



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

HUGO ALESSANDRO ALMEIDA DINIZ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DOS PARÂMETROS
DE DURABILIDADE DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM
ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES MINERAIS SUBMETIDOS À
CARBONATAÇÃO**

**NATAL
2018**

HUGO ALESSANDRO ALMEIDA DINIZ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DOS PARÂMETROS
DE DURABILIDADE DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM
ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES MINERAIS SUBMETIDOS À
CARBONATAÇÃO**

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.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares Dos Anjos

NATAL
2018

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

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 / Hugo Alessandro Almeida Diniz. - 2018.

160 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

1. Concreto - Dissertação. 2. Carbonatação - Dissertação. 3. Porosidade - Dissertação. 4. Resíduo biomassa da cana-de-açúcar - Dissertação. 5. Pozolana da casca de arroz - Dissertação. 6. Cal hidratada - Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 691.32

HUGO ALESSANDRO ALMEIDA DINIZ

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DOS PARÂMETROS DE DURABILIDADE DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES MINERAIS SUBMETIDOS À CARBONATAÇÃO

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.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Orientador

Profa. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Examinadora interna

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo – Examinador externo (UFPB)

Natal, 28 de março de 2018.

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DOS INDICATIVOS DE DURABILIDADE DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES MINERAIS SUBMETIDOS À CARBONATAÇÃO

Hugo Alessandro Almeida Diniz

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) é um produto inovador, o qual possui fluidez e coesão para percorrer toda a extensão da peça e preencher os espaços entre armaduras, otimizando a execução de concretos e reduzindo os custos com mão de obra. A utilização das adições minerais ricas em sílica amorfa e alumínio, como o metacaulim, a pozolana da casca de arroz (PCA) e a biomassa da cana-de-açúcar (RBC) são alternativas à redução do cimento, pois conferem benefícios à matriz cimentícia e ainda podem ser provenientes de resíduos agroindustriais, contribuindo para a correta destinação destes no meio ambiente. Contudo, as adições minerais provocam a redução do hidróxido de cálcio, que age como barreira de proteção contra a carbonatação do concreto. Este agente agressivo provoca a redução da alcalinidade e forma produtos carbonáticos que alteram a estrutura porosa da matriz, tornando o ambiente agressivo às armaduras. A presente pesquisa investigou a influência da carbonatação, em câmara acelerada, nas propriedades mecânicas e nos índices de durabilidade de concretos autoadensáveis, com baixos teores de cimento e elevados teores de adições minerais, provenientes de resíduos agroindustriais, como o RBC e PCA. Correlacionou-se as propriedades do CAA com o processo de carbonatação, avaliando a ação do dióxido de carbono (CO_2) e da realcalinização do concreto através da cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e também o desempenho do RBC comparado ao PCA. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, onde as misturas com adições apresentaram propriedades mecânicas equivalentes ao concreto sem adições minerais e as frentes de carbonatação não atingiram a profundidade equivalente ao

cobrimento nominal, de 25 mm, determinado pela NBR 6118 (ABNT, 2014). As adições minerais também promoveram um incremento significativo na resistividade elétrica, mesmo as amostras estando saturadas, tornando desprezível a ocorrência da carbonatação e ratificando o uso dos CAA's realizados. O RBC apresentou um desempenho inferior ao PCA, contudo os seus bons resultados viabilizam a sua utilização, principalmente com teor de 20%, teor ideal de substituição. A cal influenciou positivamente no combate à carbonatação e proporcionou resistência ao concreto. Os traços com 20% de RBC e 30% de PCA, ambos com a cal, apresentaram os melhores resultados na maioria dos ensaios, sendo os traços ótimos da pesquisa. Por fim, obteve-se um concreto ecoeficiente e sustentável.

Palavras-chave: Concreto Autoadensável; Carbonatação; Porosidade; Resíduo biomassa da cana-de-açúcar; Pozolana da casca de arroz; Cal hidratada.

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY PARAMETERS OF SELF COMPACTING CONCRETE WITH HIGH CONTENTS OF MINERAL ADMIXTURES SUBJECTED TO CARBONATION

Hugo Alessandro Almeida Diniz

Advisor: Prof. DsC. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) is an innovative product that has fluidity and cohesion to traverse the entire length of the part and fill the spaces between armatures, optimizing the execution of concrete and reducing costs with labor. The use of mineral admixtures rich in amorphous silica and aluminum such as metacaolin, pozzolan rice husk and sugarcane biomass are an alternative to the reduction of cement, since they confer benefits to the cement matrix and are industrial waste, contributing to their correct disposal in the environment. However, the mineral admixtures cause the reduction of Calcium Hydroxide, which acts as a protective barrier of carbonation in concrete. This aggressive agent causes reduction of alkalinity and forms carbonaceous products that alter the porous structure of the matrix, making the environment aggressive to the reinforcements. The present study investigated the influence of accelerated chamber carbonation on the mechanical properties and durability indicatives of self-compacting concretes, with low cement content and high levels of mineral additions from agroindustrial residues, with RBC and PCA. The properties of the SCC were correlated with the carbonation process, evaluating the action of Carbon Dioxide (CO₂) and the concrete realcalinization through the hydrated lime (Ca(OH)₂) and the performance of the RBC compared to the PCA. The results obtained were considered satisfactory, where the mixtures with mineral admixtures presented mechanical properties equivalent to the reference mix and the carbonation fronts didn't reach the depth equivalent to the nominal cover of 25 mm, determined by NBR 6118 (ABNT, 2014). The mineral admixtures also promoted a significant increase

in the electrical resistivity, even the samples being saturated, making negligible the occurrence of carbonation and ratifying the use of the mix produced. The RBC performed less than PCA, but its good results enabled its use, mainly with a 20% content, ideal replacement content. The lime has positively influenced the carbonation combat and has given concrete resistance. The traces with 20% RBC and 30% PCA, both with lime, presented the best results in most of the trials, being the optimal traits of the research. Finally, an eco-efficient and sustainable concrete was obtained.

Keywords: Self-compacting concrete; Sugarcane biomass residues; Cement matrix; Porosity; Hydrated lime; CO₂ penetration.

*“Confia no senhor e faz o bem;
Deleita-te também,
ele te concederá o que o coração deseja.
Entrega o teu caminho
Confia nele
e ele tudo fará”*

Salmos 37:3-5

Dedico à minha amada Mãe, Lenise (*in memoriam*) por todo o seu amor e dedicação incondicional e por sempre acreditar em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por toda bondade e providências que têm realizado na minha vida possibilitando a realização pessoal.

À minha mãe, que mesmo não estando mais presente, me incentiva todos os dias em amor e pensamento, sendo corresponsável por todas as minhas realizações.

À minha companheira, Kaliane, por todo amor, incentivo, companheirismo, por me ouvir, aconselhar, ajudar em tudo e ser meu porto seguro em todos os momentos.

À minha tia-mãe, Marise, por todo amor e por tudo que faz por mim, desde conselhos a puxões de orelha quando necessários, os quais me ajudaram a chegar ao fim desta etapa.

À minha família e à família de Kaliane, por entender e apoiar que este era um passo para eu alcançar meus sonhos.

Ao meu Orientador, professor Dr. Marcos Alyssandro, pelo apoio, pelos conselhos e ensinamentos que possibilitam a conclusão desse objetivo e o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos amigos e amigas, Aretuza, Ane, Graziele, Matheus, Luan e Jackson, por todo apoio e empenho na parte experimental do trabalho. Os quais foram determinantes para a conclusão desta etapa.

Ao grupo de pesquisa e técnicos laboratoristas do IFRN, campus Natal central, por todo apoio e disponibilidade que foram fundamentais para o acontecimento desse estudo.

Aos demais amigos que aqui não foram citados mas que ajudaram de alguma forma para a ocorrência deste estudo.

À UFRN, em especial, ao PEC, pela oportunidade de realização de um sonho.

À CAPES, pelo auxílio financeiro através da bolsa de estudos durante o mestrado.

Aos professores avaliadores, pelos apontamentos e sugestões que enriqueceram o trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE EQUAÇÕES	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura da dissertação	5
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS SUSTENTÁVEIS	7
2.1 Cimento Portland	7
2.1.1 Composição Química.....	8
2.1.2 Formação dos produtos hidratados e microestrutura.....	8
2.2 Considerações sobre concretos autoadensáveis	11
2.3 CAA com elevados teores de adições minerais	13
2.3.1 Incorporação de Metacaulim.....	14
2.3.2 Incorporação da Pozolana da Casca de Arroz.....	17
2.3.3 Incorporação do Resíduo da Biomassa da Cana-de-açúcar (RBC).....	20
2.3.4 Incorporação da cal hidratada.....	22
PARÂMETROS DE DURABILIDADE EM CONCRETOS	25
3.1 Estrutura porosa do concreto	26
3.2 Transporte de massa no interior do concreto	29
3.3 Agentes de deterioração	31
3.4 Carbonatação	32
3.5 Indicadores da durabilidade do concreto	34
PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
4.1 Materiais utilizados	40
4.2 Caracterização dos materiais	43
4.2.1 Ensaio de caracterização dos agregados	43
4.2.2 Caracterização dos finos.....	43

4.3 Estudo do CAA com baixos teores de cimento	45
4.3.1 Definição dos traços.....	466
4.3.2 Moldagem e preparo da mistura	477
4.3.3 Propriedades no estado fresco	48
4.3.4 Propriedades no estado endurecido	51
4.4 – Delineamento estatístico fatorial	58
RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1 Caracterização dos agregados	60
5.2 Caracterização dos finos	61
5.2.1 Área superficial BET	61
5.2.2 Composição química e mineralógica	63
5.2.3 Granulometria à laser.....	65
5.2.4 Índice de atividade pozolânica com cal.....	68
5.3 Avaliação do comportamento dos CAA´s no estado fresco	69
5.3.1 Propriedades físicas.....	71
5.3.2 Ensaio de caracterização do comportamento dos CAA´s	73
5.4 Avaliação do Comportamento dos CAA´s no estado endurecido	89
5.4.1 Avaliação das Propriedades Físicas	89
5.4.1.1 Resistência à de compressão	89
5.4.1.2 Velocidade do Pulso ultrassônico	95
5.4.2 Parâmetros de Durabilidade	98
5.4.2.1 Profundidade de Carbonatação acelerada	98
5.4.2.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio	108
5.4.2.3 Absorção de água por capilaridade	114
5.4.2.4 Resistividade elétrica	120
CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Comparação das proporções dos materiais entre os concretos auto adensável e convencional.....	12
Figura 3.1 - Escalas de vazios dos poros sólida em concreto.....	26
Figura 3.2 – Influência do a/c na porosimetria.....	27
Figura 3.3 – Descrição esquemática dos vazios do concreto.....	28
Figura 3.4 – Condições do poro mediante umidade relativa.....	30
Figura 4.1 – Organograma da pesquisa.....	39
Figura 4.2 – Cronograma dos ensaios para cada traço.....	45
Figura 4.3 – Ilustração da amostra submetida à carbonatação: a) faces livres e com parafina; b) sentido do corte de seção; c) aspersão de fenolftaleína.....	51
Figura 4.4 – Aferição da resistividade elétrica (Esquerda: obtenção dos resultados; Direita: Equipamento).	54
Figura 4.5 – Prensa hidráulica de rompimento.....	56
Figura 4.6 – Leitura do pulso ultrassônico: a) Equipamento; b) Transdutor com o gel; c) realização da leitura.	58
Figura 4.7 – Delineamento estatístico: a) Área de estudo; b) Estrutura tridimensional da superfície de resposta.....	58
Figura 5.1 – Perfil granulométrico do agregado graúdo.....	60
Figura 5.2 – Perfil granulométrico do agregado miúdo.....	61
Figura 5.3 – Difração de raios X do cimento.....	64
Figura 5.4 – DRX das adições minerais.....	65
Figura 5.5 – Granulometria à laser do cimento.....	66
Figura 5.6 – Granulometria à laser da Cal.....	66
Figura 5.7 – Granulometria à laser da Biomassa da cana de açúcar.....	67
Figura 5.8 – Granulometria à laser da Pozolana da casca de arroz.....	67
Figura 5.9 – Granulometria à laser do Metacaulim.....	68
Figura 5.10 – Superfície de resposta do ar incorporado.....	72
Figura 5.11 – Gráfico do ar incorporado x Densidades real e teórica.....	73
Figura 5.12 – Gráfico do resultado do Slump Flow Test.....	74
Figura 5.13 – Espalhamento das misturas.....	75
Figura 5.14 – Eficiência do aditivo superplastificante.....	76
Figura 5.15 – Superfície de resposta da eficiência do aditivo.....	77
Figura 5.16 – Tempo de T500 x Funil V.....	79
Figura 5.17 – Superfície de resposta funil V no aumento do RBC.....	80
Figura 5.18 – Superfície de resposta funil V na substituição do PCA por RBC...	81
Figura 5.19 – Gráfico T500 com e sem anel J.....	81

