perceptível que os traços com adições minerais apresentam VPU levemente inferiores ao traço referência. Justificável devido a menor quantidade de cimento, o que acarretou numa menor resistência à compressão e, como as reações pozolânicas acontecem de forma mais lenta, nessas idades analisadas a consolidação da estrutura ainda não ocorreu por completo (SHI *et al.*, 2012). De acordo com a BS EN 12504:4, aos 50 dias, os concretos REF, R30 e R20M20 são classificados como concretos de excelente qualidade e os demais traços como misturas de muito boa qualidade a partir da velocidade do pulso ultrassônico.

Şahmaran, Christianto e Yaman (2006) apresentaram em seus resultados que o uso de adições minerais em substituição ao cimento nas argamassas autoadensáveis resultou principalmente em uma diminuição nos valores de resistência e velocidade de pulso ultrassônico.

A Figura 4.23 mostra a velocidade de pulso ultrassônico dos CAAs aos 50 dias e após terem sido submetidos a 3, 6 e 9 ciclos de agressão nas situações analisadas nesse trabalho.

Apesar de serem determinadas as velocidades de pulso ultrassônico ao final de cada ciclo, optou-se por apresentar apenas os três ciclos intermediários, visto que foi verificada uma linearidade da variação entre os ciclos. Nota-se que houve uma leve redução na velocidade de pulso ultrassônico dos CAAs, considerada insignificante, ao serem submetidos aos ambientes agressivos. Isso era esperado, visto que também ocorreu uma redução na resistência em alguns casos e, como explicitado anteriormente, possivelmente, as reações dos produtos hidratados com o CO_2 e Cl^- geram novos produtos que causam uma microfissuração na mistura, reduzindo assim a VPU.

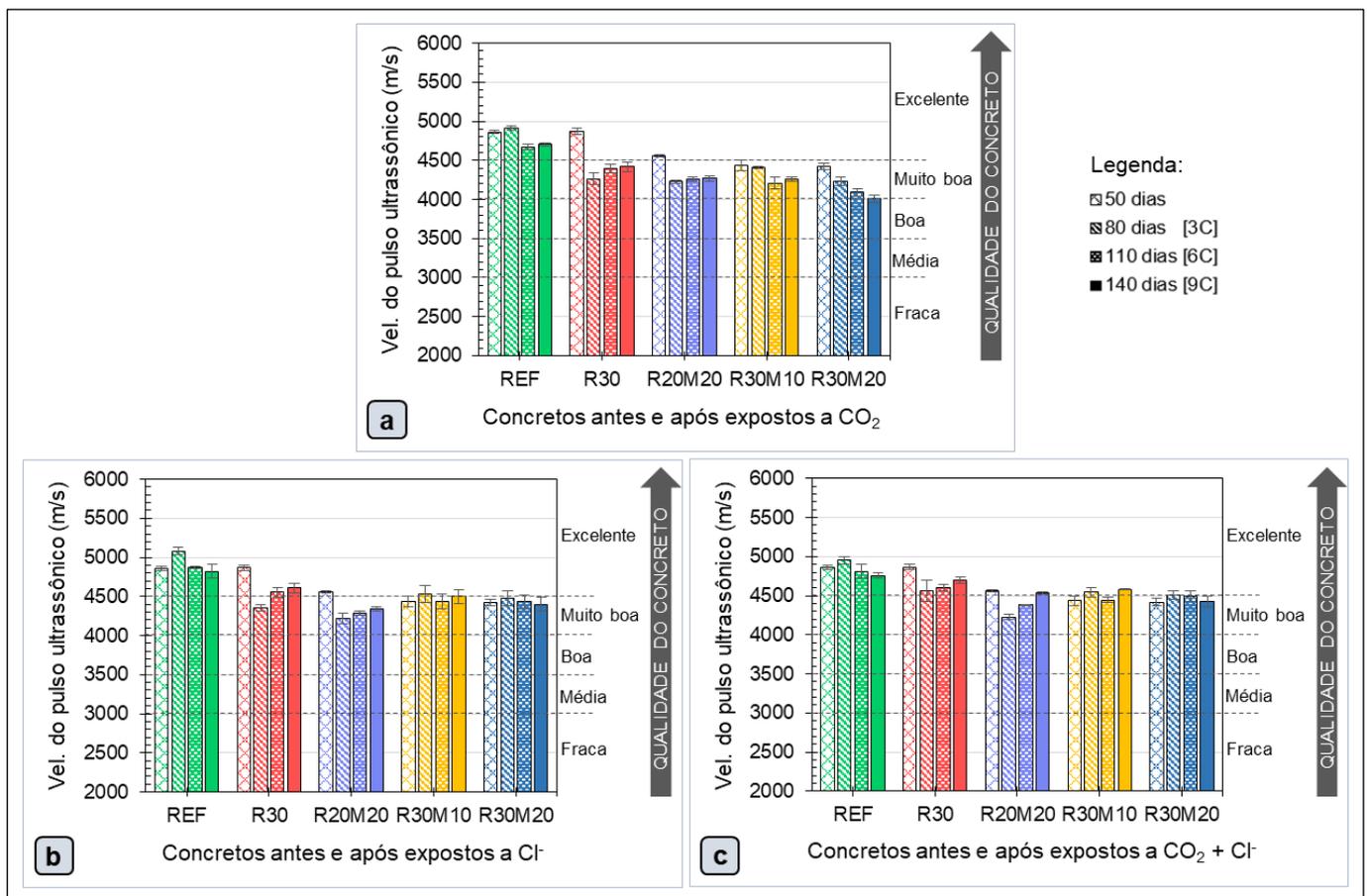


Figura 4.23 - Velocidade do pulso ultrassônico dos CAAs submetidos aos diferentes ambientes agressivos: (a) CO_2 ; (b) Cl^- e (c) $\text{CO}_2 + \text{Cl}^-$.

4.4.7 Análise da resistividade elétrica

Pode-se relacionar a resistividade elétrica à corrosão do concreto. Essa fornece uma boa indicação quanto à resistência oferecida ao movimento de íons durante o desenvolvimento do concreto.

A Figura 4.24 mostra os resultados das resistividades elétricas obtidas nos CAAs nas primeiras idades. Percebe-se que a resistividade vai aumentando com o tempo, sendo o aumento mais marcante nos traços com adições minerais. Isso ocorre, possivelmente, devido as reações pozolânicas ocorrerem de forma mais lenta em comparação as reações de hidratação do cimento.

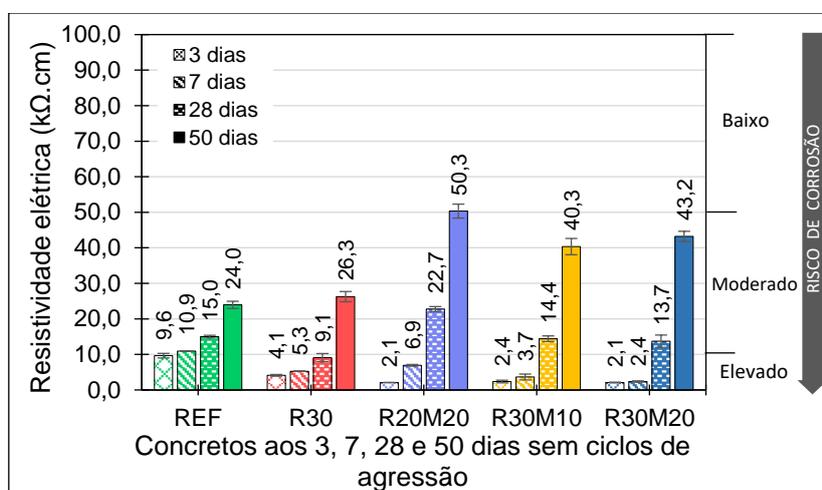


Figura 4.24 - Resistividade elétricas dos CAAs nas primeiras idades sem ciclos de agressão.

O impacto na resistividade ocorre, pois, como citado anteriormente, à medida que as reações vão acontecendo, a microestrutura vai se tornando mais consolidada, aumentando assim o poder da mistura de resistir eletricamente. Todas as composições, aos 50 dias, possuem risco de corrosão moderado de acordo com a classificação indicada pelo boletim técnico europeu CE- COST 509 (1997).

Observa-se também que as composições R20M20, R30M10 e R30M20 apresentaram resistividade elétricas superiores em 109%, 67,9% e 80%, respectivamente, em comparação ao traço REF quando analisados aos 50 dias. O traço que possui somente RBC em substituição ao cimento, o RBC30, possui a mesma resistência de transporte de íons, aos 50 dias, que o traço REF, apesar de possuir consumo de cimento 30% inferior e o RBC apresentar pouca atividade pozolânica.

Outro fator que impacta na resistividade elétrica é a umidade. Como dos 28 dias para os 50 dias, os CP's ficaram expostos ao ar, quando realizado o ensaio aos 50 dias o concreto estava mais seco. Apesar de ter sido realizado um pré-condicionamento das amostras submergindo-as em água durante 3 horas antes de realizar as leituras de resistividade, isso não garantiu a saturação completa das amostras como ocorreu nas idades anteriores. Além disso, o intervalo de tempo entre leituras foi maior. Essas duas causas justificam o aumento mais acentuado da resistividade entre 28 e 50 dias. É possível averiguar que não há uma correlação direta entre resistência à compressão e resistividade elétrica, haja visto que o traço referência apresentou a maior resistência mecânica, o que não aconteceu com a resistividade elétrica.

Corroborando com o que foi apresentado, Bonnet e Balayssac (2018) afirmam ser importante ressaltar que a resistividade elétrica é sensível à umidade, a resistividade tende a diminuir quando o nível de saturação aumenta. Por sua vez, quando o nível de saturação diminui, a fase líquida do concreto muda gradualmente para um padrão descontínuo que dificulta a condução iônica. Os valores de resistividade aumentam acentuadamente. (BONNET; BALAYSSAC, 2018).

Ghoddousi e Saadabadi (2017) afirmam que nas idades iniciais, 1, 3 e 7 dias, as misturas com metacaulim e sílica ativa apresentam resistividades menores se comparadas com a referência que contém apenas cimento. Porém, aos 28 dias, é visto o contrário. Isso se explica devido as reações pozolânicas acontecerem de forma mais lenta. Além disso, conclui-se que a resistividade elétrica aumentou à medida que os valores de hidróxido de cálcio não reagidos diminuíram devido ao consumo de CH e aumentaram os produtos hidratados que resultam de reações pozolânicas. Cruz *et al.* (2013) relataram que o aumento da resistividade elétrica de misturas com adições minerais ao longo do tempo se deve a mudanças microestruturais na porosidade conectada.

Joshaghani e Moeini (2017) concluíram que as argamassas com cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram menor resistividade elétrica que a mistura referência aos 7 dias de idade, devido à sua lenta reatividade e baixa atividade pozolânica em idades mais precoces. Isto é principalmente atribuído ao efeito combinado da atividade pozolânica e do efeito fíler. Na idade de 7 dias,

a atividade pozolânica foi significativamente baixa e, portanto, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar não pode contribuir com a durabilidade da argamassa. No entanto, os valores de resistividade elétrica melhoraram em idades posteriores.

O uso das adições minerais aumentou a resistividade elétrica dos CAAs, especialmente em níveis mais altos de reposição. Porém isso não se aplica a resistência à compressão. Sendo assim, esse achado indica que não há correlação direta entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica dos concretos (GESOĞLU; GÜNEYİSİ; ÖZBAY, 2009).

Uma outra interferência na resistividade pode ser devido a força iônica da mistura. A força iônica significa um maior grau de ionização do meio aquoso intersticial da pasta de cimento, com interferência na condutividade da solução de poros e na difusividade de espécies iônicas. Em geral, quanto maior a força iônica, mais fácil é transportar espécies iônicas em solução. O parâmetro de força iônica, que traduz o conjunto de íons em solução do meio aquoso, é significativamente alterado nos sistemas cimentícios modificados por pozolanas de alta performance (OLIVEIRA; CASCUDO, 2018).

Pires (2016) observou uma maior força iônica em concretos sem adições minerais e menor força iônica em concretos com metacaulim, cinza volante e sílica ativa. Isso é consistentemente refletido nos valores de resistividade elétrica da solução e, conseqüentemente, do concreto, maior para sistemas com adições minerais. Essa maior resistividade é, portanto, o resultado das mudanças físicas na pasta de cimento, com o refinamento dos poros e a densificação da estrutura interna do concreto, mas também é devido às mudanças químicas na solução de poros.

A resistividade elétrica e a difusividade do concreto estão fortemente relacionadas, uma vez que ambos dependem da tortuosidade e da porosidade do material. Quando a difusividade é maior, a corrente é conduzida mais facilmente através do concreto e a resistividade é, portanto, mais baixa (FARES *et al.*, 2018).

Ao analisar o efeito da carbonatação na resistividade elétrica das misturas, Figura 4.25, houve um aumento considerável na resistividade elétrica das misturas com o aumento dos ciclos de agressividade em relação a quando

não estavam expostos a CO_2 , com exceção do traço R30M20 que apresentou uma redução do 3º ciclo para o 9º ciclo, esse comportamento pode estar ligado com o menor consumo de cimento e a porosidade, visto esse ter sido o traço de maior índice de vazios, como vai ser visto mais adiante. Ademais, o aumento da resistividade foi mais evidenciado nos traços que não possuem metacaulim em sua composição.