Figura 5.20 – Superfície de resposta T500 na substituição do PCA por RBC.....	82
Figura 5.21 – Gráfico Slump Flow - Anel J x Diferença de altura no anel.....	84
Figura 5.22 – Superfície de Resposta Anel J.....	86
Figura 5.23 – Espalhamento com o anel J: a) TR b) R20.....	87
Figura 5.24 – Gráfico Caixa L.....	87
Figura 5.25 – Exsudação do TR na caixa L.....	88
Figura 5.26 – Execução da Caixa L: RBC30 (esquerda) e PCA30 (direita).....	88
Figura 5.27 – Gráfico resistência à compressão axial.....	90
Figura 5.28 – Superfície de resposta da Resistência aos 112 dias.....	93
Figura 5.29 – Gráfico resistência x consumo de cimento.....	94
Figura 5.30 – Velocidade do pulso ultrassônico ao longo das idades.....	96
Figura 5.31 – Profundidade de carbonatação ao longo de 6 idades dentro da câmara.....	98
Figura 5.32 – Influência visual do poro na carbonatação.....	103
Figura 5.33 – Gráfico resistência à compressão aos 112 dias dentro e fora.....	104
Figura 5.34 – superfície de concreto carbonatada. fonte: Ahmad <i>et al</i> (2017)....	104
Figura 5.35 – Velocidade do pulso ultrassônico por série.....	105
Figura 5.36 – Percentual de porosidade pela intrusão de mercúrio aos 42 e 112 dias.....	106
Figura 5.37 – Superfície de resposta da queda de porosidade entre 42 e 112 dias.....	108
Figura 5.38 – Intrusão de mercúrio dos 4 CAA´s base.....	108
Figura 5.39 - Intrusão acumulada de mercúrio dos 4 CAA´s base.....	109
Figura 5.40 - Intrusão acumulada de mercúrio dos 4 traços CAAs carbonatados	112
Figura 5.41 – Comportamento da intrusão aos 42 dias.....	113
Figura 5.42 – Absorção capilar fora da câmara.....	114
Figura 5.43 – Superfície de resposta absorção capilar aos 28 dias.....	116
Figura 5.44 – Superfície de resposta absorção capilar aos 112 dias.....	116
Figura 5.45 – Absorção capilar nas 3 idades dentro da câmara de carbonatação.....	117
Figura 5.46 – Absorção capilar aos 112 dias: dentro x fora da câmara.....	119
Figura 5.47 – Resistividade elétrica ao longo das idades.....	121
Figura 5.48 – Resistividade elétrica por série ao longo das idades.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – traços realizados	46
Tabela 4.2 – Sequência de inserção e mistura de cada traço.....	48
Tabela 4.3 – Classificação do tempo de escoamento (T500).....	48
Tabela 4.4 – Classificação do espalhamento final (<i>Slump Flow test</i>).....	49
Tabela 4.5 – Classificação da viscosidade no Funil V.....	49
Tabela 4.6 – Classificação da habilidade passante na Caixa L.....	50
Tabela 4.7 – Classificação da Habilidade passante no Anel J.....	50
Tabela 4.8 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.....	52
Tabela 4.9 – Taxa provável de corrosão em função da resistividade elétrica....	55
Tabela 4.10 - Tolerância de desvio de horário de rompimento de acordo com a idade do concreto.....	57
Tabela 5.1 – Caracterização do agregado graúdo.....	60
Tabela 5.2 – Caracterização do agregado miúdo.....	61
Tabela 5.3 – Superfície específica dos finos pelo método BET.....	62
Tabela 5.4 – Fluorescência de Raio X dos finos.....	63
Tabela 5.5 – Teores potenciais dos produtos hidratados do cimento.....	63
Tabela 5.6 – Índice de atividade pozzolânica das cinzas agroindustriais.....	68
Tabela 5.7 – Consumos e parâmetros das misturas realizadas.....	70
Tabela 5.8 – Resultados do Ar incorporado e da Densidade das misturas.....	71
Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios no estado fresco.....	74
Tabela 5.10 – Efeito estatístico do T500 e funil V.....	80
Tabela 5.11 – Resultados de resistência à compressão.....	90
Tabela 5.12 – Percentual de crescimento da resistência por idade.....	91
Tabela 5.13 – Efeito da resistência à compressão.....	97
Tabela 5.14 – Coeficiente de carbonatação acelerada.....	100
Tabela 5.15 – Efeitos estatísticos da carbonatação em 5 idades.....	101
Tabela 5.16 – Resistência à compressão aos 112 dias dentro e fora.....	103
Tabela 5.17 – efeito da porosimetria aos 42 dias.....	107
Tabela 5.18 – Resultados da posimetria aos 42 e 112 dias.....	111
Tabela 5.19 – Efeito estatístico da absorção.....	115
Tabela 5.20 – Efeito estatístico da absorção capilar aos 112 dias em diferentes ambientes.....	120
Tabela 5.21 – Efeitos estatísticos da resistividade elétrica.....	122

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1.....	32
Equação 3.2.....	32
Equação 3.3.....	32
Equação 3.4.....	33
Equação 3.5.....	33
Equação 3.6.....	33
Equação 5.1.....	100

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a/c – Relação água/ cimento

a/l – Relação água/ ligantes

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

C₂S – Silicato dicálcico (belita)

C₃S – Silicato tricálcico (alita)

C₄AF – Ferroaluminato tetracálcico (ferrita)

CAA - Concreto Autoadensável

CH - Hidróxido de Cálcio

C-S-H - Silicato de Cálcio hidratado

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

DRX – Difração de Raios X

EFNARC – Federação europeia de especialistas em construção e química dos sistemas de concreto

FRX – Fluorescência de Raios X

IAP - Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland

IFRN - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

K_{ca} – Coeficiente de Carbonatação acelerada

K_{dc} – Coeficiente de difusão do carbono

Labcim - Laboratório de Cimentos

MCTIC – Ministério da ciência, tecnologia, inovação e Comunicações

MPa – mega Pascal

NBR – Norma brasileira regulamentada

PCA – Pozolana da casca de arroz

RBC – Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

ZT – Zona de transição entre o agregado e a pasta

CAPÍTULO 1

Introdução

O concreto é um composto heterogêneo, formado por agregados, aglomerantes hidráulicos e água, podendo ter adições de outros produtos que conferem características específicas. Suas aplicações estão presentes em diversas áreas intitulado-o como um dos materiais mais consumidos no mundo. Conforme explanação de Mehta e Monteiro (2014), a justificativa pela grande difusão do concreto está relacionada à capacidade deste de adquirir diferentes formas geométricas, atrelada à fácil acessibilidade de seus componentes e ao seu custo benefício.

O concreto autoadensável (CAA) surgiu na década de 1980 no Japão e apresentou-se como um composto mais fluido e coeso que preenche os espaços das fôrmas e penetra entre as armaduras sem o auxílio de vibração. Em decorrência disto produz-se um concreto de rápida aplicação, que requer menos mão de obra e não apresenta nichos de concretagem. Estas características do CAA são obtidas através de estudos de dosagem e aditivos superplastificantes.

Em virtude do emprego dos diversos tipos de concreto em larga escala, propagados pelo mundo, e conseqüentemente, pelo alto consumo de seus componentes, torna-se indispensável a busca pelo uso racional e equilibrado. Atrelado aos efeitos de sua utilização, Serres *et al* (2016) externam que o ramo da construção é responsável pelo esgotamento de recursos materiais e energéticos, bem como a geração considerável de resíduos, ratificando a responsabilidade de caminhar no sentido da sustentabilidade em seus diversos tipos e aplicações.

Com o propósito de contribuir com esta proposição, diversos estudos hoje têm como desafio desenvolver compósitos cimentícios com baixos teores de cimento, substituindo-o por adições industriais e agroindustriais, as quais em sua fabricação consomem menos energia e, sendo reutilizadas no concreto, têm sua vida útil prolongada, uma vez que é um resíduo.

A utilização do CAA é positiva neste sentido, uma vez que as características de viscosidade e coesão, que possibilitam seu adensamento espontâneo, são otimizadas com o uso das adições, que possuem características como maior finura e pozolanicidade. Uysal e Yilmaz (2011) afirmam que “o uso de adições minerais proporciona melhora da trabalhabilidade, além de benefícios econômicos e redução da poluição ambiental”.

Dossche *et. al* (2016) citam que várias opções podem ser utilizadas para a substituição do cimento como cinza volante, fíler calcário, escórias e cinzas de bagaços finas. Também pode-se utilizar o metacaulim, dentre outras, as quais tem como característica comum a finura dos grãos.

Essa granulometria composta de finos, destas adições, podem desempenhar o papel de micro preenchimentos (ação física) que, por sua vez, aumentarão a compacidade e diminuirão a porosidade do concreto (KAPOOR *et al.*, 2016). Com isto, promove-se uma estrutura menos porosa e dificulta a entrada de agentes deletérios quando em estado endurecido.

Nesta perspectiva, Uysal e Yilmaz (2011) explanam que as adições minerais podem melhorar os empacotamentos das partículas e reduzir a permeabilidade. Estas propriedades tornam o uso das adições bastante receptivo, em virtude do aumento da durabilidade, quanto aos aspectos físicos.

A alta superfície específica das adições minerais é também uma característica importante a qual promove benefícios ao CAA, na manutenção da viscosidade e na homogeneidade do composto na execução das peças armadas. As adições que atuam como modificadores de viscosidade, segundo Vivek *et al.* (2017), desempenham um papel importante na trabalhabilidade do concreto autoadensável, onde mantêm a fluidez e resistência à segregação do concreto.

Quando estas adições minerais são compostas por grandes quantidades de sílica amorfa promove-se a reação pozolânica conjuntamente à hidratação dos materiais cimentícios (ação química). Esta reação consiste na reação entre a sílica amorfa e o hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 - para formação de compostos cimentantes na presença de água (DUAN *et al.*, 2013). O C-S-H (Silicato de Cálcio hidratado), composto formado nesta reação, confere maior resistência ao concreto.

A observação química desta reação é fundamental para aferir a durabilidade do concreto, pois apesar das adições conferirem fisicamente maior vida útil, pela redução da porosidade, o consumo do hidróxido de cálcio (CH) reduz a alcalinidade do concreto. A consequência do consumo da reserva alcalina constituída pelo CH é a redução do pH, onde para valores próximos a 9 ocorre a despassivação da armadura (OLLIVIER e VICHOT, 2014).

O hidróxido de cálcio também tem função fundamental no combate à carbonatação. Nesse ataque ácido, as moléculas de CO₂ reagem com os silicatos hidratados e álcalis do cimento. Contudo, em consequência de sua instabilidade, o CH é o primeiro produto hidratado a ser consumido, por ter maior solubilidade com o CO₂ e com isso protegendo o C-S-H, produto mais importante da matriz cimentícia. Singh e Singh (2016) afirmam que a presença de maiores índices de CH são responsáveis pela redução das profundidades de carbonatação no CAA.

Não há dúvida de que as adições minerais otimizem as características mecânicas e reológicas do concreto autoadensável. Porém, a interação entre as características físicas e químicas promovidas por elas é o que expõe a proporção ideal de substituição do cimento. Isto, atrelado ao entendimento do efeito individual de cada adição, propicia a escolha do teor correto à aplicação.

1.1 Justificativa

A necessidade da minimização do consumo energético e dos recursos naturais pela indústria da construção civil aduz às práticas construtivas ecoeficientes. Sob esta ótica, o concreto, como produto mais utilizado na construção civil, desenvolve papel fundamental quando reduzido o consumo de cimento e otimizado o método executivo.

Esta busca por um concreto sustentável tem sido estimulada pela demanda das nações de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, conservação dos recursos naturais e espaços limitados para destinação dos resíduos (LIEW *et al*, 2017).

Enormes quantidades de matérias-primas são necessárias para produzir o cimento e, para reduzir seu impacto ambiental, o uso de adições cimentícias pode fornecer uma boa solução (SHAFIGH *et al*, 2013). Entretanto, o uso de adições provoca diferentes características reológicas e mecânicas nesse material alterando suas propriedades e durabilidade.

O emprego do concreto autoadensável com baixos teores de cimento é justificado pelos benefícios diretos da racionalização do método construtivo e da redução do cimento, conseqüentemente, beneficiando o meio ambiente. Para garantir a competitividade do concreto como material de construção no futuro, é essencial impor melhorias à sustentabilidade das estruturas de concreto (PROSKE *et al*, 2014).

Contudo, existem poucos estudos inerentes ao comportamento e às propriedades do CAA com alta redução do teor de cimento, principalmente relativos aos indicativos de durabilidade frente ao ataque de carbono, à incorporação do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e à reposição de CH através da Cal hidratada.

Diante do exposto, pretende-se aprofundar o conhecimento sobre as propriedades de concretos autoadensáveis com a incorporação dos resíduos agroindustriais da casca do arroz e da cana-de-açúcar e da Cal, no intuito de aferir seus índices de durabilidade. A compreensão das propriedades é imprescindível para a aplicação de novas tecnologias. Este estudo contribuirá para o conhecimento da durabilidade dos CAA com baixos teores de cimento, fomentando sua utilização.

1.2 Objetivos

Discorrido os princípios e mecanismos, o objetivo da presente pesquisa é investigar as propriedades mecânicas, os parâmetros de durabilidade e a estrutura porosa de concretos autoadensáveis, com baixos teores de cimento e elevados teores de adições minerais, com e sem o uso de cal, frente à processos de carbonatação. Serão objetivos específicos do trabalho:

- (i) Investigar a influência do resíduo da biomassa de cana-de-açúcar e da pozolana da casca do arroz frente ao ataque ácido de gás carbônico nos CAA;
- (ii) Analisar a realcalinização da matriz dos CAA por meio da comparação da profundidade de carbonatação entre os traços confeccionados com e sem cal;
- (iii) Inferir a porosidade dos CAA por meio de ensaios indiretos, na estabelecendo também uma comparação entre os traços com RBC e PCA;
- (iv) Avaliar a atuação do resíduo da biomassa de cana-de-açúcar, da pozolana da casca do arroz e da cal nos parâmetros de durabilidade dos CAA;

(v) Comparar o comportamento mecânico e reológico dos CAA com baixo teor de cimento nos estados fluido e endurecido, mediante a presença das adições.

1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho será estruturado em seis capítulos. Primeiramente, o capítulo 1 (**Introdução**) busca compreender os motivos para a escolha do tema, os objetivos pretendidos e a estrutura que será adotada para a elaboração do estudo. Na sequência, o capítulo 2 (**Fundamentação teórica**) foi dividido em 3 subseções:

- Subseção 2.1 (Cimento Portland) versa sobre a composição do cimento e sua influência nas propriedades dos compósitos cimentícios.
- Subseção 2.2 (Considerações sobre concretos autoadensáveis) disserta sobre o conceito de concreto autoadensável bem como suas propriedades.
- Subseção 2.3 (CAA com elevados teores de adições minerais) aborda os princípios dos concretos autoadensáveis e a influência das adições minerais utilizadas no estudo.

Consequente, o capítulo 3 (**Índices de durabilidade em concretos**) apresenta um panorama da influência das características do concreto na durabilidade, sendo dividido em 3 subseções:

- Subseção 3.1 (Estrutura porosa do concreto), apresenta a influência e as características da estrutura porosa do concreto, bem como sua influência na durabilidade.
- Subseção 3.2 (Transporte de massa no interior do concreto), explana os mecanismos que possibilitam o transporte de massa no interior do concreto, com foco na durabilidade.
- Subseção 3.3 (Agentes de deterioração), exhibe quais os principais agentes de deterioração do concreto e suas consequências.
- Subseção 3.4 (Carbonatação), explica detalhadamente como ocorre o ataque do gás carbônico ao concreto, bem como seu impacto na estrutura porosa e na alcalinidade da matriz.
- Subseção 3.5 (Indicadores de durabilidade do concreto), apresenta os principais índices e características do concreto que dão uma percepção da durabilidade do concreto.

Em seguida, o capítulo 4 (**Programa experimental**) foi dividido em 3 subseções:

- Subseção 4.1 (Materiais utilizados) apresenta a estrutura para caracterizar os componentes utilizados na formulação dos concretos.
- Subseção 4.2 (Caracterização dos materiais componentes) descreve os ensaios preliminares de caracterização dos materiais utilizados na confecção dos concretos.
- Subseção 4.3 (Estudo do CAA com baixos teores de cimento) avalia as propriedades do CAA nos estados fresco e endurecido.
- Subseção 4.4 (Delineamento estatístico fatorial) explica o método de análise estatística utilizado para explicar o efeito das adições no capítulo dos resultados.

Consequente, o capítulo 5 (**Resultados e discussões**) apresenta as respostas dos ensaios realizados, fundamentados e comparados com publicações científicas.

Por fim, o capítulo 6 (**Considerações finais**) finaliza as ideias e reflexões dissertadas apontando os principais pontos do presente trabalho.

CAPÍTULO 2

Concretos Autoadensáveis Sustentáveis

2.1 Cimento Portland

O cimento é um composto cerâmico anidro, finamente moído, que tem a propriedade ligante, quando misturado com água. Essa mistura provoca uma reação exotérmica, que hidrata os compostos e produz diversas estruturas cristalinas, conferindo as suas propriedades mecânicas, após o endurecimento.

A pasta formada possui alta área superficial e age como cola para aglomerar outros materiais que possam ser misturados a ela. Com a formação dos produtos hidratados, a pasta dá início ao seu endurecimento, processo chamado de “pega”. Após endurecer forma um produto resistente a água, estável e com boas propriedades mecânicas.

O cimento é fabricado através de processo que, de forma sintética, envolve a queima do calcário e argila. Após a queima é formado o clínquer, sendo este moído, podendo ser inseridas outras adições minerais que confirmam características específicas na moagem, após é misturado ao gesso e remoído.

A adição de gesso é necessária para o controle do tempo de pega, pois os sulfatos presentes na gipsita possuem maior afinidade química com o Aluminato tricálcico (C_3A), retardando a hidratação deste componente do cimento. Segundo Mehta & Monteiro (2014) a adição é necessária em função da alta reatividade do C_3A .

A reatividade do cimento também irá depender do processo de moagem ocorrido na fabricação. A redução do diâmetro das partículas do cimento aumenta sua superfície específica, provocando uma maior solubilização na água, acelerando a reação. Porém, os custos de moagem e o aumento do calor emitido na hidratação estabelecem limites para o refino (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

2.1.1 Composição Química

Na produção do cimento as matérias primas são inicialmente desidratadas até cerca de 450°C, após esta temperatura começam as alterações na estrutura cristalina. Após toda a queima do calcário com argila são formados os principais compostos do Clínquer.

Os silicatos de cálcio podem ser formados como Silicato tricálcico (C_3S), denominado Alita, ou como Silicato dicálcico (C_2S), Belita, ambos encontrados com pequenas alterações devido às impurezas inerentes ao processo de fabricação e à matéria prima. Estes são os principais compostos do cimento, responsáveis principais pelas características de resistência e durabilidade, após hidratados.

Os aluminatos tem como principal formação o Aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Representam em média 20% dos produtos do clínquer, tem a função de principal de controlar o tempo de pega, conferir resistência inicial e atuar como barreira contra ataques de cloreto.

Outros compostos estão presentes no clínquer, formados no processo, como os álcalis do concreto, que otimizam a reação dos aluminatos e promovem, junto à Portlandita o incremento do pH do compósito cimentício. Estão presentes também impurezas, porém todos estes são comumente encontrados em pequenas quantidades, não influenciando nas características do cimento.

O crescente conhecimento sobre os compósitos cimentícios, atualmente, proporcionou a visibilidade de mecanismos que outrora eram desconhecidos, sendo principalmente relacionados à durabilidade. Muitas vezes a alternativa encontrada para compensar a perda de propriedades relacionadas com a durabilidade era o aumento do teor de cimento, solução esta que aumenta o custo do produto final e diminui a sua sustentabilidade (Calvo *et al.*, 2016).

2.1.2 Formação dos produtos hidratados e microestrutura

Após o contato dos grãos de cimento com a água, a reação de hidratação é iniciada. Em alguns minutos há formação dos primeiros produtos hidratados que começam a promover consistência na mistura, conhecido como início do tempo de pega.

Os primeiros cristais são decorrentes da hidratação dos aluminatos, que são os mais reativos na fase anidra, formando a Etringita e depois o Monossulfato. Segundo Mehta e Monteiro (2014) os aluminatos são conhecidos por se hidratarem a uma velocidade mais rápida do que os silicatos, sendo assim responsáveis pelas características de pega e enrijecimento da pasta.

Logo após, os silicatos começam a reagir também formando o hidróxido de cálcio e o silicato de cálcio hidratado, os quais compõem 75% do cimento e têm papel dominante no endurecimento. O CH tem sua formação presente no decorrer das primeiras horas do concreto e promove um ambiente alcalino, devido ao seu alto pH, pela presença das hidroxilas em sua formulação. Com isso é o produto mais influente na durabilidade do concreto.

Algumas horas depois da formação do CH é que se começa a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto mais importante do concreto. Ele desempenha um papel dominante na determinação das propriedades mecânicas, físicas e químicas (GARTNER *et al*, 2017) sendo o principal responsável pelo ganho de resistência e redução da porosidade da matriz. Também, é o produto mais produzido até a estabilização da reação.

Com o passar do tempo, todos os componentes do concreto (areia, brita e os produtos hidratados) vão se encaixando e formando uma microestrutura mais coesa. Como a reação de hidratação é expansiva, essa coesão vai aumentando porque os produtos hidratados, principalmente o C-S-H, vão preenchendo os vazios existentes na medida em que são formados.

Influenciam também na densidade o fator água/ cimento e o traço escolhido. Quanto mais água a mistura possuir, mais espaços vazios serão deixados após o endurecimento e a saída desta água. Ou seja, o volume de vazios é diretamente relacionado ao fator a/c (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Contudo, não se deve reduzir muito sua quantidade, pois pode causar um efeito de floculação do cimento, aumentando as chances de haver grãos de cimento não hidratados. Neville (2016) afirma que em um fator a/c abaixo de 0,28 a hidratação completa não é obtida pela quantidade insuficiente de água.

Para reduzir a porosidade do concreto, pode-se introduzir adições que tenham maior finura do que o cimento para preencher os poros menores e, assim, deixar a

matriz mais coesa. Essa redução da porosidade pelo efeito físico do empacotamento é chamado de efeito fíler.

Nas primeiras idades esse efeito tem impacto positivo, pois, com a redução dos vazios, os produtos hidratados que estão sendo formados se desenvolvem em um menor espaço e se tornam mais densos por não conseguirem se expandir quando confinados. Quando ocorre esse fenômeno, chama-se de ponto de nucleação.

Essa densificação dos compostos tornam os produtos hidratados mais resistentes aos ataques dos agentes agressivos. Isto ocorre porque, como os espaços estão menores, eles ficam menos acessíveis, uma vez que estão confinados. Mehta e Monteiro (2014) explanam que a nucleação tem o efeito de substituir a estrutura de grãos maiores de um cristal por vários grãos pequenos, com estrutura aleatória, tornando-os menos cristalinos e aumentando a resistência.

Segundo Piekarczyk (2013) a nucleação inicia na dissolução do cimento anidro, na fase líquida, formando os cristais. Kong *et al* (2018) citam que após ocorrer a nucleação, os cristais se depositam na superfície dos grãos. Contudo, a adsorção em grãos de cimento dificulta a formação de mais produtos de hidratação (PIEKARCZYK, 2013).

Porém, com a presença de adições minerais mais finas que o cimento, há um efeito de dispersão do cimento, deixando os compostos do cimento mais distribuídos e confinados. Com isso, de acordo com Neville (2016), as adições promovem um efeito catalizador (por adsorverem os cristais já formados em pequenos espaços) e a reação ocorre mais rapidamente, favorecendo a densificação da pasta.

Outro ponto que deve ser observado na microestrutura é a zona de transição (ZT) entre os agregados e a matriz cimentícia. Essa interface entre o agregado e a pasta de cimento é considerada uma fase adicional ao concreto, gerada pela presença do agregado, com alta porosidade e com forte influência no comportamento mecânico (JEBLI *et al*, 2018).

Ocorre que, quando inserida a água de amassamento, os agregados tendem a adsorver essa água em sua superfície elevando a fator a/c nesses locais. Mesmo os produtos hidratados se depositando nesses locais há uma tendência elevada de se ter maior porosidade na ZT. Mehta e Monteiro (2014) citam que filmes de água

formam-se próximos aos agregados e que essa água tende a se acumular mais em torno de agregados achatados, alongados e grandes.

Neville (2016) explana que também a fragilidade na ZT é decorrente de partículas de cimento seco que se depositam em grandes agregados, causando o efeito parede. Jebli *et al* (2018) corroboram com as afirmações dos dois autores, o qual afirma que as alterações na ZT são decorrentes do excesso de água pelo efeito parede e pela exsudação interna na superfície do agregado.

Entretanto, as adições muito finas são positivas também nesses aspectos, pois com o efeito de dispersão e de refinamento dos poros com materiais há uma otimização da zona de transição.

Como o hidróxido de cálcio é formado primeiro em relação ao C-S-H, há uma tendência de nos agregados maiores ter a zona de transição com um elevado teor de CH. Com isso, segundo Neville (2016), em concretos com adições pozolânicas a reação secundária entre a sílica e o CH aumentam a resistência da ZT.