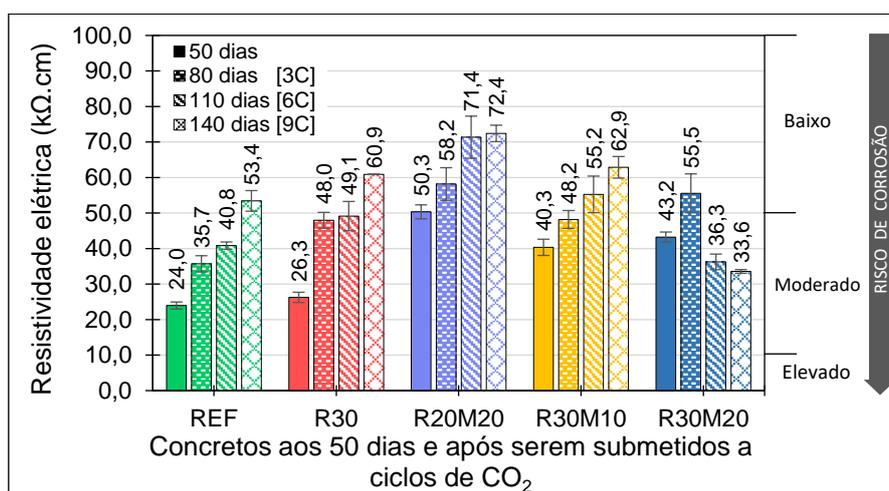


Figura 4.25 - Resistividade elétricas dos CAA's antes e após exposição a CO_2 .

A profundidade de carbonatação afeta a resistividade elétrica positivamente. Para o mesmo nível de saturação, a resistividade aumenta devido as mudanças estruturais causadas pelas reações de carbonatação. A diminuição da porosidade induzida pela carbonatação aumenta a compactação do material, resultando em uma fase líquida menos influente. A corrente então flui menos livremente e a resistividade aumenta. A mudança na matriz de cimento devido à dissolução da portlandita modifica a solução de poros e, portanto, sua condutividade. Desse modo, a composição do material e qualquer adição de pozolana afeta a porosidade e a condutividade da solução de poros. (BONNET; BALAYSSAC, 2018).

A carbonatação melhora consideravelmente a resistividade da superfície, indicando que os concretos carbonatados devem ser mais resistentes à permeação de íons externos. Este fenômeno mostra que uma camada mais resistente é formada na superfície do concreto devido a penetração do CO_2 . O depósito de carbonato devido à entrada de CO_2 aparentemente adensou a estrutura física do concreto e, conseqüentemente, a penetração de íons prejudiciais foi reduzida (ZHANG; SHAO, 2016).

Corroborando com os estudos anteriores, Kim, Mccarter e Suryanto (2018) mostraram que os concretos que possuem materiais cimentícios suplementares apresentaram um aumento da resistividade, sendo isso devido as reações pozolânicas. Isso é benéfico para o desempenho do concreto e afeta a resistividade da solução de poros no concreto, que é um dos fatores que determinam a resistividade do concreto.

A Figura 4.26 apresenta a influência do efeito de íons cloreto na resistividade elétrica do concreto.

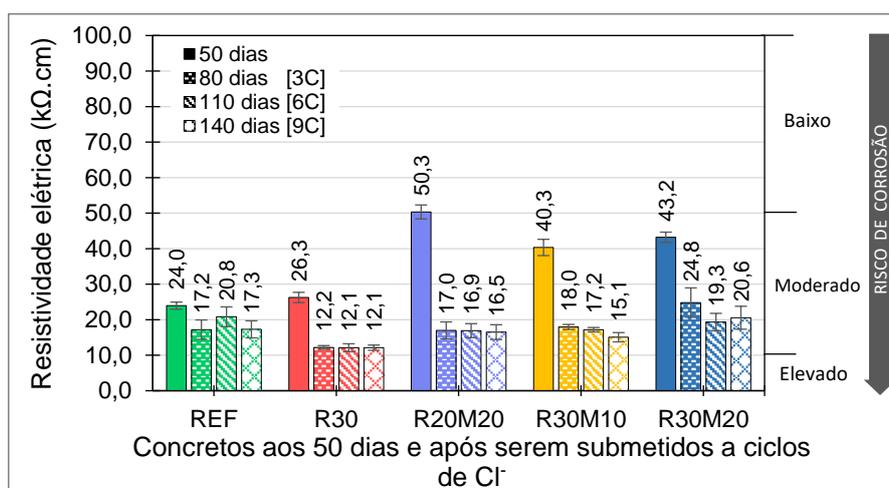


Figura 4.26 - Resistividade elétricas dos CAAs antes e após exposição a cloreto.

Ao analisar a Figura 4.26, verifica-se o fenômeno contrário ao apresentado devido à carbonatação. À medida que os ciclos de Cl^- aumentam, a resistividade elétrica diminui. Isso era esperado, visto que, ao aumentar a quantidade de íons no interior do concreto, ocorre uma maior facilidade à passagem de corrente elétrica e, conseqüentemente, reduz o poder de o material resistir eletricamente.

Esse comportamento foi comprovado em todas as composições em estudo, ressaltando ter ocorrido de forma mais notória nos concretos com menores consumos de cimento. Apesar da redução sofrida, todos os concretos permaneceram na faixa de risco de corrosão moderado, ou seja, a resistividade ficou acima de 10 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$.

Morris, Vico e Vázquez (2004) propuseram que existe uma relação entre a resistividade elétrica do concreto e o nível do limiar de cloreto e destacaram

que a resistividade do concreto pode ser considerada como um parâmetro efetivo para avaliar o risco de corrosão induzida por cloreto.

Polder e Peelen (2002) afirmam que, a partir do trabalho teórico e experimental, parece haver uma correlação entre a resistividade do concreto e o ingresso de cloretos. Em geral, o coeficiente de difusão do cloreto é inversamente proporcional à resistividade do concreto. Dentro de uma estrutura particular, zonas mais permeáveis terão uma resistividade comparativamente menor e maior penetração de cloreto.

A Figura 4.27 mostra a influência da ação combinada de CO_2 e Cl^- na resistividade elétrica dos concretos. Assim, como no ambiente apenas com cloreto, a resistividade diminui com o avançar dos ciclos.

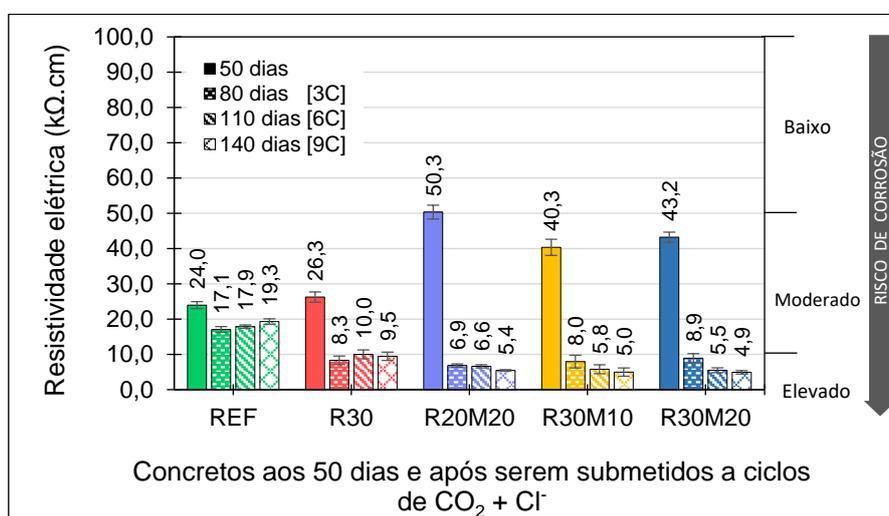


Figura 4.27 - Resistividade elétricas dos CAAs antes e após o ataque combinado de CO_2 e Cl^- .

Porém, comparando a Figura 4.26 com a Figura 4.27, percebe-se que a redução da resistividade elétrica quando os concretos estão submetidos ao ataque combinado de carbonatação e cloreto acontece com maior intensidade. Isso se deve a quantidade de íons presente na amostra ser maior, como mostrado anteriormente através do ensaio de penetração de cloreto.

Liu *et al.* (2017) afirmam que a capacidade de ligação ao cloreto é diminuída pela reação de carbonatação, resultando no aumento da concentração de íon cloreto livre no interior do concreto. Zhu *et al.* (2016) afirmam que o sal de Friedel quando carbonatado reage liberando íons cloreto, aumentando assim o coeficiente de difusão de cloreto e, por consequência, reduzindo a resistividade elétrica.

As amostras que possuem metacaulim na sua composição possuem uma redução mais significativa na resistividade elétrica. Este fato é justificado pelo alto teor de alumina, daí a formação do sal de Friedel é mais acentuada e quando este reage com o CO₂ há uma maior liberação de íons cloreto, reduzindo assim a capacidade de resistir à passagem de corrente elétrica. Após o último ciclo de agressão, apenas o traço REF permaneceu com risco de corrosão moderado, os demais foram classificados com alto risco de corrosão. A análise feita através da resistividade elétrica das amostras de CAA corrobora com o que foi discutido no ensaio de penetração de íons cloreto.

4.4.8 Análise do potencial de corrosão

O método de potencial de corrosão é uma das ferramentas eletroquímicas mais comuns para ajudar a inspeção, monitoramento e diagnóstico da corrosão dos reforços de estruturas de concreto (MEDEIROS-JUNIOR e LIMA, 2016), sendo citado como um método de monitoramento em diversos trabalhos.

A análise de potencial de corrosão foi realizada nos corpos de prova de concreto armado nas idades iniciais e após o térmico de cada ciclo das três condições de exposição estudadas. Além disso, nesse ensaio, acrescentou-se uma outra variável: a espessura de cobrimento, 15 mm e 30 mm. Como visto na metodologia, com a finalidade de evitar interferência da condição inicial do aço nas leituras subsequentes do potencial de corrosão, as barras de aço passaram por um tratamento de decapagem química e física para a retirada de possíveis camadas de óxidos presentes. A Figura 4.28 e Figura 4.29 mostram os resultados de potencial de corrosão em todas as idades analisadas em função do tipo de ambiente de exposição. Sendo a Figura 4.28 os valores de potencial adquiridos para o cobrimento de 15 mm e a Figura 4.29 os valores de potencial com o cobrimento de 30 mm.

É perceptível que não ocorreu uma variação linear do potencial de corrosão entre os ciclos, isso é devido o método utilizado, através de um multímetro de alta impedância e o eletrodo de cobre-sulfato de cobre não possuir uma boa precisão e sofrer grande impacto com a umidade da amostra. Apesar de ter-se padronizado manter as amostras submersas em água durante 3 horas antes da realização do ensaio de potencial, isso não é suficiente para garantir a

mesma umidade em todas as idades. Mas, de um modo geral, é possível investigar o efeito dos ambientes agressivos, das adições minerais e do cobrimento no potencial de corrosão dos concretos autoadensáveis.

Essa não linearidade dos resultados também foi observado por outros autores como, Parthiban, Ravi e Parthiban (2006); Liu *et al.* (2016); Matakah, Dietrich, Teles e Vieira (2017); Medeiros *et al.* (2017); Matakah, Salem e Soroushian (2018); entre outros. O estado de umidade da camada de cobrimento do concreto é um fator que influencia, consideravelmente, os valores de potencial.

Contudo, apesar de haver alterações no valor de potencial, os gradientes de potencial, por sua vez não são afetados. Assim, uma recomendação recente preconiza a representação dos gradientes de potencial ao invés da representação somente dos valores brutos de potencial, a fim de se determinar as zonas de risco de corrosão (ELSENER *et al.*, 2003). Por esse motivo, optou-se por representar nos gráficos as faixas indicativas das probabilidades de corrosão de acordo com o valor de potencial obtido, indicado pela norma C-876 (ASTM,2015), para que a análise do potencial de corrosão não seja feita apenas do valor absoluto do potencial.

A partir da análise das Figura 4.28 e Figura 4.29 é possível perceber que o tratamento prévio das barras de aço foi eficiente, visto que para todas as situações e todos os concretos, na primeira idade analisada, 3 dias, o potencial de corrosão foi praticamente o mesmo, sendo todas as barras de aço dos concretos, inicialmente, classificados como probabilidade incerta de corrosão. Desse modo, como pretendido, qualquer variação no potencial de corrosão independe do estado inicial da barra de aço.

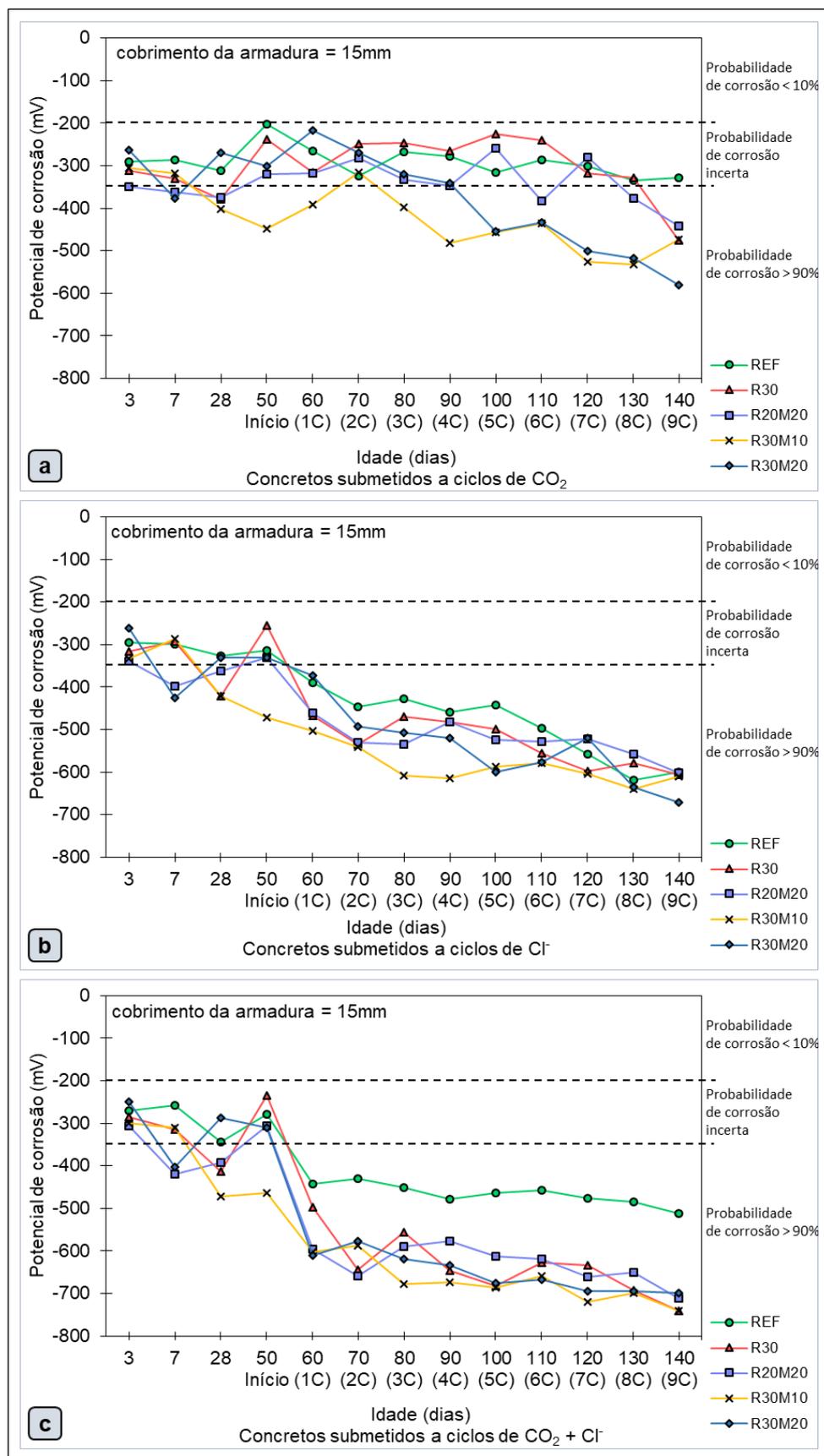


Figura 4.28 - Potencial de corrosão do aço nos CAAs com cobrimento de 15mm, nas primeiras idades e após submetidos aos ambiente agressivos: (a) sob carbonatação; (b) sob cloreto; (c) ação combinada de carbonatação e cloreto.

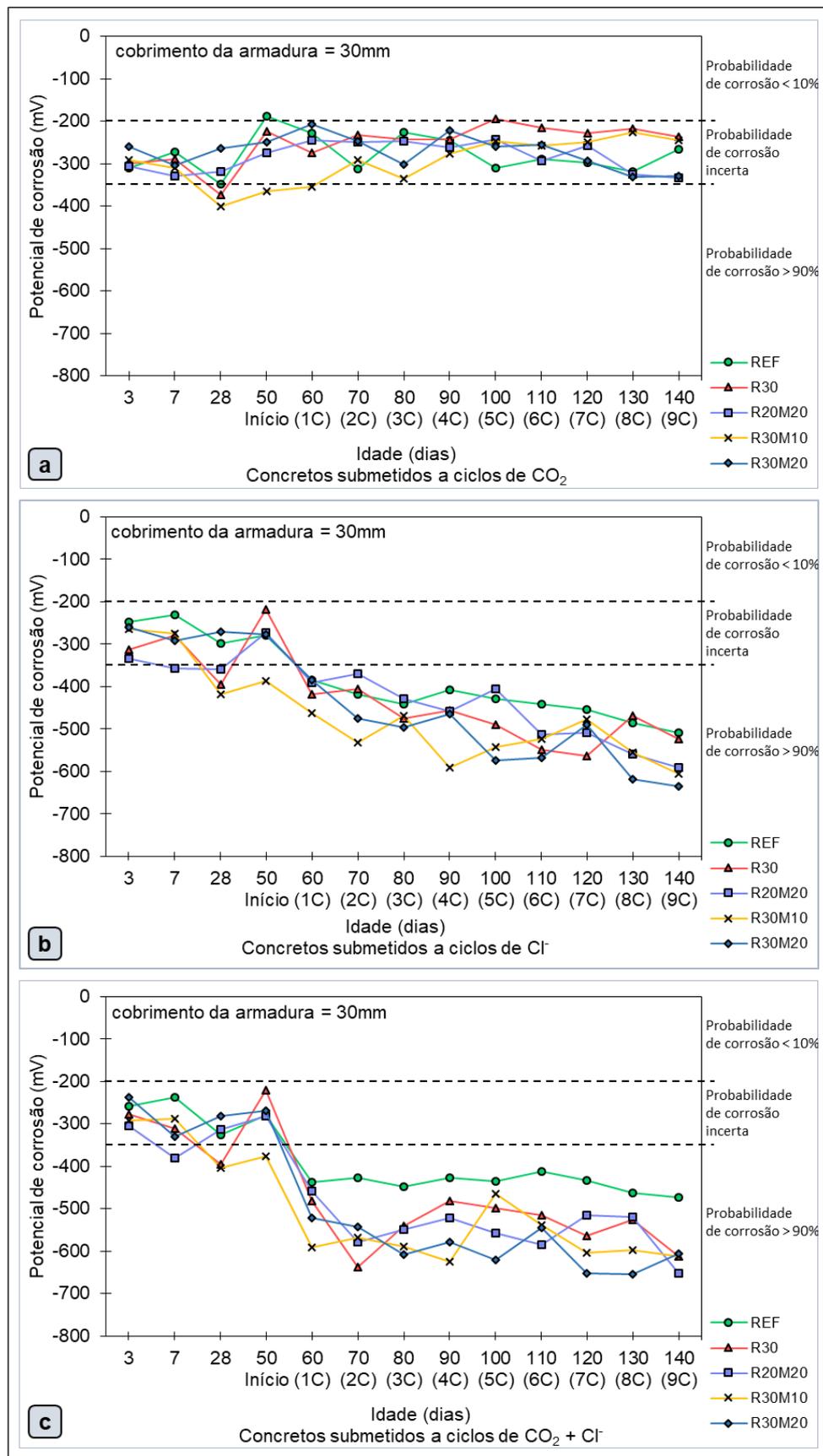


Figura 4.29 - Potencial de corrosão do aço nos CAAs com cobrimento de 30mm, nas primeiras idades e após submetidos aos ambiente agressivos: (a) sob carbonatação; (b) sob cloreto; (c) ação combinada de carbonatação e cloreto.

Em todas as situações, na transição de 28 dias para 50 dias, houve um aumento no potencial de corrosão dos concretos. Este fato se deve a menor umidade que os concretos estavam na data de ensaio. Nos primeiros 28 dias, os concretos estavam submersos em água por todo o tempo, após esse período, eles ficaram expostos ao ar em ambiente laboratorial sendo submersos em água por 3 horas antes de realizar o ensaio, tempo este que não é capaz de saturar por completo a amostra. Porém, seria inviável esperar a saturação completa dos corpos de prova, visto que não teria tempo hábil para quando fossem iniciados os ciclos. Por esse motivo, padronizou-se o tratamento prévio de apenas 3 horas de imersão em água tanto no ensaio de resistividade, quanto no de potencial de corrosão e o de velocidade de pulso ultrassônico.

Percebe-se ainda que o ataque por íons cloreto acontece de forma bem mais severa do que a carbonatação. Vale destacar que a susceptibilidade a carbonatação é considerada por muitos autores (ATIŞ, 2003; HAN-SEUNG; WANG, 2016; KHALIL; ANWAR, 2015; KULAKOWSKI; PEREIRA; MOLIN, 2009; MERAH; KROBBA, 2017; RIBEIRO; SANTOS; GONÇALVES, 2018; SISOMPHON; FRANKE, 2007; etc) como o principal problema dos concretos com baixo teor de cimento, ocasionando assim uma maior probabilidade de corrosão nesse tipo de estrutura quando estes são submetidos a tal situação. No entanto, verifica-se pela análise da Figura 4.28 e Figura 4.29 que a carbonatação é bem menos severa que o ataque por cloretos puro. E ainda, que ação de cloretos puro é tão severa como a ação combinada de CO₂ e Cl⁻.

Para analisar os potenciais de corrosão de forma mais precisa inerente a influência de cada ambiente de agressividade nas misturas em estudo, optou-se por fazer gráficos apenas com os valores de potencial obtidos nos 3 ciclos de agressão intermediários de cada tipo de exposição: 3º ciclo [3C], 6º ciclo [6C] e 9º ciclo [9C]. Desse modo, reduz a variação vista nas imagens anteriores, bem como a quantidade de valores, tornando a análise mais enxuta e precisa.

A Figura 4.30 apresenta a evolução do potencial de corrosão das misturas, com cobrimento de 15mm (a) e cobrimento de 30mm (b), quando submetidos a ciclos de exposição em CO₂.

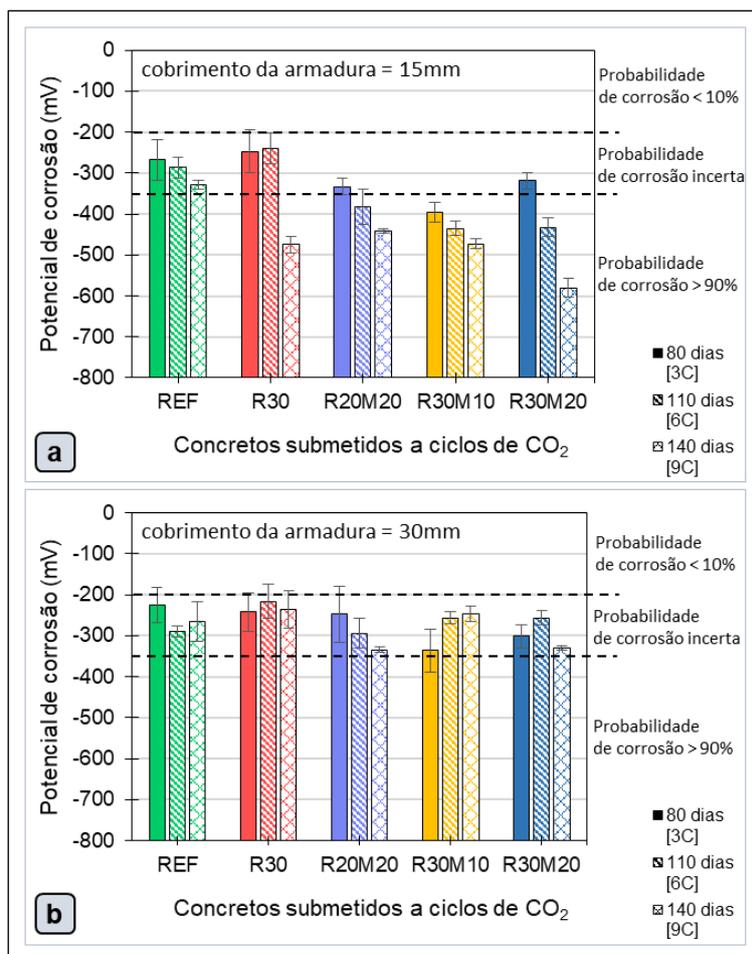


Figura 4.30 - Potencial de corrosão dos CAAs submetidos a carbonatação acelerada - (a) cobrimento de 15mm e (b) cobrimento de 30mm.

Pode ser visto, comparando a situação ilustrada (a) e (b) da Figura 4.30 que quando o cobrimento é de apenas 15mm a carbonatação impacta com maior intensidade nos concretos com adições. Porém, esse problema pode ser corrigido através do aumento da espessura dessa camada. Enquanto, quando o cobrimento é de 30mm, espessura essa indicada para pilares e vigas em atmosfera marinha em um ambiente interno e protegido de acordo com classe de agressividade II da NBR 6118 (ABNT,2014), os CAAs com adições minerais, mesmo o R30 composto apenas com RBC em substituição ao cimento, apresentam comportamento equivalente ao traço referência. Vale destacar que os traços com adições minerais possuem redução de 30% a 50% da quantidade de cimento que o traço referência, apresentando consumos de cimento de 303,57 kg/m³, quando a redução foi de 50%, e 260,00 kg/m³, quando a redução foi de 40% e 215,74 kg/m³ para redução de 50%.

Kurda, Brito e Silvestre (2019) analisando concretos com cinza volante e agregado reciclado indicam como possível solução para melhorar a resistência desses tipos de concreto à carbonatação, aumentar a camada de cobrimento de concreto e assim obter uma vida útil equivalente à do concreto referência.