As propriedades e características das três fases do concreto citadas (agregados, matriz cimentícia e zona de transição) determinam todas as características restantes do concreto. Com isso, é fundamental observar a microestrutura para entender o comportamento do concreto.

2.2 Considerações sobre concretos autoadensáveis

O concreto autoadensável (CAA) é um novo tipo de concreto, desenvolvido para otimizar e atribuir velocidade aos processos do lançamento e adensamento *in loco*. Esse novo conceito de concreto se expande em um período em que está se exigindo desse material novas possibilidades e características em decorrência das novas estruturas com formas geométricas diferentes do quadrado tradicional e com uma exigência de tempo reduzido de execução.

Apesar de ter sua utilização em larga escala apenas nesse século, o primeiro CAA foi desenvolvido no Japão em 1988 por um grupo de pesquisadores que buscavam um concreto que conseguisse preencher elementos estruturais com altas taxas de armadura sem precisar de vibração, evitando a formação de nichos. Contudo, sua estreia foi apenas em 1997 na construção da ponte Akashi-Kaikyo.

Para ser caracterizado como concreto autoadensável, a mistura deve se comportar como um fluido e, segundo EFNARC (2005), deve possuir três características:

- Capacidade de preenchimento: a mistura deve ter a competência de fluir dentro da fôrma, ocupando todos os espaços entre as armaduras, somente pelo seu peso próprio, mantendo a sua superfície nivelada.
- Habilidade de passagem por obstáculos: é a capacidade do concreto passar pelas armaduras e reduções de seção sem que haja obstrução do fluxo.
- Resistência à segregação: propriedade relacionada à coesão, que impede a separação dos seus componentes e mantém a mistura uniforme.

Essas propriedades são possíveis devido ao aditivo superplastificante (SP) utilizado, que promove a ionização dos grãos de cimento. Estes grãos se repelem e se dispersam melhor, com isso impedem o arqueamento e permitem a fluidez. Arelado ao uso do SP, o elevado teor de finos no traço e reduzida a quantidade de brita também auxiliam à fluidez.

Rajhans *et al* (2018) explanam que os componentes do CAA são os mesmos do concreto convencional, no entanto a diferença está na proporção da mistura, com mais pó, menos brita, a incorporação de aditivos superplastificantes redutores de água e em algumas vezes, aditivos modificadores de viscosidade. Essa diferença está apresentada na Figura 2.1.

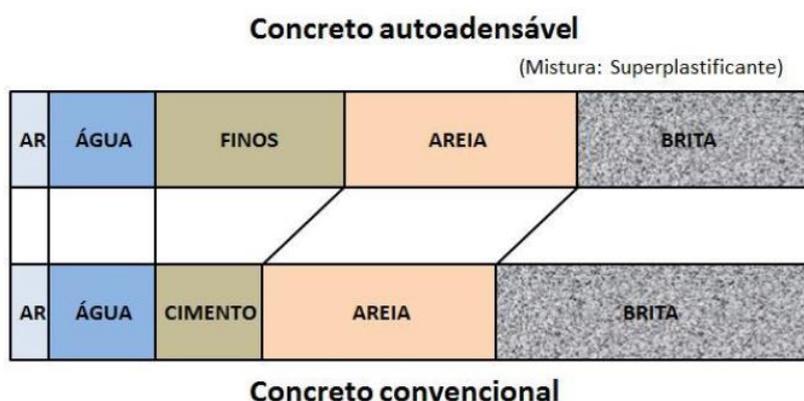


Figura 2.1 – Comparação das proporções dos materiais entre os concretos autoadensável e convencional. Fonte: Okamura & Ouchi (2003).

Como os CAA's têm um maior teor de finos, para o consumo de cimento não ser muito alto, abre-se a possibilidade de utilização de adições minerais, para minimizar o efeito ambiental negativo proveniente da poluição causada pela fabricação do cimento.

Estas adições podem inclusive otimizar as três propriedades necessárias citadas, agindo como modificadores de viscosidade e como dispersantes do cimento. Ahari *et al* (2015) demonstraram que as adições agem como viscosificadores se ajustando à performance desejada. No presente estudo serão estudadas as adições minerais metacaulim, pozolana da casca de arroz, biomassa da cana-de-açúcar e cal hidratada, apresentadas adiante.

2.3 CAA com elevados teores de adições minerais

A situação atual do meio ambiente é um desafio a se projetar as chamadas construções sustentáveis, onde se utilizam materiais alternativos, que aplicados corretamente, proporcionem novas oportunidades e minimizem os impactos ambientais. Diante deste desafio, novas técnicas construtivas vem surgindo como alternativas para o uso na construção civil. Trabalhos vêm sendo desenvolvidos com concretos autoadensáveis na busca de soluções e inovações que ajudem a divulgar novos materiais que venham a diminuir o uso de cimento Portland através da incorporação de resíduos.

Como o desenvolvimento sustentável é atualmente um problema global urgente, várias indústrias têm se esforçado para alcançar a redução no gasto de energia, sendo a grande utilização de materiais, o alto consumo energético e a emissão de CO₂ os pontos mais desfavoráveis (YU *et al.*, 2015). Contudo, a utilização de resíduos industriais e agroindustriais no CAA possibilita a sua aplicação sustentável, por meio do reuso desses materiais e redução do teor de cimento, o qual implica em menor poluição pelo processo produtivo do cimento.

Uysal e Yilmaz (2011) compilam diversos estudos que 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 o componente mais caro. Cada adição mineral tem suas próprias vantagens e desvantagens, porém,

a combinação de várias pode explorar suas vantagens e aumentar o nível de substituição do cimento (LE *et al.*, 2015).

Uma grande vantagem das adições, Segundo Liu *et al* (2017), é a porosidade das suas partículas que absorvem água e podem promover a cura interna. Nie *et al* (2017) citam que a água absorvida pode promover uma reação pozolânica mais eficiente, uma vez que esta reação requer água, e com a absorção pode-se ter uma menor fator a/c , tendo também a cura interna para melhorar a microestrutura dos produtos hidratados na zona interfacial de transição.

Wongkeo *et al* (2014) utilizaram teores de substituição de 50 a 70% e observou que pode-se alcançar resistências de 60 MPa, sendo as amostras ternárias (cimento, cinza volante e sílica) as de melhor desempenho, se comparado à binárias (cimento com cinza volante ou sílica). Ao substituir 50% do clínquer, dos concretos produzidos, cerca de 1 bilhão de toneladas de CO₂ por ano deixam de ser emitidas (CELIK *et al.*, 2014). Contudo é necessário desenvolver mais pesquisas para a aplicação de tais teores, pois a bibliografia ainda é restrita.

2.3.1 Incorporação de Metacaulim

Metacaulim é um material pozolânico termicamente ativado que é obtido pela calcinação de argila caulinitica a temperaturas moderadas que variam de 650 a 800°C (BADOGIANNIS *et al.*, 2015). Kannan (2018) cita que a queima é necessária para torná-los materiais pozolânicos altamente reativos.

Durante a hidratação do cimento, o metacaulim transforma o hidróxido de cálcio (CH) em silicato de cálcio hidratado (C-S-H), conferindo durabilidade ao concreto (KAVITHA *et al.*, 2016). A melhoria da durabilidade é devido à alta atividade pozolânica do metacaulim e efeito de enchimento que podem levar à produção de um concreto mais consistente, coeso e denso (BADOGIANNIS *et al.*, 2015; SFIKAS *et al.*, 2014).

Como o CH é o produto de hidratação mais solúvel, este se dissolve, quando o concreto é exposto à água, aumentando a porosidade e tornando o concreto mais vulnerável a lixiviação adicional e ataque químico (KAVITHA *et al.*, 2016). O metacaulim possui uma significativa quantidade de sílica e alumina, logo, espera-se

que a formação do C-S-H seja mais densa se comparado a outras adições, conduzindo assim a uma microestrutura do concreto consideravelmente melhorada (BADOGIANNIS *et al.*, 2015). A alta reatividade do MK com o cimento e sua usabilidade para acelerar a hidratação do cimento a diferenciam de outros materiais pozolânicos (KANNAN & GANESAN, 2014).

- Propriedades no estado fresco

Em estudo realizado por Sfikas *et al.* (2014) no concreto autoadensável o metacaulim conferiu maior consistência, podendo ser utilizado como modificador de viscosidade, e elevados ganhos de resistência mecânica à compressão e à tração.

Kannan (2018) também testou concretos CAA's com metacaulim e observou que ele, quando utilizado em substituição ao cimento, em teores de 15% ou 25% acarreta uma maior demanda de superplastificante e de água para obtenção do mesmo índice de espalhamento (SF3) que o CAA sem adição. Gill e Siddique (2017) em seus concretos obtiveram uma consistência SF2 com 15% de substituição e citam que o metacaulim demandou mais água.

Dadsetan e Bai (2017) observaram também uma maior demanda de aditivo, de forma bastante significativa, mas que misturas com até 20% de metacaulim obtiveram consistência acima de 750 mm (SF3) e nos outros ensaios o CAA se comportou bem. Kannan e Ganesan (2014) obtiveram bons resultados na caixa-L e no funil-V com teores de até 15%, todos atingindo os critérios máximos da EFNARC.

- Propriedades mecânicas

Kannan (2018) testou a resistência à compressão aos 28 e 90 dias em CAA's com 5% a 30% de metacaulim e obtiveram o melhor resultado com 15% de substituição. Ele estudou também a interação com o PCA e explicou que a mistura ternária com até 40% de substituição apresentou ótimos resultados.

Kavitha *et al.* (2014) obtiveram 76 MPa de resistência à compressão aos 56 dias com 10% de metacaulim, e citam que é necessário observar os resultados em idades elevadas em virtude da reação pozolânica. Resultados semelhantes foram obtidos no

CAA de Cheng *et al* (2017) onde até os 7 dias o resultado do traço referência foi superior ao traço com 5% de metacaulim, revertendo aos 28 dias.

Kavitha *et al* (2015) obtiveram resultados semelhantes quando ao ganho de resistência mecânica e afirmam que o metacaulim reduz a largura de microfissuras, conferindo propriedades a níveis micro e macroscópico, e que seu uso será revolucionário para a indústria da construção. Gill e Siddique (2017) apresentaram um CAA com 15% de metacaulim com 25% de elevação da resistência em relação à mistura controle, atribuindo o aumento principalmente à reação pozolânica.

Apesar dos bons resultados de resistência à compressão, na maioria dos artigos, ser apenas em idade avançadas, Dadsetan e Bai (2017) apresentam um metacaulim com altíssima área superficial com surpreendentes 77,7 MPa aos 7 dias com substituição do cimento em 20%. Isso demonstra que também é possível obter elevadas resistências iniciais através da maior moagem.

- Indicadores de durabilidade

Quanto à durabilidade, Kannan & Ganesan (2014) concluíram que até 40% de substituição do cimento por metacaulim não há qualquer efeito diverso na durabilidade, sendo isto conduzido por uma melhoria benéfica na permeabilidade. Corroborando a esta afirmação, Sfikas *et al* (2014) aduzem 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 de metacaulim em CAA também resulta em uma diminuição exponencial do coeficiente de migração de cloreto não estável e em um aumento da resistência à penetração de cloreto em mais de duas classes (BADOGIANNIS *et al.*, 2015). A penetração de água, permeabilidade ao gás, absorção de água, resistividade elétrica e difusão iônica apresentaram grandes melhorias nos CAA com incorporação de metacaulim produzidos por Shekarchi *et al* (2010).

Kavitha *et al* (2016) também obtiveram bons resultados na absorção de água, onde houve redução de água em todos os teores (5 à 15%) e afirmam que há uma grande resistência ao transporte interno de água pela modificação da estrutura dos

poros. Com a redução do transporte de água os agentes deletérios tem uma possibilidade muito reduzida de entrarem no concreto.

Com a redução do CH é previsto que a carbonatação tenha maior profundidade, contudo em seu estudo Singh e Singh (2016) afirmam que o metacaulim obteve um comportamento positivo, de forma que aumentou a resistência à carbonatação nas misturas de CAA, sendo o resultado atribuído ao refinamento dos poros eficaz e também à hidratação prolongada do concreto estudado.

É fundamental notar que o metacaulim é uma adição mineral cuja sua incorporação otimiza o CAA em diversas propriedades, apresentando, diferentemente das outras adições, desempenho superior a traços com 100% de cimento, justificando seu uso não apenas pela busca de sustentabilidade. Devido a isto, ela estará presente em todas as misturas desenvolvidas na presente pesquisa.

2.3.2 Incorporação da Pozolana da Casca de Arroz

A pozolana da casca de arroz (PCA) é um resíduo agrícola do processo de moagem da cobertura externa de um grão de arroz, que em condições adequadas de incineramento, pode ser utilizada como substituta do cimento (LE & LUDWIG, 2016). Ao ser incinerada ela adquire reatividade, que é atribuída ao alto teor de sílica amorfa, e à área superficial muito grande governada pela estrutura porosa das partículas, sendo também favorecida pelo aumento de sua finura. [CHAO-LUNG *et al.*, 2011; LE & LUDWIG, 2016].