Aguirre-Guerrero, Mejía de Gutiérrez e Montês-correia (2016) observaram que os concretos que apresentaram metacaulim e sílica ativa na composição, quando submetidos a ciclos de carbonatação acelerada, apresentaram uma redução no potencial de corrosão mais cedo do que o traço referência, causando uma maior probabilidade de corrosão em relação ao traço referência apenas com cimento. Também foi observado um avanço na profundidade de carbonatação de forma mais acentuada nos concretos com adição mineral.

Nicolas, Cyr e Escadeillas (2014) afirmam que a porosidade aberta é necessária para promover a carbonatação no concreto, o que permite a difusão do CO₂ e a reação química entre o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono. Um concreto que possui maior conteúdo de portlandita é menos suscetível à carbonatação, enquanto maiores profundidades de carbonatação são obtidas para concretos que são misturados com adição mineral, no qual a portlandita é parcialmente consumida nas reações pozolânicas.

A segunda situação a ser analisada em relação ao potencial de corrosão é quando os concretos são submetidos a exposição em Cl⁻. A Figura 4.31 apresenta a evolução do potencial de corrosão das misturas, com cobrimento de 15mm (a) e cobrimento de 30mm (b), quando submetidos a ciclos de imersão e secagem em cloretos.

Nessa situação o potencial de corrosão sofreu variações de forma mais acentuada do que quando os CAAs são submetidos a carbonatação, tal comportamento era esperado, visto que, como as literaturas anteriores discutiram, o ataque por cloreto ocorre de forma mais severa. O cobrimento de 30 mm, para os dados fornecidos nesse ensaio, não apresentou tanta eficácia em combater o avanço da corrosão. Além disso, o ensaio de resistividade elétrica e penetração de cloreto corrobora com os resultados obtidos no ensaio de potencial de corrosão onde é perceptível a maior susceptibilidade à corrosão neste tipo de ambiente.

A Figura 4.31 apresenta os valores de potencial de corrosão dos CAAs quando submetidos a ciclos de imersão e secagem em solução salina.

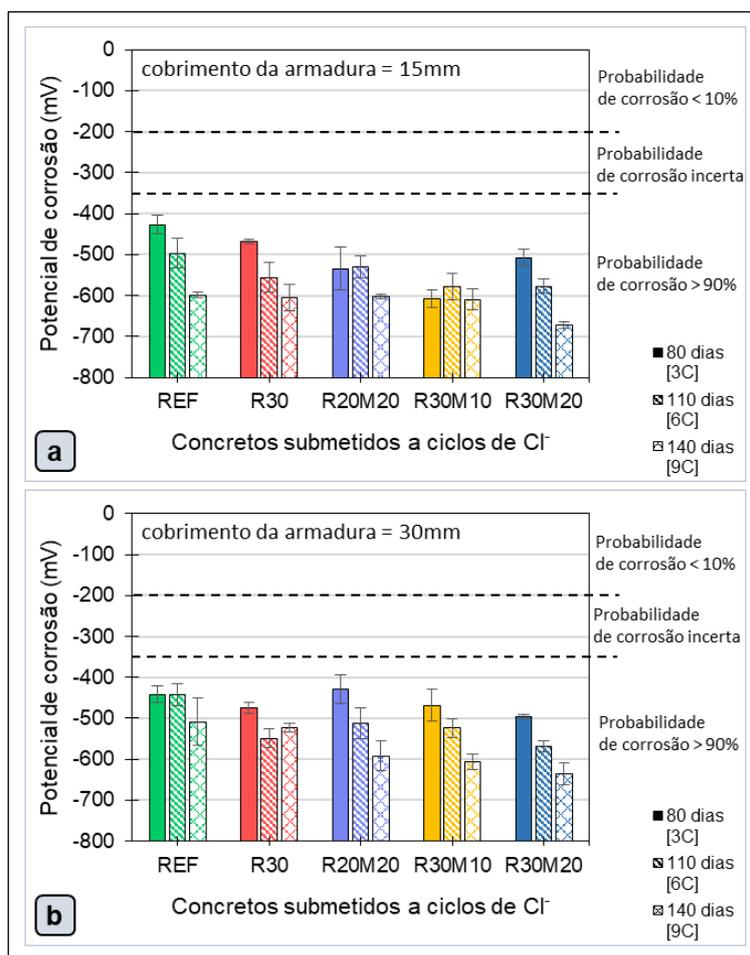


Figura 4.31 - Potencial de corrosão dos concretos submetidos a ciclos de imersão e secagem em cloreto - (a) cobrimento de 15mm e (b) cobrimento de 30mm.

Observando a Figura 4.31 é possível identificar que, no terceiro ciclo de agressão, todas as composições apresentam probabilidade de corrosão superiores a 90%, independente da espessura da camada de cobrimento. As composições com adições minerais apresentaram praticamente o mesmo comportamento do traço referência, ou seja, todos tiveram impacto negativo na probabilidade de corrosão com o aumento dos ciclos de cloreto.

Ratificando os resultados obtidos nesse trabalho, Medeiros *et al.* (2017) afirmam, após analisar a influência de cloreto no potencial de corrosão de concretos, que há uma tendência de valores de potencial de corrosão mais negativos nos casos em que o concreto está contaminado com 1% de cloretos em relação à massa de cimento. Isto pode ser afirmado com 95% de significância tanto para o cobrimento de 1 cm como para o de 3 cm. Este comportamento é

explicado pela tendência de elevação da condutividade elétrica proveniente dos íons cloretos no concreto, assim como a atividade de corrosão proporcionada pela presença destes íons, rompendo a película passivadora e instalando o processo de corrosão das armaduras.

Apesar de, no ensaio de penetração de cloreto, os CAAs com metacaulim e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar terem apresentado melhor comportamento em relação ao concreto referência, no ensaio de potencial de corrosão, não foi possível identificar grandes diferenças entre eles.

Analisando o efeito combinado da carbonatação e cloreto no potencial de corrosão dos concretos autoadensáveis, Figura 4.32, é observado uma maior eletronegatividade no potencial de corrosão com o avançar dos ciclos. Confirmando em uma probabilidade de corrosão maior que 90%.

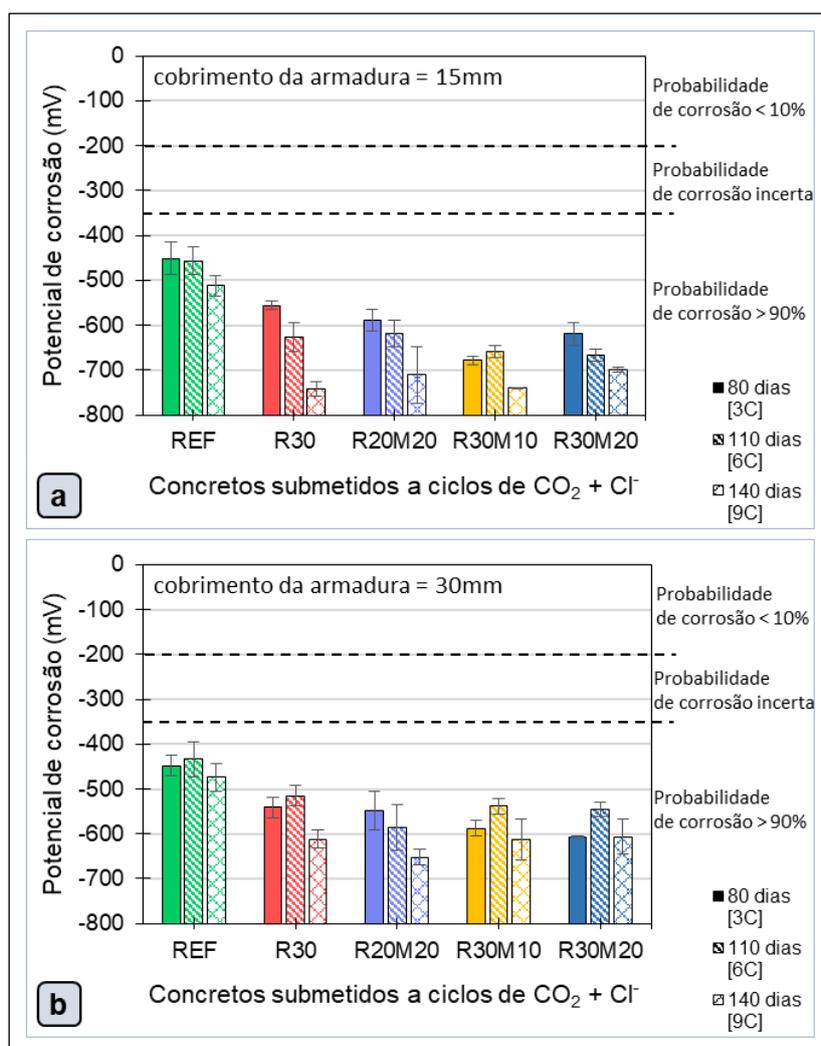


Figura 4.32 - Potencial de corrosão dos concretos submetidos à ação combinada de carbonatação e cloreto - (a) cobrimento de 15mm e (b) cobrimento de 30mm.

Assim como na situação em que estavam expostos apenas a carbonatação, na exposição combinada o maior impacto no potencial de corrosão ocorreu na situação de menor cobrimento. Ratificando ser fundamental reforçar a camada de cobrimento dos concretos com baixos consumos de cimento e com presença de adições minerais em sua composição quando estes estão submetidos a ambientes com CO_2 .

Como pode ser visto, no terceiro ciclo de agressão, todas as composições apresentam probabilidade de corrosão maior que 90%. Apesar de todas as misturas apresentarem um aumento da eletronegatividade com o maior tempo em que estão expostos a combinação de carbonatação e cloreto, os traços com adições minerais sofreram um maior impacto em relação ao traço referência, diferentemente do ataque apenas por cloreto, em que todos os traços sofreram praticamente as mesmas consequências. Esse comportamento corrobora com os resultados de penetração de cloreto na qual os traços com metacaulim apresentaram uma maior penetração quando submetidos ao ataque misto de CO_2 e Cl^- , como pode ser verificado na Tabela 4.11.

Como mencionado anteriormente, as misturas de concreto com metacaulim promovem a formação do sal de Friedel em maior quantidade. Porém, a estabilidade deste composto é dependente da alcalinidade do concreto. Como resultado, a solubilidade do sal de Friedel aumenta com o grau de carbonatação e uma diminuição no pH do concreto. Estes resultados demonstram a competição entre o efeito da carbonatação, a reação pozolânica e a difusão de íons cloreto dentro do concreto (FRÍAS; GOÑI, 2013).

Aguirre-Guerrero, Mejía de Gutiérrez e Montês-correia (2016) ao analisarem a intensidade de corrosão de concretos expostos a carbonatação e cloreto, observaram que, em geral, um aumento na corrente de corrosão é observado em todos os casos. Porém, os traços com metacaulim mostram um aumento na corrente de corrosão que é aproximadamente 5 vezes a corrente de corrosão do concreto referência apenas com cimento.

Este fato pode ser explicado devido à maior suscetibilidade à carbonatação de amostras que contém metacaulim e, portanto, à solubilidade de algumas espécies carbonatadas, que aumentam a porosidade do concreto, constituindo um caminho para a entrada de íons cloreto até as barras de aço e

iniciar a corrosão, como discutido anteriormente por Saillio, Baroghel-bouny e Barberon (2014).

Para misturas de concreto com cinzas volantes que foram expostos a carbonatação e cloretos, Kuosa *et al.* (2014) e Montemor *et al.* (2002) observaram que a camada superficial carbonatada aumenta a profundidade de migração de cloro, conseqüentemente, tornando-os mais suscetíveis a corrosão, o que é consistente com os concretos com adições minerais testados neste trabalho.

4.4.9 Absorção de água por capilaridade

No concreto existe uma relação direta entre a durabilidade, absorção de água e porosidade. O aumento da porosidade do concreto levará a uma maior absorção de água. Além disso, os poros da mistura atuam como uma rede para a passagem de água e outros líquidos indesejáveis, como cloreto, CO₂, etc.

A absorção de água por capilaridade é um dos fatores que auxiliam para entender o desempenho de durabilidade do concreto, pois está sujeito a muitos ambientes agressivos que podem afetar seus componentes devido à penetração do sistema poroso que absorve água ou outros líquidos pela capilaridade ascendente (KURDA; BRITO; SILVESTRE, 2019). A finura dos poros capilares no concreto causa a absorção de água pela ação capilar. Portanto, uma medida da taxa de absorção fornece uma indicação útil da estrutura porosa do concreto (KHATIB; CLAY, 2004).

A Figura 4.33 apresenta a absorção de água por capilaridade dos traços aos 28 dias antes de iniciarem a exposição a CO₂ e Cl⁻.

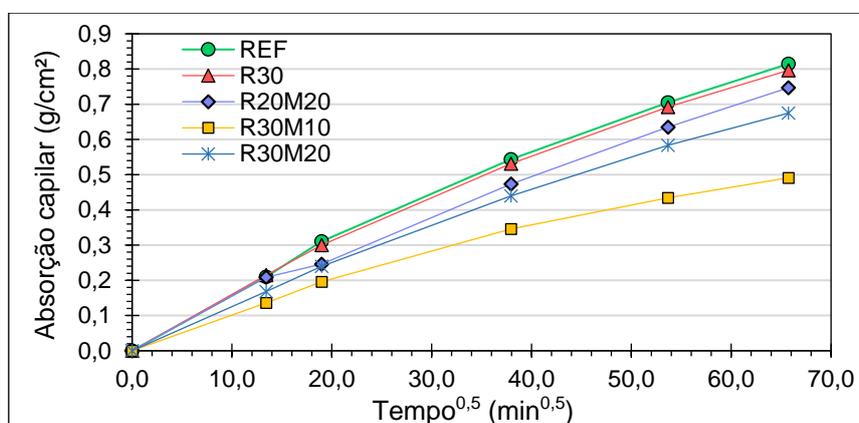


Figura 4.33 - Absorção de água por capilaridade dos CAAs aos 28 dias.

Percebe-se que os traços com adições minerais apresentam menor absorção capilar do que o traço referência, principalmente os que possuem metacaulim em sua composição. Isso ocorre, devido um refinamento dos poros causado pelas adições minerais que, como apresentado na análise da granulometria à laser, possuem menores tamanhos de partículas.

O traço R30 apresentou praticamente a mesma absorção capilar em relação ao traço REF. Uma possível explicação seria o menor consumo de cimento atrelado ao uso apenas do RBC, que possui baixa atividade pozolânica. Além disso, segundo Chi (2012) a cinza do bagaço da cana também apresenta uma natureza higroscópica. Desse modo, existe uma tendência de as reações de consolidação da microestrutura ocorrerem de forma mais lenta do que os demais traços que possuem metacaulim.

Por sua vez, os traços com metacaulim apresentam um melhor desempenho no refinamento da estrutura em relação ao RBC, pois, segundo Kannan e Ganesan (2014), o metacaulim, devido possuir uma elevada reatividade pozolânica, produz C-S-H adicional ocasionando a redução do tamanho dos poros e, conseqüente, redução na absorção capilar.

Gill e Siddique (2018) confirmam em seu trabalho que a absorção de água e a porosidade das misturas contendo metacaulim e cinza da casca do arroz foram reduzidas em relação à mistura de referência. Também houve diminuição da porosidade à medida que o período de cura foi aumentado. As reações pozolânicas e o aumento da taxa de hidratação podem ser as justificativas para essa mudança.

A Figura 4.34 apresenta a variação que os ambientes agressivos geraram na absorção capilar dos traços em estudo.

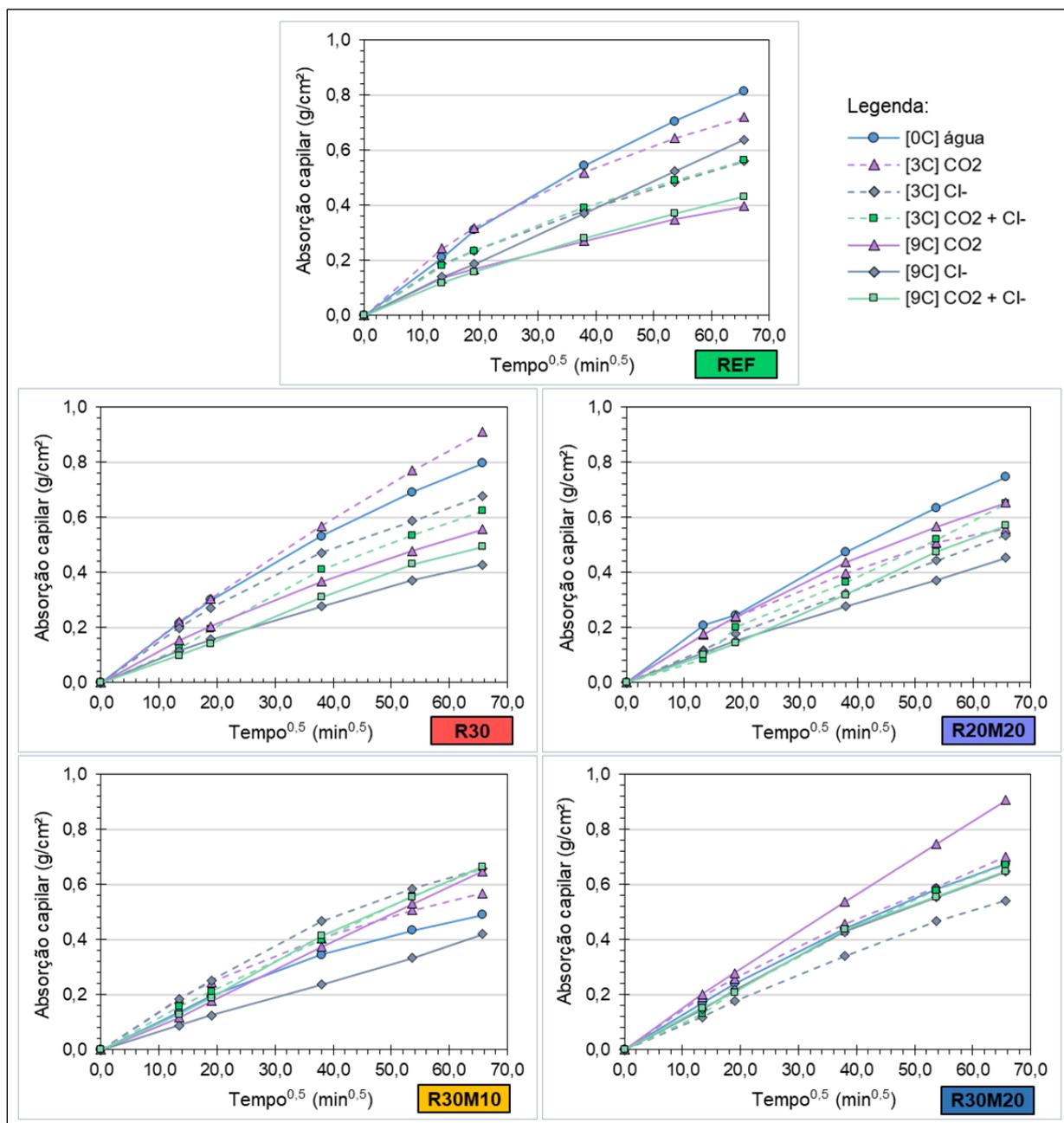


Figura 4.34 - Absorção de água por capilaridade dos CAAs antes e após serem submetidos aos ciclos de agressividade

Diante da quantidade de resultados, os gráficos de absorção capilar ficaram pouco legíveis, visto que algumas curvas ficaram sobrepostas. Devido este motivo, para analisar de forma mais precisa qual a influência das adições e dos ambientes agressivos nos concretos autoadensáveis, foram elaborados gráficos que apresentam o coeficiente de capilaridade. Este é calculado através da inclinação da curva de absorção de água por capilaridade entre o tempo inicial até às 6h.

A Figura 4.35 apresenta os coeficientes de capilaridade das misturas antes e após terem sido submetidas aos ambientes agressivos: (a) apenas carbonatação; (b) apenas cloreto e (c) ação conjunta de CO₂ e Cl⁻.

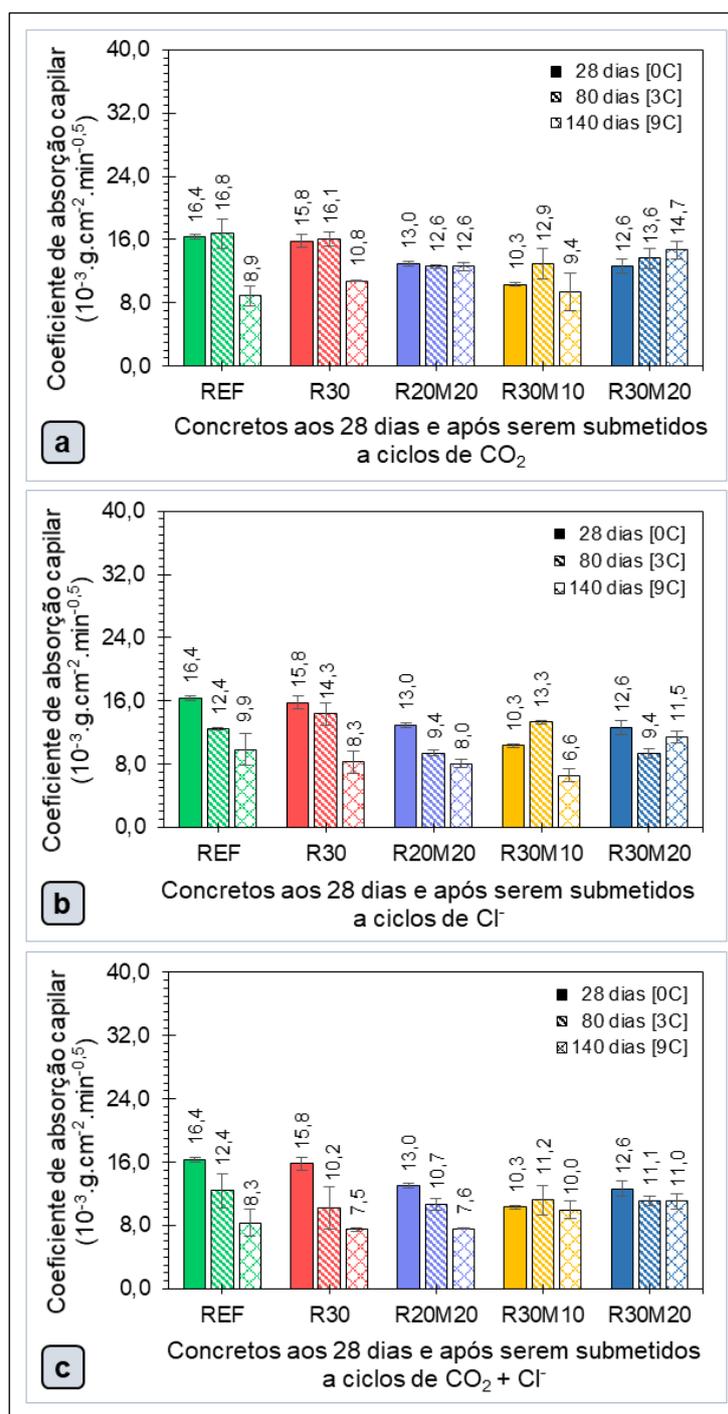


Figura 4.35 - Coeficiente de absorção capilar dos CAAs antes e após exposição aos ciclos de agressividade: (a) CO₂; (b) Cl⁻ e (c) CO₂ + Cl⁻.

Percebe-se que todos os ambientes agressivos causaram, de uma forma geral, uma leve redução na absorção capilar dos concretos autoadensáveis. Isso

se deve aos produtos formados através do processo de carbonatação e entrada de cloretos provocarem uma redução na quantidade de poros do sistema.

Camacho *et al.* (2016) afirmam que a densificação da mistura através da formação do CaCO_3 causado pela a entrada de CO_2 pode ser uma forma de mitigação da entrada de outros agentes agressivos, como os íons cloreto.

Esse fenômeno também ocorreu nos concretos de Xuan, Zhan e Poon (2017) onde as amostras carbonatadas obtiveram porosidades inferiores. Os autores também afirmam, através da análise da microscopia eletrônica, a conversão dos produtos comuns de hidratação do cimento como o Ca(OH)_2 , C-S-H e etringita em cristais de carbonato que se apresentam em tamanhos maiores (aragonita e calcita). Eles encheram os poros maiores e a microestrutura tornou-se mais densa.

Assim como acontece na carbonatação, Kuosa *et al.* (2014) concluíram que os poros do concreto também podem ser bloqueados como resultado da cristalização de sal de Friedel formado pela reação com o cloreto penetrado na rede de poros do concreto.

4.4.10 Índice de vazios e absorção de água por imersão

O índice de vazios e a absorção de água por imersão são propriedades ligadas entre si. A primeira expressa a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, ou seja, a porosidade acessível à água do concreto, conhecida também como porosidade aberta. Por sua vez, a absorção por imersão representa a relação entre a quantidade de água que é possível adentrar pela superfície do corpo-de-prova quando este encontra-se submerso totalmente em água e a sua respectiva massa seca. Desse modo, ambas avaliam a dificuldade ou não que a água tem de permear pela estrutura porosa do concreto. Por tal fato, decidiu-se apresentar as duas propriedades em um único tópico.

A Figura 4.36 apresenta os valores de índice de vazios e absorção de água por imersão dos CAAs antes e após serem expostos aos ambientes agressivos em estudo. Na maioria dos traços existe uma tendência de redução no valor dessas propriedades ao final dos ciclos aos quais estavam submetidos.