A composição química da PCA depende da temperatura e do tempo de queima, mas as variações nos componentes não são significativas. Porém se provenientes de processo de combustão não controlada conterá mais produtos não reativos (SENSALE, 2010). Por sua finura, ele produz um refinamento na estrutura dos poros, bem como aumenta a largura da zona de transição, atuando como pontos de nucleação para os produtos da hidratação. [KANNAN & GANESAN, 2014; SENSALE, 2010]. Esse efeito físico restringe o crescimento dos cristais gerados na hidratação, aumentando sua densidade e sua estabilidade.

Já seu efeito químico está relacionado ao fato de ser um material altamente pozolânico que se combina rapidamente com hidróxido de cálcio formando um C-S-H

secundário, sendo este composto o principal responsável pela resistência. [LE & LUDWIG, 2016; SENSALE, 2010]. Respalando a afirmativa destes autores, os CAA produzidos por Chopra *et al.* (2015) com até 15% de substituição promoveram acréscimo de resistência à compressão e à tração quando comparados ao concreto referência.

- Propriedades no estado fresco

Quanto às propriedades no estado fresco, a incorporação de PCA diminuiu ligeiramente a habilidade passante nas armaduras, aumentou significativamente a viscosidade plástica e a resistência à segregação e também eliminou a exsudação no concreto de Le & Ludwig (2016). Como sua forma é angular e sua partícula porosa, a PCA aumenta a capacidade de retenção de água, aumentando a viscosidade da mistura (VAN TUAN *et al.*, 2011).

Apesar do aumento da viscosidade, os concretos confeccionados por Safiuddin & Soudki (2012) satisfizeram os critérios de habilidade passante e capacidade de enchimento para misturas de CAA com incorporação de elevados teores de PCA. Contudo, em teores de água baixos a presença de PCA torna o fluido muito viscoso de forma a não satisfazer os parâmetros exigidos, principalmente devido ao aumento do volume e absorção de água.

Makul e Sua-iam (2018) estudaram CAA's com PCA e observaram uma redução da fluidez no teste de *Slump flow* e uma maior viscosidade no funil-V, atribuindo os resultados à angularidade das partículas da casca do arroz. Kannan e Ganesan (2014) apresentaram resultados abaixo do SF2 com 15% de PCA, obtendo resultados não adensáveis com 25% de substituição.

- Propriedades mecânicas

A resistência à compressão do concreto autoadensável de Kannan e Ganesan (2014) obtivera um resultado superior ao de referência com 15% de PCA; no entanto, com 20% o valor já foi menor, sendo atribuído à maior demanda de água que provocou mais vazios permeáveis. O CAA estudado por Makul e Sua-iam (2018) apresentaram

também resultados menores que o referênciã com o teor de 20% de substituição e teve a mesma justificativa da maior absorção de água.

Gill e Siddique (2017) obtiveram resistênciã de 43 MPa com 10% de PCA aos 28 dias, sendo superior à mistura referênciã, contudo com 20 e 30% os resultados foram inferiores e caíram à medida que o teor de substituição se elevou. No entanto Kannan (2018) obteve um limite ótimo com 30% de PCA obtendo 35 MPa aos 90 dias, com resultado superior ao referencial.

A velocidade do pulso ultrassônico foi analisada por Sandhu e Siddique (2017) em traços com 0 a 100% de PCA e obtiveram resultados abaixo do traço referênciã, atribuindo aos vazios presentes na zona de transição o resultado, contudo os autores afirmam que 0 a 30% de incorporação de PCA indicaram excelentes condições de mistura do CAA avaliado.

- Indicadores de durabilidade

A absorção de água pela PCA tem uma característica positiva para a microestrutura do concreto, pois ela proporciona uma cura interna, a qual otimiza a formação dos compostos, aumentando o grau de hidratação do cimento em fases posteriores (VAN TUAN *et al.*, 2011). Os concretos de (CHOPRA *et al.*, 2015) incluindo PCA apresentaram redução da porosidade da matriz em todas as misturas, sendo essa porosidade reduzida também ao longo do tempo da hidratação.

Esta otimização da matriz do compósito é afirmada em testes de penetração de íons cloreto por Chopra *et al* (2015) e de ataque ácido por Kannan & Ganesan (2014), onde a presença da PCA aumentou a resistênciã à penetração de cloretos e se mostrou mais resistente ao ataque de ácido sulfúrico em comparação à mistura de controle.

Contudo, concretos submetidos à carbonatação tem redução devido ao consumo do hidróxido de Cálcio pela alta pozolanicidade. Isso foi apresentado no estudo de Torgal *et al* (2012) os quais aduzem que o PCA tem um efeito adverso na carbonatação devido ao seu maior volume, contudo apresentam resultados com até 50% de redução da profundidade de carbonatação quando os CAA's foram curados 28 dias.

2.3.3 Incorporação do Resíduo da Biomassa da Cana-de-açúcar (RBC)

A biomassa é um importante subproduto da indústria da cana-de-açúcar, sendo sua maior parte queimada para produzir vapor e eletricidade em uma usina de cogeração na fábrica de etanol. O resultado da combustão da biomassa consiste em uma cinza formada principalmente por óxidos de silício e alumínio, que indicam seu potencial como adição mineral, tendo estes, propriedades cimentantes que viabilizam seu uso conjunto ao cimento. [KAZMI *et al*, 2016; FAIRBAIRN *et al*, 2010].

A possibilidade de utilização do RBC como substituinte do cimento tem como objetivo reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera, assim como as outras adições minerais. Todavia, além da biomassa ser fonte de energia, é importante afirmar que a produção de energia a partir dela pode ser considerada uma energia renovável e este processo não libera CO₂ novo na atmosfera, o dióxido de carbono apenas mantém um ciclo na atmosfera (PEREIRA *et al.*, 2015). Logo, o seu uso no concreto reduz a produção de CO₂ e incentiva a produção de energia menos agressiva.

As operações para transformação de subprodutos agroindustriais em pozolanas correspondem à moagem e classificação, onde o tempo de moagem é proporcional ao aumento da área superficial específica. O aumento da superfície específica é diretamente responsável pela cinética das suas reações pozolânicas, onde o uso de pozolanas na faixa de tamanho fino e ultrafino permite alcançar uma maior densidade de empacotamento da mistura (CORDEIRO *et al*, 2009).

Contudo, tempos elevados de moagem consomem energia e inviabilizam economicamente o uso do RBC. É importante investigar o efeito de vários métodos de processamento sobre o desempenho pozolânico de cinzas de bagaço, incluindo queima, moagem, remoção de partículas fibrosas por peneiramento e combinação de diferentes métodos de processamento para alcançar seu uso efetivo em concreto (BAHURUDEEN & SANTHANAM, 2015), pois somente assim o uso como substituição ao cimento atenderá aos três critérios de sustentabilidade: econômico, ambiental e social.

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). Pereira *et al.* (2015) realizaram testes em argamassas com

até 25% de substituição e observaram que o RBC obteve resultados equivalentes de resistência em comparação à mistura de controle.

- Propriedades do estado fresco

Sua-Iam e Makul (2017) estudou concretos autoadensáveis e verificou que o RBC exigiu a maior quantidade de superplastificante dentre as adições estudadas, devido à sua maior área superficial. Em ensaios realizados com CAA pôr Akram *et al.* (2009) a incorporação de RBC conduz a uma menor fluidez, comprovada pelos testes no estado fresco, consumindo uma maior quantidade de água, porém mesmo com adições de 20% o CAA atingiu os limites esperados.

Essa característica possui a desvantagem do teor de substituição ser limitado em função do fator a/c, contudo o aumento da viscosidade é positivo pois diminui a exsudação e com a dosagem certa de superplastificante é possível aplicar, posto que os resultados de Akram *et al.* (2009) apresentaram resistências à compressão equivalente e por vezes superiores ao controle.

O aumento da viscosidade também foi observado no CAA confeccionado por Sua-iam e Makul (2013), entretanto a resistência à compressão reduziu com o aumento do teor de substituição. Este fato provavelmente ocorreu porque a relação a/c utilizada pelos autores foi muito baixa, prejudicando a quantidade de água necessária para a homogeneização da mistura, posto que o RBC tem menor densidade. Contudo, Sua-iam e Makul (2013) citam que este efeito pode ser compensado com o uso simultâneo do Fíler calcário.

- Propriedades mecânicas

A adição de 10% do bagaço da cana de açúcar no concreto autoadensável produziu uma elevação da resistência à compressão em relação à mistura referência, porém a elevação do teor diminuiu a resistência, conforme relatado pôr Prusty *et al.* (2016) e; Modani e Vyawahare (2013). Os resultados de Sua-iam e Makul (2017) em todos os teores de substituição os traços com RBC foram piores que o referência.

Já os concretos CAA's de Akram *et al* (2009) a biomassa teve efeito positivo sobre a resistência nos teores testados de 15 e 20%, atingindo resultados superior e igual, respectivamente, ao referência. O resultado foi atribuído, segundo os autores, pelo refinamento do tamanho dos poros e do tamanho do grão, melhor empacotamento e redução do fator a/c.

- Indicadores de durabilidade

Os estudos de Bahurudeen *et al.* (2015) mostram que o uso de até 25% de RBC se destaca no concreto pelo baixo calor de hidratação, ganho de resistência (até 20% de substituição) devido à reação pozolânica, redução significativa na permeabilidade por causa do refinamento do poro e comportamento de contração de secagem similar ao controle. Testes de durabilidade também foram realizados por Bahurudeen *et al.* (2015), onde pôde ser constatado que a incorporação de RBC diminuiu consideravelmente a condutibilidade elétrica e a difusão do cloreto conforme aumento do teor.

Resultados equivalentes são apresentados no estudo de Ganesan *et al.* (2007), quanto à difusão dos íons cloreto, teores de até 30% de RBC tem resultados significativamente menores quando comparados ao concreto de controle; Em resultados de resistência, a incorporação de até 25% de RBC apresenta resultados equivalentes ou superiores ao controle.

Almeida *et al.* (2015) estudaram a carbonatação em argamassas e obteve um resultado semelhante à referência com 30% de RBC e uma profundidade elevada com 50%, sendo atribuído ao resultado de 30% um melhor empacotamento produzido pela finura do RBC utilizado. Contudo, apenas estudos limitados estão disponíveis sobre o desempenho de durabilidade de RBC (BAHURUDEEN *et al.*, 2015).

2.3.4 Incorporação da cal hidratada

Embora atualmente o concreto seja feito com o uso de cimento Portland como aglutinante, sabe-se que, antigamente, os ligantes usados no concreto eram cal e pozolanas (CACHIM *et al.*, 2010). A indústria do cimento apresentou vantagens como altas resistências, porém no decorrer dos anos, as emissões de CO₂ e o consumo de

energia no processo de fabricação do cimento induziram a um pensamento mais sustentável, sendo a cal, uma opção de produto menos agressivo.

A fase cristalina predominante na sua composição é a Portlandita, porém outras fases presentes são silicato dicálcico, silicato tricálcico, calcita e quartzo (CACHIM *et al.*, 2010). Suas grandes vantagens são a alta alcalinidade e a não presença de sulfato na composição, protegendo o composto contra ataques agressivos que causam a degradação do concreto. Embora a cal apresente vantagens quanto aos índices de durabilidade, sua deficiência está na baixa resistência à compressão oferecida, induzindo apenas a utilização de adições minerais para substituir o cimento.

Em concretos com altos teores de substituição por adições pozolânicas, há o consumo dos produtos alcalinos para a formação do C-S-H secundário. Esse consumo da Portlandita por atividade pozolânica reduz a alcalinidade da água do poro, tornando o concreto mais susceptível à carbonatação (CADORE, 2008). Assim, a necessidade de confeccionar concretos ecoeficientes pela utilização de materiais suplementares ao cimento requer mais CH disponível e, assim, são necessárias novas investigações sobre a adição de cal em concretos (MIRA *et al.*, 2002).

- Propriedades no estado fresco

Segundo Alghazali & Myers (2017), em seu estudo as misturas de CAA com cal apresentaram excelentes propriedades reológicas e satisfizeram os requisitos para aplicação do concreto autoadensável em pré-moldes e pontes. Nos concretos autoadensáveis de Fonseca (2016) a cal hidratada atribuiu um aumento no diâmetro de espalhamento, sendo devido, segundo o autor, ao aumento do volume da pasta que lubrifica os grãos e favorece a fluidez.

- Propriedades mecânicas

A cal hidratada foi utilizada para melhorar a resistência à compressão nas primeiras idades dos concretos autoadensáveis de Alghazali & Myers (2017) e apresentou resultados positivos pois, segundo os autores, ela aumentou a atividade pozolânica de outras adições presentes.