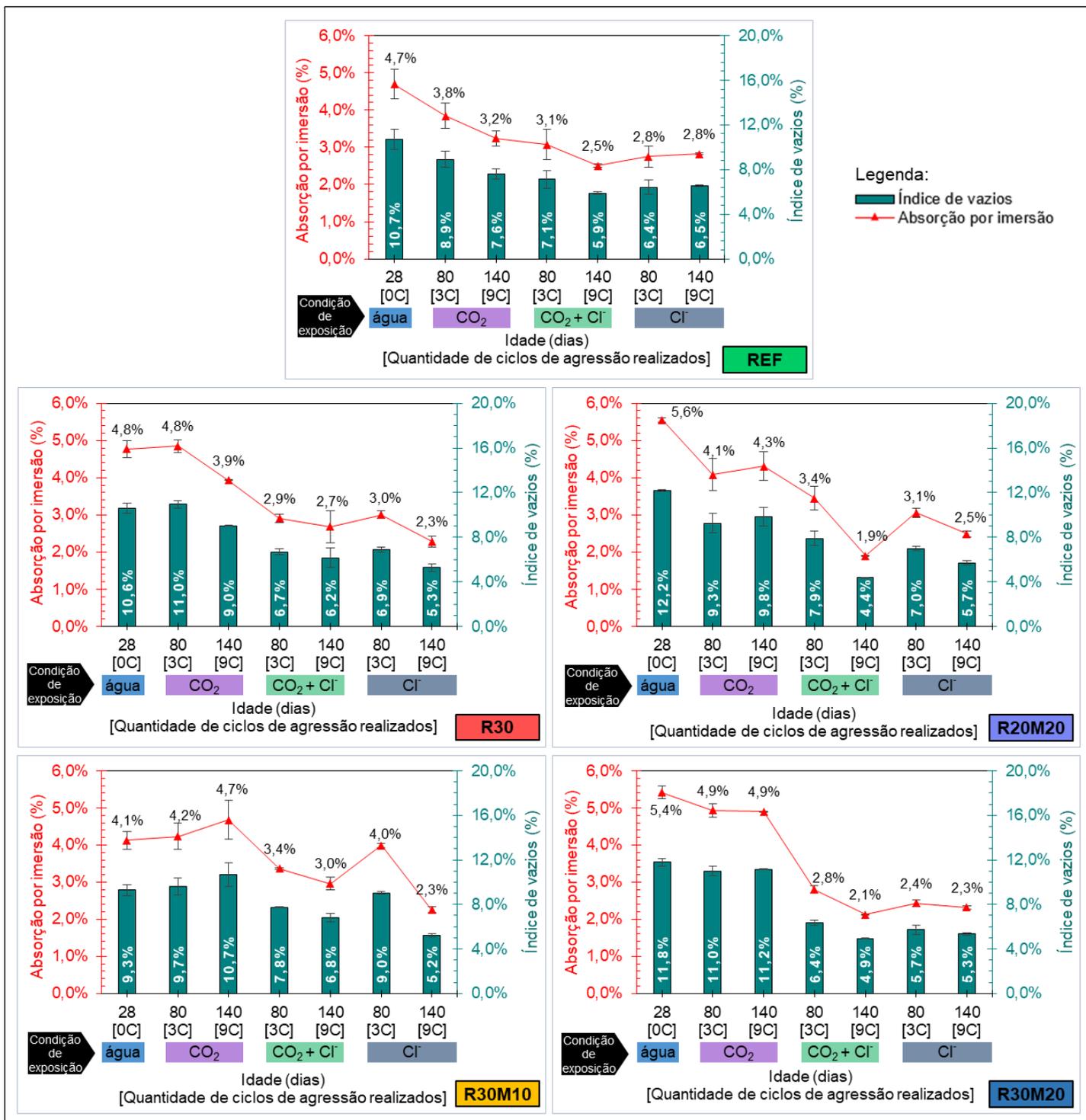


Figura 4.36 - Absorção por imersão e índice de vazios dos CAAs antes e após serem submetidos aos ciclos de agressividade.

Para todas as composições o ambiente de menor influência é quando os CAAs estão submetidos a ação independente do CO₂. Em compensação, para o traço R30 e R30M10 a que gera uma maior diminuição é quando expostos a cloreto puro. Para o traço REF, R20M20 e R30M20 a combinação de

carbonatação e cloreto apresenta uma redução mais significativa da porosidade aberta e absorção por imersão.

Diante do comportamento disperso dos concretos autoadensáveis analisados, não foi possível averiguar de forma mais detalhada a influência das adições e dos tipos de ambientes agressivos na variação da porosidade aberta e da absorção por imersão. Apesar de que, assim como em absorção por capilaridade, existe uma maior influência na porosidade devido a penetração de cloreto, principalmente quando os CAAs estão submetidos a ação combinada e independente de CO₂ e Cl⁻.

4.4.11 Análise das massas específicas

De acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005) foram obtidas as massas específicas real, seca e saturada. As três correlacionam a massa e o respectivo volume do corpo de prova. Como a própria norma explicita, o valor obtido é uma aproximação, visto este não ser um ensaio de precisão. Portanto, não é capaz de, através dele, perceber pequenas variações nas massas específicas do material.

A Figura 4.37 apresenta os valores das massas específicas para cada mistura antes e após o ataque por íons cloreto e carbonatação de forma individual e combinada.

Percebe-se que não foi possível atestar variação entre as massas específicas em nenhuma das situações analisadas. Todavia, como mostrado nos ensaios de índices de vazios e absorção por imersão, houve uma variação na porosidade, logo, esperava-se também que as massas específicas tivessem variado. Porém, devido à baixa significância da variação sofrida na porosidade, são necessários ensaios de maior exatidão para averiguar a mudança nas massas específicas.

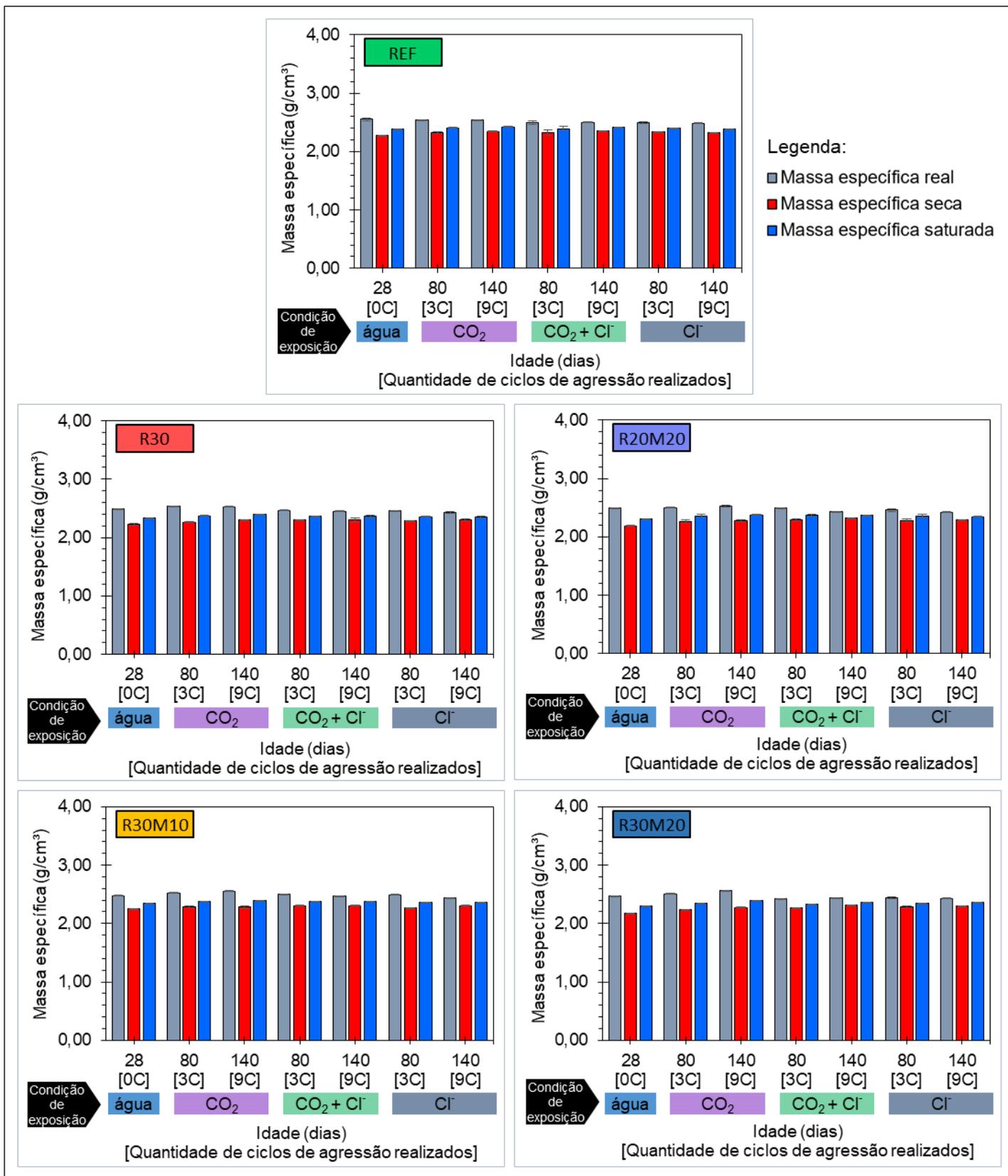


Figura 4.37 - Massas específicas no estado endurecido dos CAAs antes e após expostos a CO₂ e Cl⁻ de forma individual e combinada.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em função dos resultados apresentados e discutidos acerca da influência de altos teores de metacaulim e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, em substituição parcial do cimento, em concretos autoadensáveis. Como também, do comportamento destes perante a ação da carbonatação e íons cloreto de forma individual e combinada, expõe-se a seguir as principais conclusões:

- O uso das adições minerais, resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim tendem a aumentar a viscosidade e coesão do concreto autoadensável, fazendo com que haja uma maior necessidade de aditivo superplastificante para atingir o espalhamento de mesma classificação do traço apenas com cimento.

- Em relação a resistência à compressão dos CAAs quando expostos apenas a cura normal em água, houve uma leve redução quando foi reduzido a quantidade de cimento e incorporado as adições minerais, porém, ainda foi possível produzir CAAs de alta resistência, acima de 40MPa. Desse modo, constata-se ser possível produzir concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e resistência mecânica de boa qualidade através do uso de metacaulim e RBC em substituição ao cimento.

- Acerca da eficiência do consumo de cimento versus resistência mecânica, o traço referência foi o que apresentou o pior desempenho necessitando de 8,19 quilos de cimento para cada unidade de resistência. Por sua vez, o traço R30M20. com 30% de RBC e 20% de MK em substituição ao cimento, precisou de apenas 5,17 quilos de cimento para cada um megapascal de resistência adquirida. Todos os traços com adições apresentaram melhores eficiências, mostrando que a redução de cimento não é diretamente proporcional à redução da resistência à compressão.

- Como esperado, a penetração de CO₂ quando os concretos estão submetidos ao efeito individual da carbonatação acontece de forma mais

marcante nos traços com adições minerais, RBC e MK. Porém, a variação da porcentagem das adições minerais em substituição ao cimento, de 30% a 50%, teve pouca influência na profundidade de penetração ao final dos ciclos. A frente de penetração de carbonatação é menor quando as misturas são expostas a combinação de CO_2 e Cl^- , sendo a redução mais significativa na composição REF. Quando as amostras estavam submetidas apenas a cloreto não houve frente de penetração de carbonatação.

- Quando submetidos apenas a Cl^- , a penetração de cloreto foi menor nas composições com resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim em conjunto. A maior penetração ocorreu no traço apenas com RBC devido a sua atividade pozolânica limitada e menor quantidade de cimento da composição. Na exposição mista de CO_2 e Cl^- , houve um aumento na profundidade de cloreto nos traços que possuem metacaulim em sua composição e no traço REF e R30, sem metacaulim, houve uma redução da frente de cloreto livre. Quando os CAAs foram submetidos apenas a carbonatação não houve frente de penetração de cloreto.

- Na difusão de íons cloreto, aos 28 dias, o melhor desempenho foi do concreto referência. Entretanto, com 200 dias, o melhor desempenho foi dos traços com metacaulim, afirmando a necessidade de um maior tempo para a consolidação da microestrutura e a maior colaboração na ligação de cloreto causada pelo metacaulim, o que reduz a quantidade de cloreto livre. Quando os concretos estão expostos a CO_2 e Cl^- , no traço REF e R30, acontece uma redução na difusão de íons cloreto com o aumento do tempo de exposição ao ambiente agressivo de $\text{CO}_2 + \text{Cl}^-$, por sua vez, nos concretos com metacaulim, há um aumento da difusão de cloreto.

- A carbonatação não influenciou na resistência à compressão dos concretos autoadensáveis. Quando submetidos ao ataque em conjunto do CO_2 e Cl^- há uma redução acentuada na resistência à compressão do traço REF e do traço R30M20. O uso do metacaulim foi benéfico para a manutenção da resistência mecânica dos CAAS quando submetidos ao ataque por íons cloreto. De modo geral, as adições não causaram impacto negativo nas resistências à compressão dos CAAs em situações de agressividade, visto que o concreto referência também sofreu redução.

- Existe uma correlação entre resistência à compressão e velocidade de pulso ultrassônico. Nas primeiras idades, com o avançar do tempo, houve um aumento da velocidade do pulso ultrassônico (VPU). Todavia, a taxa de aumento da VPU foi mais lenta do que a observada na resistência à compressão. Os traços com adições minerais apresentam uma velocidade do pulso ultrassônico inferior ao traço referência. Sendo o REF e o R30, a partir dos valores de VPU, considerados concretos de excelente qualidade e os demais considerados de muito boa qualidade de acordo com a BS EN 12504-4 (British Standards, 2000). Todos os concretos autoadensáveis tiveram uma leve redução, considerada insignificante, na VPU quando expostos a carbonatação e cloreto de forma individual e combinada.

- Não é observado uma relação direta entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica. A resistividade elétrica vai aumentando dos 3 até os 50 dias, sendo o aumento mais marcante nos traços com adições minerais. Percebe-se também a influência da umidade na resistividade elétrica. Todas as composições, aos 50 dias, possuem risco moderado de corrosão. A carbonatação causa um aumento na resistividade elétrica. Entretanto o ataque por íons cloreto causa sua redução, sendo mais enfática quando os CAAs estão submetidos a ação combinada de CO_2 e Cl^- .

- Quanto ao ensaio de potencial de corrosão, todas as misturas, na primeira idade de ensaio, apresentaram valores de potencial aproximados, comprovando que o tratamento de limpeza das barras de aço foi eficiente e todos as amostras ficaram com a classificação de risco de corrosão incerto. Quando o cobrimento foi de 15mm, a carbonatação teve influência mais negativa nos traços com adições minerais. Contudo, esse efeito foi reduzido com o aumento da camada de cobrimento. Para uma camada de cobrimento igual a 30mm, os CAAs com RBC e MK, mesmo com menor consumo de cimento, apresentaram comportamento semelhante ao traço REF. Por sua vez, em relação ao ataque individual por Cl^- , todos os concretos sofrem grande impacto negativo no potencial de corrosão, não sendo possível definir, baseando-se apenas do ensaio de potencial de corrosão, a real contribuição das adições minerais na minimização dos efeitos deletérios causados pelo cloreto. A situação combinada

de carbonatação e cloreto é considerado o ambiente de maior agressividade pois provocaram a probabilidade de corrosão maior que 90% em todos os traços.

- Aos 28 dias, a absorção de água por capilaridade foi menor nos traços com adições minerais, principalmente nos que contém metacaulim. O traço apenas com resíduo de biomassa da cana-de-açúcar apresentou praticamente a mesma absorção capilar do traço REF. Tanto a carbonatação, quanto o ataque por cloreto causaram uma diminuição do coeficiente da absorção capilar, indicando que os produtos formados pela exposição aos ambientes agressivos e os produtos de hidratação da pasta cimentícia tendem a diminuir a porosidade total dos concretos autoadensáveis analisados.

- O índice de vazios e a porosidade aberta tendem a reduzir com o ataque por carbonatação e cloreto devido à formação dos novos produtos. Percebe-se que o ataque por cloreto provoca uma maior influência nessa propriedade. Os traços não seguiram uma mesma tendência de variação, impossibilitando identificar a real contribuição do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e do metacaulim.

- No ensaio de massa específica de acordo com NBR 9778 (ABNT, 2005) não é possível identificar a variação ocorrida pelos ambientes agressivos e a incrementação das adições minerais.

Desse modo, com base nos resultados obtidos para os concretos autoadensáveis analisados, pode-se concluir que é possível produzir concretos com baixos consumos de cimento através da utilização de RBC e MK. Sendo, portanto, uma alternativa de maior sustentabilidade para a produção de CAAs.

Quanto ao comportamento dos concretos autoadensáveis em estudo relacionadas a corrosão, o incremento das adições minerais causa prejuízo aos CAAs quando estes são submetidos à carbonatação, tornando o aço embutido no concreto susceptível à corrosão mais cedo do que o traço referência. Porém, uma forma de compensar esse prejuízo é aumentar a camada de cobertura de modo a atender, no mínimo, as especificidades da classe de agressividade II da NBR 6118 (ABNT,2014).

No ataque por cloreto, todos os concretos foram fortemente agredidos, mas, as adições minerais melhoram as propriedades de difusão e penetração de íons cloreto dos CAAs.

A situação de ataque combinado de carbonatação e íons cloreto, apesar de reduzir a frente de penetração de CO_2 , causa um aumento na quantidade de cloreto livre. Assim sendo, esta é considerada a situação de maior severidade para as composições com incorporação de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE-GUERRERO, Ana María; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby; MONTÊS-CORREIA, Maria João Ribeiro. Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 121, p.704-716, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.038>.

AKRAM, Tayyeb; MEMON, Shazim Ali; OBAID, Humayun. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.703-712, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.012>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-876**: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelphia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1-03**: Standard practice for preparing, cleaning and evaluation corrosion test specimens. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G57**: Standard Test Method for Field Measurement Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. West Conshohocken, PA, 2012.

ANJOS, M. A. S. *et al.* **Avaliação da durabilidade de concretos autoadensáveis com reduzido teor de cimento e elevados teores de adições minerais**. In: Anais do XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção – CONPAT, 2015, Lisboa, Portugal.

ANJOS, M. A. S.; FERREIRA, D. F.; BORJA, E. V. Influência da finura do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar na atividade pozolânica com a cal. **Holos**, [s.l.], v. 2, p.44-57, 19 maio 2012. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2012.779>.

ANJOS, Marcos A.s. *et al.* Hydration of oil well cement containing sugarcane biomass waste as a function of curing temperature and pressure. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [s.l.], v. 109, p.291-297, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.016>.

ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm W.; LAKE, Neal. Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 151, p.692-703, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.136>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: Concreto autoadensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-6**: Concreto autoadensável - Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Métodos da coluna de segregação e da peneira. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2001. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2013. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica - índice de atividade pozolânica com cal - Método de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2013. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2012. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2013. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2009. 8 p.

ASSOULI, B.; BALLIVY, G.; RIVARD, P. Influence of environmental parameters on application of standard ASTM C876- 91: half cell potential measurements. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v.43, n.1, 2008, p. 93-96.

ATIŞ, Cengiz Duran. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 17, n. 3, p.147-152, abr. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618\(02\)00116-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618(02)00116-2).

BACARJI, E. *et al.* Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 45, p.1-10, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>.

BADOGIANNIS, Efstratios G. *et al.* Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 82, p.133-141, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.023>.

BONNET, Stéphanie; BALAYSSAC, Jean-paul. Combination of the Wenner resistivity meter and Torrent permeameter methods for assessing carbonation depth and saturation level of concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 188, p.1149-1165, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.151>

BOUKHELKHAL, Aboubakeur *et al.* 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**, [s.l.], v. 197, p.307-318, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.233>.

BRANCH, J.I. *et al.* The impact of carbonation on the microstructure and solubility of major constituents in microconcrete materials with varying alkalinities due to fly ash replacement of ordinary Portland cement. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 89, p.297-309, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.019>.

British Standards EN 12504-4:2004. **Testing concrete**. Determination of ultrasonic pulse velocity. United Kingdom, 2004.

BURGOS, Diana M. *et al.* Chloride ion resistance of self-compacting concretes incorporating volcanic materials. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 156, p.565-573, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.017>.

CAMACHO, Gustavo; MALHEIRO, Raphaele; CAMÕES Aires; MEIRA Gibson. **Ação Combinada da Carbonatação e dos Iões Cloreto em Betões com Cinzas Volantes**. In: II Congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis, 2016, João Pessoa, Brasil.

CARDOSO, Ariane da Silva *et al.* Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa como Substituição Parcial do Cimento em Argamassas Contra Ação de CO₂ e Íons Cloreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, [s.l.], v. 2, n. 3, p.167-175, 28 ago. 2017. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada. <http://dx.doi.org/10.25286/repa.v2i3.714>.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**. Coedição, São Paulo: Ed. PINI, Goiânia: Ed. UFG, 1997.

CELIK, K. *et al.* High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 45, p.136-147, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.003>.

CHI, Mao-chieh. Effects of sugar cane bagasse ash as a cement replacement on properties of mortars. **Science and Engineering Of Composite Materials**, [s.l.], v. 19, n. 3, p.279-285, 1 jan. 2012. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/secm-2012-0014>.

CHOPRA, Divya; SIDDIQUE, Rafat; KUNAL. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 130, p.72-80, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.005>.

CHUSILP, Nuntachai; JATURAPITAKKUL, Chai; KIATTIKOMOL, Kraiwood. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 11, p.3352-3358, nov. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.030>.

CONSELHO NACIONAL DE ABASTECIMENTO -CONAB. (Org.). **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar: 3º levantamento**. v.5 - Safra 2018/19, n. 3 - Brasília, p. 1-71, dezembro de 2018. ISSN: 2318-7921. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 23 fev. 2019.

CORDEIRO, G.C.; TAVARES, L.M.; TOLEDO FILHO, R.D.. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 89, p.269-275, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020>.

CORDEIRO, G.C. *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 30, n. 5, p.410-418, maio 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>.

CORINALDESI, Valeria; MORICONI, Giacomo. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 8, p.2869-2876, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>.

COST 509, **Corrosion and protection of metals in contact with concrete, final report**, In: Cox RN, Cigna R, Vennesland O, Valente T. editors. European Commission, Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR 17608 EN, ISBN 92-828-0252-3, 1997:148

CRUZ, J.M. *et al.* The use of electrical impedance spectroscopy for monitoring the hydration products of Portland cement mortars with high percentage of pozzolans. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 50, p.51-61, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.019>.

DIETRICH, Yustane Paula; TELES, Cláudia Rodrigues; VIEIRA, Geilma Lima. Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais. **Matéria (rio de**

Janeiro), [s.l.], v. 22, n. 4, out. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0225>.

DINIZ, Hugo Alessandro Almeida. **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) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

DODDS, Wayne *et al.* Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 145, p.183-195, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.232>.

DOUSTI, Ali; BEAUDOIN, James J.; SHEKARCHI, Mohammad. Chloride binding in hydrated MK, SF and natural zeolite-lime mixtures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 154, p.1035-1047, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.034>.

ELSENER B. *et al.*, Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for measuring metallic corrosion, **Materials and Structures**, v. 36, p. 461-471, august 2003. <https://www.rilem.net/images/publis/1218.pdf>

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (2005). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. EFNARC.

FARES, Milia *et al.* Determining chloride content profiles in concrete using an electrical resistivity tomography device. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 94, p.315-326, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.001>.

FODIL, Dif; MOHAMED, Mouli. Compressive strength and corrosion evaluation of concretes containing pozzolana and perlite immersed in aggressive environments. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 179, p.25-34, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.190>.

FONSECA, T. V. **Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, fíler calcarío e adição de cal hidratada**. Dissertação de Mestrado, 121 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

FRÍAS, Moisés; GOÑI, Sara. Accelerated carbonation effect on behaviour of ternary Portland cements. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 48, p.122-

128, maio 2013. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.12.008>.

GBOZEE, Mulbah *et al.* The influence of aluminum from metakaolin on chemical binding of chloride ions in hydrated cement pastes. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 158, p.186-194, jun. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2018.03.038>.

GENTIL, V. Corrosão, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 3ª Ed. Revista, Rio de Janeiro, 1996.

GESOĞLU, Mehmet; GÜNEYISI, Erhan; ÖZBAY, Erdoğan. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 5, p.1847-1854, maio 2009. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015>.

GHANOONI-BAGHA, M. *et al.* Corrosion-induced reduction in compressive strength of self-compacting concretes containing mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 113, p.221-228, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.046>.

GHODDOUSI, P.; SAADABADI, L. Adelzade. Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 154, p.219-228, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.178>.

GILL, Anhad Singh; SIDDIQUE, Rafat. Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete containing metakaolin and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 157, p.51-64, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.088>.

GOPINATH, Athira *et al.* A circular framework for the valorisation of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 203, p.89-108, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.252>.

HAN, Sang-hun; PARK, Woo-sun; YANG, Eun-ik. Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 48, p.1045-1049, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.057>.

HAN-SEUNG, Lee; WANG, Xiao-yong. Evaluation of compressive strength development and carbonation depth of high volume slag-blended concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 124, p.45-54, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.070>.

HASSAN, Assem A.A.; LACHEMI, Mohamed; HOSSAIN, Khandaker M.A. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 34, n. 6, p.801-807, jul. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013>.

HELENE, Paulo R. L. (1993). **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.

HELENE, Paulo R. L. INTRODUÇÃO DA DURABILIDADE NO PROJETO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 1, n. 2, p.45-57, dez. 1997.

ISAIA, G. C.; FURQUIM, P.; GASTALDINI, A.I.G. A statistical approach of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.597-603, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.026>.

JAGADESH, P.; RAMACHANDRAMURTHY, A.; MURUGESAN, R. Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 176, p.608-617, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.037>.

JANG, J.g. *et al.* Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration. **Materials & Design**, [s.l.], v. 93, p.160-167, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.074>.

JIN, Ming; JIANG, Linhua; ZHU, Qiao. Monitoring chloride ion penetration in concrete with different mineral admixtures based on embedded chloride ion selective electrodes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 143, p.1-15, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.131>.

JOSHAGHANI, Alireza; MOEINI, Mohammad Amin. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 152, p.818-831, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>.

JUENGER, Maria C.g.; SIDDIQUE, Rafat. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 78, p.71-80, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>.

JUNG, Min Sun *et al.* Risk of chloride-induced corrosion of steel in SF concrete exposed to a chloride-bearing environment. **Construction and Building**

Materials, [s.l.], v. 166, p.413-422, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.168>.

KANNAN, V.; GANESAN, K. Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 51, p.225-234, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.050>.

KAPOOR, Kanish; SINGH, S.p.; SINGH, Bhupinder. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 128, p.67-76, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026>.

KAVITHA, O.R. *et al.* Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 114, p.370-374, set. 2015. Elsevier BV.

KHALIL, Eehab Ahmed Badreldin; ANWAR, Mohamed. Carbonation of ternary cementitious concrete systems containing fly ash and silica fume. **Water Science**, [s.l.], v. 29, n. 1, p.36-44, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wsj.2014.12.001>.

KHATIB, Jamal M.; MANGAT, Ps. Absorption characteristics of concrete as a function of location relative to casting position. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 25, n. 5, p.999-1010, jul. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00095-t](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00095-t).