Acharya & Patro (2016) colaboram aduzindo que o efeito de enchimento do pó de cal e sua finura também tem impacto positivo no desenvolvimento de força, à medida que a hidratação prossegue com a idade, onde mais e mais gel de silicato de cálcio hidratado são depositados nos sistemas de poros abertos de pasta hidratada levando a um aumento contínuo na resistência à compressão.

A resistência dos concretos com adições pozolânicas poderia ser melhorada pela adição de cal hidratada, por este composto garantir uma hidratação melhor e mais completa em sistemas com baixo teor de cimento na mistura (LORCA *et al.*, 2014). Isso ocorre devido à cal aumentar o pH na solução dos poros e favorecer a reação pozolânica. Como consequência, a solubilidade da sílica amorfa e alumina são potencializadas, conferindo maiores resistência e durabilidade nos estágios iniciais (LORCA *et al.*, 2014).

- Parâmetros de durabilidade

Anjos *et al.* (2015) avaliaram comparativamente os índices de durabilidade em misturas de CAA com substituição de 60% a 70% do cimento, sendo adicionado 5% de cal hidratada em traços correspondentes. Quando a cal foi adicionada os resultados apontaram boa redução da absorção por capilaridade, da difusão dos íons cloreto e da profundidade de carbonatação, apresentando ainda acréscimo de resistência, ratificando a utilização da cal.

Mira *et al.* (2002) produziram concretos com a adição de 20% de cinza volante e compararam os resultados de carbonatação em misturas com e sem adição da cal hidratada. Os resultados apresentaram uma redução da profundidade de carbonatação nos concretos com adição de até 10% de cal hidratada. Porém, nas misturas com mais de 10% os resultados de carbonatação começaram a ser desfavoráveis, mostrando o teor máximo de adição.

CAPÍTULO 03

Parâmetros de durabilidade em concretos

Entende-se como durabilidade em concretos, a capacidade de resistir a intempéries, ações físicas, ataques químicos e outras condições de serviço sem comprometer a continuidade de sua utilização. Kapoor *et al* (2016) indicam que para melhorar a durabilidade, a microestrutura do concreto deve ser otimizada. Porém, muitas vezes a questão da durabilidade está sendo ignorada desde que engenheiros supõem que o concreto forte também é durável (KANELLOPOULOS *et al.*, 2012).

A durabilidade é uma propriedade intrinsecamente ligada à **estrutura de poros** contidos no concreto, por meio da capacidade de interação com o ambiente externo e **transporte dos agente agressivos** no interior do concreto. Corroborando a esta afirmativa, Silva & Brito (2015) aduzem que as condições para os processos de transporte envolvidos nos mecanismos de deterioração do concreto dependem fortemente da estruturas de poros.

Por ser um produto proveniente da mistura de diversos materiais, o concreto possui um complexo arranjo estrutural, em decorrência da diversidade de formato dos componentes e das interações físico-químicas ocorridas na matriz cimentícia. Ludovico-marques *et al.* (2012) explicam que essa maior heterogeneidade, com a presença de ligações fracas, tais como poros, vazios e microfissuras em rochas muito porosas estão associadas à redução da resistência e durabilidade. Logo, este arranjo irá influenciar na porosidade, a qual refletirá na entrada de agentes agressivos que iniciarão a deterioração.

Estes mecanismos de deterioração provocam tensões internas, as quais resultam em expansões e retrações na pasta do concreto e na zona de transição com os agregados, ocasionando fissuras e decomposição dos produtos hidratados. Arelado a isto, os ambientes estão tornando-se cada vez mais agressivos e têm-se exigido desempenho dos materiais em limites mais elevados (CHEMROUK, 2015).

3.1 Estrutura porosa do concreto

A estrutura dos poros dos compósitos baseados em cimento é dinâmica e muda continuamente, onde, durante o processo de hidratação uma nova estrutura é desenvolvida, resultando em uma menor porosidade (KANELLOPOULOS *et al*, 2012). Após endurecido, o concreto possui uma escala de tamanho de poros diversificada, em decorrência do tamanho e do empacotamento dos seus componentes.

Os poros de concreto podem ser encontrados a partir da escala nanométrica para a escala milimétrica (ZINGG *et al.*, 2016), encontra-se a menor escala nos espaços entre as folhas do C-S-H. Conforme há acréscimo do espaço tem-se os vazios capilares, sendo estes produtos da água livre; em sequência, os espaços provenientes de ar incorporado e, por fim, o ar aprisionado, presentes na ausência de vibração, conforme Figura 3.1.

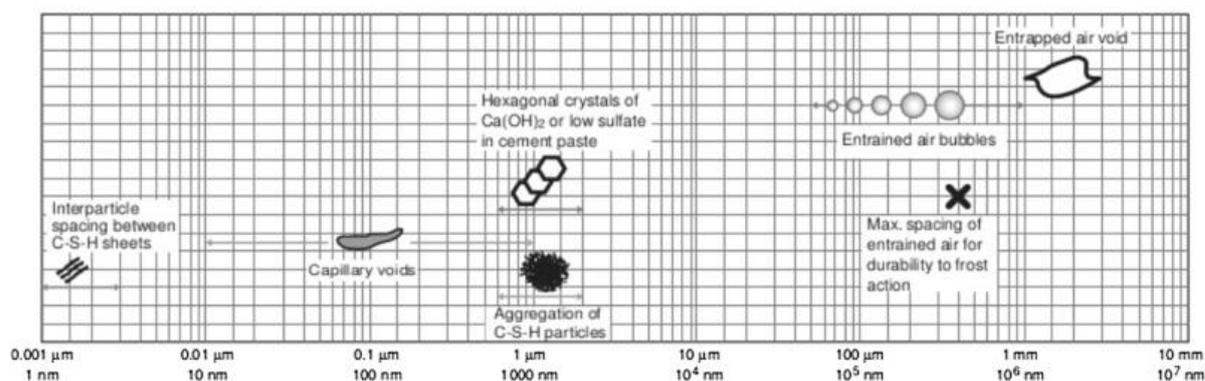


Figura 3.1 - Escalas de vazios dos poros sólida em concreto (Mehta & Monteiro, 2014)

A água livre, resultante do volume inserido acima do necessário à hidratação com a função de otimizar a consistência do concreto fluido, provoca a formação de poros, como supracitado. Ou seja, quanto maior a relação água / cimento maior o volume dos poros da matriz de cimento, aumentando assim o volume de poros interligados (SILVA & BRITO, 2015). Essa influência pode ser percebida na Figura 3.2, sendo o aumento do fator a/c determinante para o aumento do número de macroporos, facilitando o transporte de massa no interior da matriz.

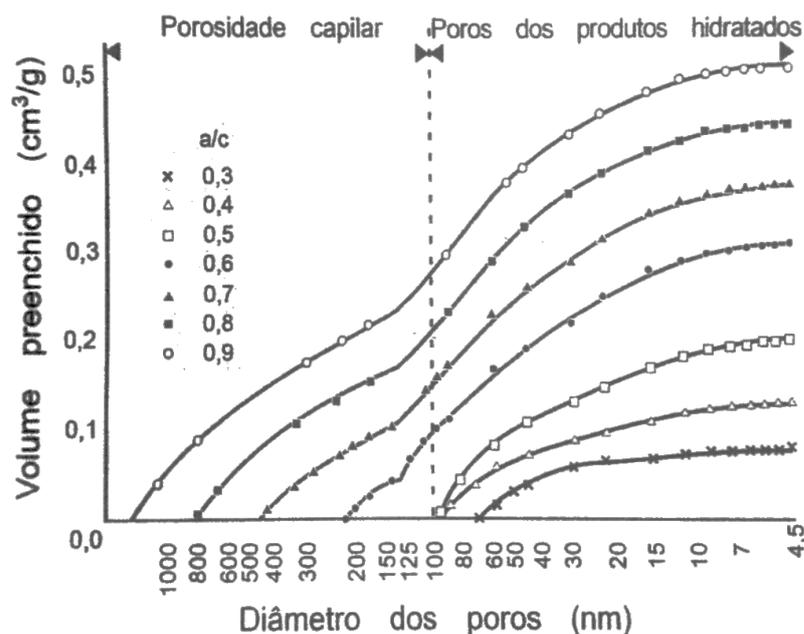


Figura 3.2 – Influência do a/c na porosimetria (METHA & MONTEIRO, 2014)

Esta interligação entre os poros é função da proximidade reduzida entre eles, e, conforme o volume de vazios aumenta, gera-se uma rede de conexões, permitindo a percolação de fluidos no interior da matriz do concreto. Essa percolação é mensurada pela permeabilidade, a qual, segundo Gong *et al* (2018) é caracterizada pela estrutura de poros conectados.

Segundo Ollivier & Vichot (2014) a interconexão é o que permite a penetração dos agentes agressivos externos para o interior do concreto. Poros descontínuos, poros contendo água adsorvida e poros com aberturas muito estreitas (independentemente do seu diâmetro) não afetam as propriedades de transporte de líquidos de materiais cimentícios (KANELLOPOULOS *et al.*, 2012).

A Figura 3.3 representa os tipos de vazios presentes no concreto, como um material poroso, esquematicamente. Um meio poroso é um tipo de material desordenado bifásico, no qual uma fase é sólida e a outra fase é um espaço de poros, o qual sendo contínuo permite que ocorra fluxo e transporte (XIAO & YIN, 2016). Deste modo, é possível visualizar os caminhos criados pelas redes conectadas para os agentes agressivos e movimentação da água livre.

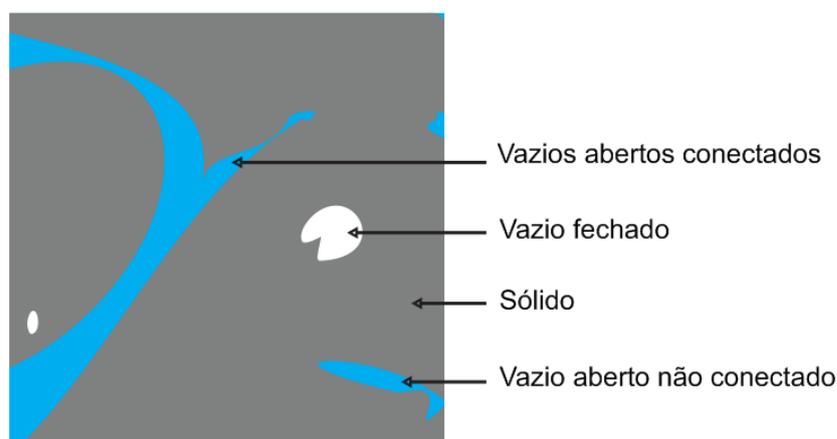


Figura 3.3 – Descrição esquemática dos vazios do concreto

Apesar da rede porosa do concreto poder ser proporcionalmente formada pelo incremento no volume de água, ela também é influenciada por outros fatores. A incorporação de ar, em função do processo de mistura e moldagem, pode influenciar interrompendo o empacotamento do cimento ou aumentando a permeabilidade, semelhante ao que se verifica com a relação a/c (WONG *et al.*, 2011).

Também influenciam, o diâmetro e o formato lamelar do agregado, os quais irão atuar principalmente na porosidade da zona de transição (ZT) em razão da maior exsudação, provocada pelo acúmulo de água nas partículas (PAULON & KIRCHHEIM, 2011).

Esta porosidade na ZT entre os agregados e a pasta interfere preferencialmente na resistência do concreto. Neville (2016) cita que a zona de transição ocupa entre um terço e metade do volume total da pasta, contribuindo significativamente para a permeabilidade do concreto.

A presença de adições minerais com finura maior do que o cimento e com bom empacotamento promove a redução do diâmetro dos poros. Com isso, os poros menores tem menor tendência de se conectarem, reduzindo a permeabilidade da matriz. Keulen *et al* (2018) apresentam nos resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio uma estrutura porosa refinada devido à inserção de adições minerais em pastas.

3.2 Transporte de massa no interior do concreto

Para melhor compreensão da degradação, a avaliação das propriedades de transporte é importante para avaliações a longo prazo de estruturas de concreto armado. Estas propriedades, segundo BADOGIANNIS *et al* (2015), estão diretamente relacionadas à capacidade de íons e fluidos de se moverem através de seu sistema de poros. E, uma vez que as espécies químicas penetraram no corpo de concreto através de um ou mais mecanismos de transporte, a degradação pode iniciar gradualmente por suas interações químicas e físicas com outros componentes (SHEKARCHI *et al.*, 2010).

Na maioria dos fenômenos relacionados com a durabilidade existe um ou mais mecanismos de transporte envolvidos, sendo assim, em orientações recentes para a durabilidade, as características de transporte surgem como critérios principais de avaliação (SHEKARCHI *et al.*, 2010). Estes mecanismos, atrelados aos resultados de desempenho mecânico e de ataques ácidos possibilitam o entendimento da estrutura porosa do concreto.