KHATIB, Jamal M; CLAY, Roger M. Absorption characteristics of metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.19-29, jan. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00188-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00188-1).

KHATTAB, Sadat M.r.; WATANABE, Takashi. Bioethanol from Sugarcane Bagasse: Status and Perspectives. **Bioethanol Production from Food Crops**, [s.l.], p.187-212, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-813766-6.00010-2>.

KIM, Hong-Sam; LEE, Sang-ho; MOON, Han-young. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 21, n. 6, p.1229-1237, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.007>.

KIM, Jaehwan; MCCARTER, W. John; SURYANTO, Benny. Performance assessment of reinforced concrete after long-term exposure to a marine environment. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 192, p.569-583, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.151>.

KIM, Jin-keun *et al.* Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 31, n. 2, p.139-144, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.001>.

KULAKOWSKI, Marlova P.; PEREIRA, Fernanda M.; MOLIN, Denise C.c. dal. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.1189-1195, mar. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.005>.

KUOSA, H. *et al.* Effect of coupled deterioration by freeze–thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 47, p.32-40, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.008>.

KURDA, Rawaz; BRITO, Jorge de; SILVESTRE, José D. Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO₂. **Journal of Co₂ Utilization**, Lisboa, v. 29, p.12-19, jan. 2019.

LE, Ha Thanh *et al.* The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures. **Materials & Design**, [s.l.], v. 72, p.51-62, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.01.006>.

LE, Ha Thanh; LUDWIG, Horst-michael. Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. **Materials & Design**, [s.l.], v. 89, p.156-166, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.120>.

LEE, Myung Kue; JUNG, Sang Hwa; OH, Byung Hwan. Effects of Carbonation on Chloride Penetration in Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 110, p.559-566, 9 jan. 2013.

LIMBACHIYA, Mukesh; MEDDAH, Mohammed Seddik; OUCHAGOUR, Youssef. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], p.439-449, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023>.

LIU, Fang *et al.* Macro-micro degradation process of fly ash concrete under alternation of freeze-thaw cycles subjected to sulfate and carbonation. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 181, p.369-380, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.037>.

LIU, Guojian *et al.* Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**,

[s.l.], v. 115, p.1-5, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.213>.

LIU, Jun *et al.* Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 95, p.217-225, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.032>.

LIU, Jun-zhe *et al.* Effects of chloride ions on carbonation rate of hardened cement paste by X-ray CT techniques. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 122, p.619-627, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.101>.

LNEC E-463:2004 - Betão. **Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal, 2004. 8 p.

LONG, Wu-jian *et al.* Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 167, p.317-325, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.192>.

LU, Cai-feng *et al.* Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 181, p.309-317, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.155>.

MADANDOUST, Rahmat; MOUSAVI, S. Yasin. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 35, p.752-760, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109>.

MALHEIRO, R. *et al.* **Influência da carbonatação no transporte de cloretos em argamassas submetidas à ação combinada destes dois agentes**. In: I Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2014, Guimarães, Portugal.

MATALKAH, Faris; SALEM, Talal; SOROUSHIAN, Parviz. Acid resistance and corrosion protection potential of concrete prepared with alkali aluminosilicate cement. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 20, p.705-711, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2018.08.001>.

MEDEIROS, F. K. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. 2016. 134f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

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

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 17, n. 4, p.125-139, dez. 2017. UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400189>.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A.; LIMA, Maryangela G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 107, p.11-16, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON. 2014. 782 p.

MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; AGUIRRE, A. M. Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 63, n. 309, p.7-38, 21 mar. 2013. Departamento de Publicaciones del CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2013.00313>.

MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby de *et al.* Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros. **Revista Facultad de Ingeniería**, [S.l.], n. 48, p. 55-64, junho 2009. ISSN 2422-2844. Available at: <<http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/16019/13888>>. Date accessed: 15 feb. 2019.

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

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 31, n. 8, p.601-605, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.

MIR, Abdulkader El; NEHME, Salem G. Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 156, p.507-517, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.103>.

MOHAMMED, Mahmoud Khashaa; DAWSON, Andrew Robert; THOM, Nicholas Howard. Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration

of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 72, p.83-93, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.070>.

MONTEIRO, E.C.B.; PEREIRA, V.C.O. Study of the Protective Capacity of Cements Regarding Corrosion of Reinforcements under Joint Action of CO₂ and Chloride Ions. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 9, p 1017-1024, 2015.

MONTEMOR, M.F. *et al.* Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.45-53, fev. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00025-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00025-7)

MORAES, J.C.B. *et al.* Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 94, p.670-677, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>.

MORETTI, Juliana Petermann; NUNES, Sandra; SALES, Almir. Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 172, p.635-649, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.277>.

MORRIS, W; A VICO, VÁZQUEZ, M. Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements. **Electrochimica Acta**, [s.l.], v. 49, n. 25, p.4447-4453, out. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2004.05.001>.

NAGROCKIENĖ, Džigita; GIRSKAS, Giedrius; SKRIPKIUNAS, Gintautas. Properties of concrete modified with mineral additives. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 135, p.37-42, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.215>.

NASSER, A. *et al.* Influence of steel–concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete. **Corrosion Science**, [s.l.], v. 52, n. 9, p.2878-2890, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.037>.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.

NGUYEN, Hoang-anh *et al.* Enhancement of low-cement self-compacting concrete with dolomite powder. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v.

161, p.539-546, fev. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.148>.

NICOLAS, R. San; CYR, M.; ESCADEILLAS, G.. Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 55, p.313-322, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.063>.

NORDTEST METHOD. **NT BUILD 492**: Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. 1 ed. Finlândia: Nordtest, 1999. 8 p.

NUNES, Douglas Garcez. **Carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. 2014. 149 p. Dissertação (Mestrado) - UFSM – Engenharia Civil. Santa Maria, 2014.

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. Self-Compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.5-15, abr. 2003.

OLIVEIRA, Andrielli Morais de; CASCUDO, Oswaldo. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 192, p.467-477, dez. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>.

OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique. **Durabilidade do concreto**: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: Ibracon, 2014. 615 p. Tradução de: Oswaldo Cascudo e Helena Carasek.

PARANDE, A.k. *et al.* Environmental effects on concrete using Ordinary and Pozzolana Portland cement. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 1, p.288-297, jan. 2011. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.027>.

PARIS, Jerry M. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 121, p.1-18, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>.

PARTHIBAN, Thirumalai; RAVI, R.; PARTHIBAN, G. T. Potential monitoring system for corrosion of steel in concrete. **Advances in Engineering Software**, [s.l.], v. 37, n. 6, p.375-381, jun. 2006. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.09.004>.

PAYÁ, Jordi *et al.* Bagasse ash. **Waste and Supplementary Cementitious Materials In Concrete**, [s.l.], p.559-598, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102156-9.00017-1>.

PELISSER, Fernando; VIEIRA, Alexandre; BERNARDIN, Adriano Michael. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 175, p.324-332, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.084>.

PIRES, Plínio Ferreira. **Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais**. 2016. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

PLUSQUELLEC, G. *et al.* Determination of the pH and the free alkali metal content in the pore solution of concrete: Review and experimental comparison. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 96, p.13-26, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.002>.

POLDER, Rob B; PEELEN, Willy H. A. Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 24, n. 5, p.427-435, out. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00074-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00074-9).

POPEK, Mateusz; SADOWSKI, Łukasz. Selected Physical Properties of Concrete Modified using Mineral Powders. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 172, p.891-896, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.097>.

PROSKE, Tilo *et al.* Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 67, p.413-421, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.066>.

RAMEZANIANPOUR, A.A., GHAHARI, S.A., ESMAEILI, M. Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 58, p.138-146, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.102>.

REAL, L. V. *et al.* Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte. **Revista Alconpat**, [s.l.], v. 5, n. 2, p.149-159, ago. 2015.

RERKPIBOON, Aukkadet; TANGCHIRAPAT, Weerachart; JATURAPITAKKUL, Chai. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 101, p.983-

989, dez. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.140>.

RIBEIRO, A. Bettencourt; SANTOS, Tiago; GONÇALVES, Arlindo. Performance of concrete exposed to natural carbonation: Use of the k-value concept. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 175, p.360-370, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.206>.

RIBEIRO, Daniel Véras *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado**: Teoria, Controle e Métodos de Análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272 p.

RIBEIRO, Daniel Véras. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e a corrosibilidade do concreto armado**. 2010. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

RÍOS-PARADA, V. *et al.* Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 157, p.83-95, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060>.

RIVETTI, Marianna Luna Sousa *et al.* Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete. **Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications**, [s.l.], 178 p., 4 abr. 2018. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72772>.

ROSSIGNOLO, J.a. *et al.* Influence of microwave oven calcination on the pozzolanicity of sugar cane bagasse ashes (SCBA) from the cogeneration industry. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 187, p.892-902, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.016>.

RUIXIA, H. E. A study on carbonation for low calcium fly ash concrete under different temperature and relative humidity. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, Pingdingshan, v. 15, p.1871-1877, 2010. Disponível em: <<http://www.ejge.com/2010/Ppr10.137.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2019.

SAFIUDDIN, Md.; WEST, J.s.; SOUDKI, K.A. Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 32, n. 9, p.708-717, out. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.006>.

ŞAHMARAN, Mustafa; CHRISTIANTO, Heru Ari; YAMAN, İsmail Özgür. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 28, n. 5, p.432-440, maio 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003>.

SAILLIO, Mickael; BAROGHEL-BOUNY, Véronique; BARBERON, Fabien. Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 68, p.82-91, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.049>.

SANDHU, Ravinder Kaur; SIDDIQUE, Rafat. Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 153, p.751-764, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.165>.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 161p. Dissertação (Mestrado em estruturas), Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SFIKAS, Ioannis P.; BADOGIANNIS, Efstratios G.; TREZOS, Konstantinos G.. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 64, p.121-129, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.048>.

SHAH, Vineet; BISHNOI, Shashank. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 178, p.219-232, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.162>.

SHI, Xianming *et al.* Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 30, p.125-138, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038>.

SHI, Xianming *et al.* Strength and corrosion properties of Portland cement mortar and concrete with mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 8, p.3245-3256, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.011>.

SILVA, Sérgio Roberto da; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 153, p.704-715, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.143>.

SISOMPHON, Kritsada; FRANKE, Lutz. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete**

Research, [s.l.], v. 37, n. 12, p.1647-1653, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.014>.

SOARES, Eduardo Alessandro. **Avaliação Físico-química e sensorial de caldo de cana-de-açúcar**. 2017. 49 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroecologia e Desenvolvimento Rural, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2017.

SOARES, Larissa Azevedo. **Síntese, ativação e caracterização de carvão obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar e avaliação da capacidade de adsorção**. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia - Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SONG, Ha-won; SARASWATHY, Velu. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review. **Internacional Journal of Electrochemical Science**, South Korea, v. 2, p.1-28, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26495162_Corrosion_Monitoring_of_Reinforced_Concrete_Structures_-_A_Review. Acesso em: 25 jan. 2019.

STANISH, K. D., HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A. Testing the chloride penetration resistance of Concrete: A literature review. 31p. University of Toronto, Ontario, Canadá, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237321599_Testing_the_Chloride_Penetration_Resistance_of_Concrete_A_Literature_Review Acesso em: 03 jan. 2019.

SUKUMAR, Binu; NAGAMANI, K.; RAGHAVAN, R. Srinivasa. Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 22, n. 7, p.1394-1401, jul. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.005>.

SULAPHA, P. *et al.* Carbonation of Concrete Containing Mineral Admixtures. **Journal of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.134-143, abr. 2003. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2003\)15:2\(134\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:2(134)).

UYSAL, Mucteba; SUMER, Mansur. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 11, p.4112-4120, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.032>.

UYSAL, Mucteba; YILMAZ, Kemalettin. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 33, n. 7, p.771-776, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005>.

VEJMEJKOVÁ, Eva *et al.* Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.1325-1331, mar. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.012>.

VENNESLAND, Ø.; RAUPACH, M.; ANDRADE, C.. Recommendation of Rilem TC 154-EMC: "Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete"—measurements with embedded probes. **Materials and Structures**, [s.l.], v. 40, n. 8, p.745-758, 13 abr. 2007. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-006-9219-4>.

WANG, Y. *et al.* Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 140, p.173-183, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.121>.

WANG, Yunyao *et al.* Understanding the chloride binding and diffusion behaviors of marine concrete based on Portland limestone cement-alumina enriched pozzolans. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 198, p.207-217, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.270>.

WERLE, Ana Paula; KAZMIERCZAK, Claudio de Souza; KULAKOWSKI, Marlova Piva. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 213-228, abr./jun. 2011.

WONGKEO, Watcharapong *et al.* Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. **Materials & Design**, [s.l.], v. 64, p.261-269, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.042>.

XUAN, Dongxing; ZHAN, Baojian; POON, Chi Sun. Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 84, p.214-221, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.015>.

YE, Hailong *et al.* Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 112, p.457-463, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.194>.

YOON, In-seok; ÇOPUROĞLU, Oğuzhan; PARK, Ki-bong. Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete. **Atmospheric Environment**, [s.l.], v. 41, n. 34, p.7274-7285, nov. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.028>.

ZHANG, Duo; SHAO, Yixin. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 123, p.516-526, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.041>.

ZHU, Xingji *et al.* Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 110, p.369-380, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.034>.