O tráfego de massa é principalmente influenciado pela geometria da rede de conexões e dos poros. Poros descontínuo ou estreitos, como supracitado, não afetam as propriedades de transporte em materiais cimentícios. O transporte de massa através da porção sólida da matriz também é desprezível quando comparado com aquele através dos poros (YUAN *et al.*, 2009).

O principal fator determinante ao tipo de transporte que ocorre é a saturação nos poros do concreto; quando o concreto encontra-se saturado o transporte é controlado por gradientes de pressão ou concentração (YUAN *et al.*, 2009). Quando não está saturado é regido por sucção quando o efluente estiver líquido ou difusão quando no estado gasoso.

Para avaliar a durabilidade do concreto, vários métodos de laboratório foram implementados sobre as propriedades de transporte do concreto endurecido. Os principais mecanismos de transporte do concreto são a permeabilidade, difusão, migração e absorção capilar, através das quais o meio agressivo penetra na massa do concreto e pode causar degradação gradual (SHEKARCHI *et al.*, 2010).

A permeabilidade é definida como o movimento de um fluido através de um meio saturado poroso sob um gradiente de pressão, favorecendo a entrada de água,

gás e íons agressivos no concreto (PLAGUÉ *et al.*, 2017). Ratificando essa informação, autores afirmam que a penetração de íons é amplamente controlada pela permeabilidade do concreto [Zhang e Wang, 2015; Liu *et al.*, 2017; Keulen *et al.*, 2018].

A migração iônica ocorre também quando o poro está saturado, porém ela transporta íons agressivos por diferença de concentração ou de energia potencial. Os íons de carga negativa são conduzidos por um processo de transporte que inclui várias forças motrizes, como gradiente de concentração, campo elétrico, fluxo de pressão e atividade química (Liu *et al.*, 2017).

A difusão refere-se à penetração de gases agressivos através de vapor de água. Para descrever o transporte difusivo, supõe-se, inicialmente, que as partículas estejam em estado atômico ou molecular (OLLIVIER & VICHOT, 2014). Todavia, o processo de degradação só inicia com a dissolução desses compostos em água. Logo, a condição de umidade do poro irá influenciar diretamente na velocidade da reação, conforme exibido na Figura 3.4.

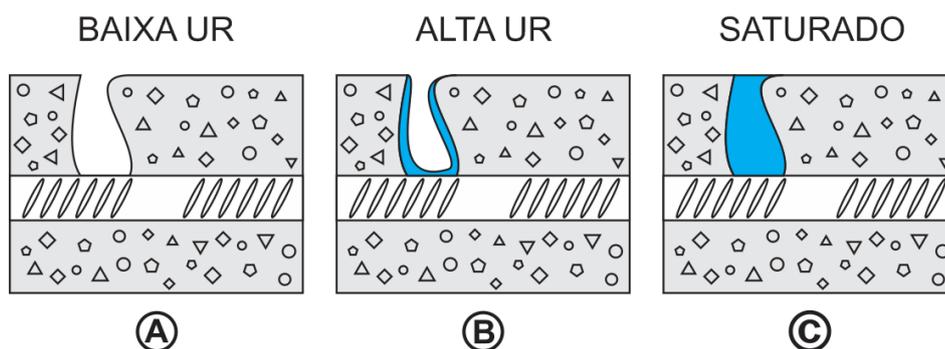


Figura 3.4 – Condições do poro mediante umidade relativa (IccET, 1988 apud Figueiredo e Meira, 2013)

Na condição A, em um poro sem a presença de água, os gases agressivos tem contato com a armadura porém a reação de corrosão não ocorre. Na condição B, a pior situação, o gás tem grande profundidade de penetração e toda a parede do poro oferta água para iniciar a dissolução dos compostos e desencadear a reação. Na condição C, apesar da presença de água no poro, o processo ocorre muito lentamente, pois segundo Bakker (1988, apud CARASEK & CASCUDO, 2011) a velocidade de migração é cerca de 10^4 vezes mais baixa do que a difusão do gás.

A absorção é um fenômeno de sucção capilar através da força de adesão entre a água e a estrutura porosa do concreto (CONCIATORI *et al.*, 2008). A absorção capilar mais baixa proporciona uma maior resistência ao concreto; entretanto, valores elevados indicam a existência de uma estrutura porosa altamente ligada ou baixa tortuosidade da rede de poros (NOUSHINI & CASTEL, 2016).

3.3 Agentes de deterioração

No contexto de durabilidade é imprescindível se ater aos processos de degradação do concreto e do aço para a manutenção da vida útil das estruturas. Contudo, o prolongamento da vida útil do cimento e dos compósitos de concreto, através da melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade, só ganhou grande importância nos últimos anos (NAJIMI *et al.*, 2012).

A união entre o aço e o concreto é possível em virtude do ambiente de proteção que o concreto confere ao aço, tendo em contrapartida o incremento de grande resistência pelo aço. Essa proteção ocorre de forma física, através do cobrimento, e quimicamente com a formação da película apassivadora. O meio alcalino elevado proporcionado pela matriz de cimento no concreto mantém a barra de aço num estado passivo devido à formação de uma camada de óxido de ferro na superfície do aço (YUAN *et al.*, 2009). Porém, os agentes agressivos tem a capacidade de reduzir a seção do cobrimento e romper a película, prejudicando-os.

O ataque ao concreto ocorre através da lixiviação, da expansão de compostos internos e na presença de agentes deletérios (HELENE *et al.*, 2011). Estes processos contribuem para a fragilização do concreto submetendo o aço ao processo mais perigoso, a corrosão. A corrosão é iniciada quando há a despassivação da película através dos ataques ácidos de íons cloreto ou de CO₂.

A corrosão induzida por cloreto na barra de aço domina a durabilidade de estruturas de concreto expostas a ambientes marinhos e saís de degelo, através de uma degradação localizada da camada passiva (YUAN *et al.*, 2009). Já a carbonatação ocorre de forma distribuída, como será abordado no próximo tópico de forma detalhada, visto que o presente estudo tem como objetivo avaliar a relação da carbonatação com a estrutura porosa e com a presença de Biomassa da cana-de-açúcar e cal hidratada.

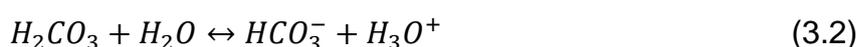
3.4 Carbonatação

A carbonatação apresenta-se como um destes fenômenos de redução da durabilidade os quais estão em expansão do conhecimento. Esse mecanismo ocorre por meio da penetração do dióxido de Carbono (CO_2), presente na atmosfera sob forma gasosa no poros do concreto (OLLIVIER & VICHOT, 2014). Com a presença de água nesses poros, o CO_2 reage com os compostos alcalinos resultantes da hidratação do cimento, reduzindo o pH interno da matriz cimentícia.

O aço quando embutido em concreto denso de boa qualidade estará rodeado por uma matriz de cimento hidratado contendo poros eletrolíticos com pH entre 13 e 14 (ANSTICE *et al.*, 2005). No diagrama de *Pourbaix* essa condição de alcalinidade confere ao aço um filme passivo que impede a corrosão, porém como o CO_2 ataca os compostos hidratados alcalinos a reação pode reduzir o pH a valores abaixo de 9, promovendo a despassivação e provável corrosão das armaduras em concretos armados.

Estes produtos hidratados envolvidos na reação são principalmente o CH (hidróxido de cálcio) e C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) (MORANDEAU *et al.*, 2004), sendo também considerado por alguns autores os álcalis do cimento (Potássio e Sódio). Taylor (1997) explana que a mecânica da reação envolve a dissolução do CO_2 na solução do poro da pasta e posterior reação com o Ca^{2+} para produzir Calcita.

A mecânica da reação citada por Taylor, no entanto, é apresentada de forma simplificada. Na carbonatação a atuação do gás carbônico ocorre de forma mais complexa. Explana-se que o CO_2 , após sucessivas dissoluções em água, forma íons de ácido carbônico o qual reage com os íons de hidróxido de cálcio, também dissolvidos na solução do poro (OLLIVER & VICHOT, 2014; THIERY *et al.*, 2007). A primeira fase desta reação envolve a dissolução do gás carbônico na água:

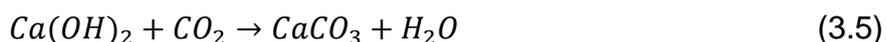


Nesta etapa ocorre a acidificação do meio através da formação do ácido carbônico e liberação de íons H^+ , os quais iniciam a redução de pH do meio e são necessários para condicionar a segunda reação. Posteriormente, a Portlandita

instabiliza com a redução da alcalinidade e se dissolve na solução do poro, liberando íons hidroxilas que reduzem ainda mais a alcalinidade, ocorrendo a reação com o ácido carbônico:



Tem-se como equação geral, simplificada, do processo:

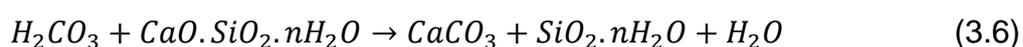


A calcita formada, por ser um produto mais estável, tende a sedimentar, preenchendo parcialmente os poros onde ocorreram as reações. Essa colmatação ocorre na deposição, posto que esta última reação é expansiva, com um aumento de volume de 11% em detrimento da diferença molar, promovendo uma mudança física na pasta de cimento a nível microestrutural (CARAZEK & CASCUDO, 2011).

Contudo, a formação da calcita irá depender de fatores cinéticos e termodinâmicos inerentes ao meio. Se os fatores cinéticos predominam, inicialmente o $CaCO_3$ irá precipitar na forma de Aragonita ou Vaterita, porém sendo a termodinâmica preponderante a deposição será já na forma de Calcita (ARANDIGOYEN *et al.*, 2006). Apesar da deposição ocorrer de diferentes formas ambos os polimorfos irão se converter em Calcita (AVIJA *et al.*, 2016).

As Hidroxilas disponíveis para a segunda reação podem ser provenientes da dissolução do C-S-H, porém como o CH tem menor estabilidade química, ele se solubiliza mais rapidamente, tendo a maior influência dentre os compostos carbonatáveis. Todavia, as fases posteriores do processo de carbonatação da Portlandita são reduzidas à medida que a taxa da reação diminui devido à formação de uma fina camada de Carbonato de Cálcio sobre a superfície dos cristais (LAVIJA *et al.*, 2016).

A carbonatação do C-S-H inicia conjuntamente a do CH, porém, com uma taxa mais lenta e progressiva (LAVIJA *et al.*, 2016). Consiste na remoção dos íons de Cálcio, reduzindo a relação Ca/Si, aproximando a estrutura a uma Sílica amorfa (TAYLOR, 1997). A descalcificação provoca um aumento da porosidade, deformando a microestrutura e, semelhante ao CH, libera água ao fim da reação, promovendo a continuidade do processo.



O processo de carbonatação em si não é prejudicial ao concreto se ocorrer de forma superficial. A colmatção, supracitada, pela formação da Calcita diminui a porosidade geral, promovendo uma barreira contra a penetração de novos gases e agentes agressivos (BORGES *et al.*, 2010). Porém quando há dissolução do C-S-H a microestrutura se altera, pois a perda de água na reação induz a uma maior retração da pasta que pode contribuir para uma fissuração generalizada (TAYLOR, 1997).

3.5 Indicadores da durabilidade do concreto

A heterogeneidade dos materiais componentes atrelada à complexidade das reações químicas e da disposição espacial dos produtos hidratados na matriz e também do meio em que está inserido, tornam a tarefa de avaliar diretamente a durabilidade do concreto muito difícil.

Contudo existem indicadores que possibilitam prever a capacidade do concreto de resistir ou não aos agentes deletérios. Estes indicativos estão principalmente relacionados à estrutura de poros do concreto, com ênfase na conexão de poros, também à estabilidade química dos componentes presentes e à resistência à passagem de corrente elétrica.

Para avaliar a estrutura de poros, é importante estudar, em particular, a porosidade, a capilaridade e a permeabilidade de CAA em várias combinações de adições (SILVA & BRITO, 2015). Essas propriedades são influenciadas pelos poros ligados, os quais se comunicam com a superfície exterior da amostra de concreto ou são interligados com a superfície (SABET *et al.*, 2013). Para caracterizar essa estrutura os métodos empregados no estudo foram a absorção por capilaridade e a porosimetria por intrusão de mercúrio.

- Absorção de água por capilaridade:

O ensaio de absorção por capilaridade é regulado no Brasil pela ABNT (2012) através da NBR 9779, sendo o concreto seco inserido de modo que alguns milímetros da extremidade inferior estejam submersos. As características de absorção do concreto representam indiretamente um índice de porosidade aberta, dando uma

compreensão do volume de poros permeável e conectividade entre estes poros (SABET *et al.*, 2013).

A absorção capilar refere-se ao transporte de líquidos por efeito da tensão superficial e gradientes de concentração, sendo o mecanismo de transporte mais rápido quando o concreto é exposto a um ambiente de risco (DODDS *et al.*, 2017). Os poros que influenciam na absorção atuam principalmente no transporte dos íons de cloreto e na lixiviação do concreto, logo, com o ensaio é possível prever a ocorrência mediante a taxa de absorção capilar

No entanto, não é possível determinar neste ensaio o volume de poros abertos no concreto, inclusive por que o ensaio não é realizado para a água chegar ao topo da amostra. Contudo é possível analisar comparativamente diferentes variações dos compostos do concreto para saber o que está influenciando positiva e negativamente essa propriedade. Inclusive, Xuan *et al.* (2017) demonstram que a absorção tem uma boa correlação com outros indicadores de permeabilidade.

- Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria por intrusão de mercúrio consiste em submeter uma amostra previamente seca a pressões crescentes de mercúrio, líquido não molhante que penetra progressivamente no material (OLLIVER & VICHOT, 2014). Quando a pressão é liberada, o mercúrio é sugado para fora de todos os poros. O volume do mercúrio removido é definido como "porosidade efetiva", que corresponde à parte da porosidade relevante para as propriedades de transporte (YE, 2005).

A diferença entre o líquido que penetrou para o que voltou é relacionada a grande diferença de diâmetro entre o poro e a conexão. Isto ocorre porque quando a pressão é elevada, interligações que outrora não permitiam a passagem do fluido e isolavam o espaço, em razão de um diâmetro muito pequeno, admitem a entrada do mercúrio, porém na despressurização o fluido fica "aprisionado" no vazio fechado por não ter pressão suficiente pra romper a pressão de sucção do poro em relação à conexão, conhecido como efeito tinteiro.

O efeito tinteiro pode explicar facilmente o mercúrio aprisionado, mas não necessariamente a exata mudança de tamanho de poro entre a intrusão e extrusão

(Giesche, 2006). Esse efeito provoca a alteração no gráfico, apresentando uma histerese. A histerese entre a intrusão (pressão crescente) e a extrusão (pressão decrescente) é observada em todas as amostras durante as medições de porosimetria de mercúrio (Giesche, 2006).

- Resistividade elétrica

A resistividade elétrica do material é um indicador rápido e confiável para determinar a permeabilidade do concreto e o desempenho relacionado da migração [Keulen *et al*, 2018; Noort *et al*, 2016]. Com ela é possível investigar a influência da substituição nas propriedades de durabilidade (JOSHAGHANI & MOEINI, 2017). Noort *et al* (2016) acrescentam que este é um método não destrutivo que é utilizado para estimar a maturidade, resistência e permeabilidade do concreto.

A resistividade mensura a capacidade do concreto em resistir à passagem de corrente elétrica. Dessa forma, essa propriedade é um bom indicador da probabilidade de formação da pilha de corrosão (SINGH & SINGH, 2016), para saber se está ocorrendo ou não a oxidação da armadura. Se a resistividade for alta a probabilidade de corrosão é menor e vice versa (SINGH & SINGH, 2016).

Como a carbonatação é um mecanismo de corrosão das armaduras, é imprescindível mensurar também a resistividade no presente estudo, uma vez que, se o concreto resistir a passagem de corrente elétrica, mesmo ocorrendo a carbonatação, os íons do CO₂ dissolvidos em solução aquosa não conseguem penetrar no concreto e entrar em contato direto com a armadura, sendo assim, a corrosão é difícil de ocorrer.

- Penetração do gás carbônico

A avaliação da frente de carbonatação é um outro parâmetro que indica a durabilidade em um ambiente com a alta concentração de CO₂. O fenômeno da carbonatação, já explicado no trabalho, pode ser mensurado em um ambiente real, em meios urbanos com a presença de indústria e fluxo elevado de veículos, ou em um ambiente simulado.

Essa simulação proporciona submeter o concreto a diferentes tipos de situações dentro de uma câmara de carbonatação acelerada. O parâmetro avaliado é

a profundidade de carbonatação; com ela realiza-se a comparação com o cobrimento dimensionado para o elemento estrutural para indicar se o gás carbônico chegou à armadura.

A carbonatação é uma das principais causas da deterioração das estruturas de concreto e depende principalmente de vários parâmetros como a temperatura, a umidade relativa, a relação água-cimento, a proporção de pasta de água, os regimes de cura, a adição de misturas, a porosidade, o tipo de concreto e os agregados, a cobertura, o superplastificante e concentração de dióxido de carbono. Muitas dessas variáveis podem ser simuladas na câmara. [SINGH & SINGH, 2016].

CAPÍTULO 4

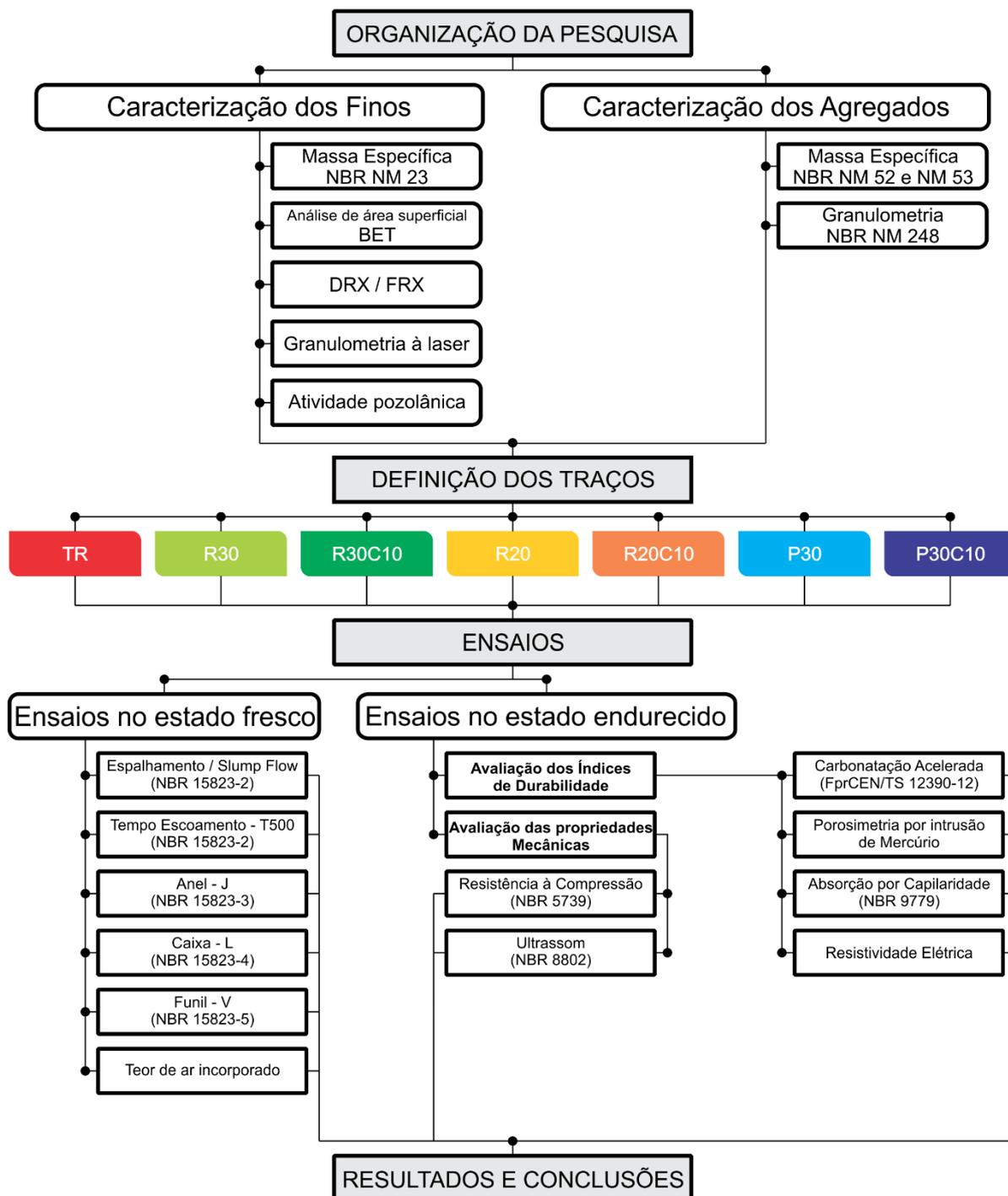
Programa Experimental

A metodologia do presente estudo fundamenta-se em uma pesquisa exploratória, com base em pesquisa prática e teórica, desenvolvendo ciência para o concreto. Na presente pesquisa, buscou-se avaliar as propriedades mecânicas e os parâmetros de durabilidade em concretos auto adensáveis submetidos à carbonatação acelerada, e sua correlação com os diversos materiais empregados no estudo.

No projeto foram confeccionadas diferentes misturas com elevados teores de adições minerais, substituindo o cimento, tendo também a adição de cal hidratada. Os ensaios descritos a seguir visaram responder as hipóteses estabelecidas no início da pesquisa do mestrado, bem como, confirmar as proposições estabelecidas por meio da fundamentação teórica. As análises focaram no comportamento no estado fresco e endurecido, as correlacionando com os parâmetros de durabilidade.

A pesquisa teve início com o planejamento dos ensaios e do cronograma, auxiliados pelo referencial teórico, tal como as normas técnicas em vigor. A Figura 4.1 ilustra de forma sintética a organização da pesquisa, a definição dos traços utilizados e os ensaios realizados no CAA nos estados fresco e endurecido.

As atividades consequentes foram desenvolvidas em duas etapas, a primeira com o intuito de averiguar os componentes do CAA, através da caracterização destes, por meio de ensaios laboratoriais; e a segunda etapa, consistiu na avaliação do comportamento das misturas, visando qualificá-las como concretos autoadensáveis nos ensaios do estado fresco e estudá-las frente aos parâmetros de durabilidade e propriedades do estado endurecido.



LEGENDA:

TR - 100% CIMENTO
 R30 - 30% RBC + 20% METACAULIM
 R30C10 - 30% RBC + 20% METACAULIM + 10% CAL
 R20 - 20% RBC + 20% METACAULIM
 R20C10 - 20% PCA + 20% METACAULIM + 10% CAL
 P30 - 30% RBC + 20% METACAULIM
 P30C10 - 30% PCA + 20% METACAULIM + 10% CAL

Figura 4.1 – Organograma da pesquisa

4.1 Materiais utilizados

Para obtenção de concreto autoadensável é necessária a utilização dos insumos base do concreto, sendo estes os aglomerantes, agregados e água devendo ser acrescentados aditivos superplastificantes para conferir as características de autoadensabilidade. Os traços foram definidos com base em pesquisas anteriores do grupo de estudo do IFRN.

As adições minerais substituíram parcialmente o cimento em 50% e 60%, sendo utilizado sempre 20% de metacaulim, para manutenção da resistência elevada, variando os teores da Biomassa da cana-de-açúcar e da pozolana da casca do arroz, no intuito de verificar suas influências, realizando também misturas equivalentes com a adição de cal hidratada.

- **Cimento**

Para a realização dos traços foi utilizado o cimento tipo CP V – ARI RS, de alta resistência inicial com resistência a sulfatos, fabricado pela Mizú, com fábrica situada no município de Baraúnas/RN. Foi escolhido este cimento por ele não conter adições minerais em sua composição, havendo então, apenas a influência do clínquer.

Foram utilizados 6 sacos do mesmo lote de fabricação, adquiridos em um centro de revenda habilitado pela fábrica, em Parnamirim/RN. O cimento foi ensacado em porções menores, vedado e guardado em bombonas lacráveis buscando manter o cimento invariável.

- **Metacaulim (MK)**

A primeira adição empregada foi o metacaulim BZ, fabricado pela Caulim Nordeste, situada em Ipojuca/PE. O metacaulim é de coloração laranja e de média reatividade, segundo ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Ele esteve presente em seis dos sete traços, no teor de 20%, como supracitado. Foram utilizados 4 sacos, do mesmo lote, adquiridos em um centro de revenda em João Pessoa/PB. Foi realizado o mesmo procedimento de ensacamento, vedação e armazenagem em bombonas lacráveis do cimento, a fim de evitar o contato com a umidade.

- **Pozolana da Casca de Arroz (PCA)**

A pozolana da casca do arroz (PCA) que foi utilizada, foi produzida pela SILCCA NOBRE, no município de Alegrete/RS, sendo esta, um produto comercial do resíduo da casca do arroz. O material foi adquirido pelo grupo de pesquisa do IFRN e cedido para a presente pesquisa. A PCA foi escolhida objetivando a comparação com o RBC em virtude de ser uma pozolana proveniente de resíduo agroindustrial e por ser um produto já comercial.

- **Resíduo da Biomassa da Cana-de-açúcar (RBC)**

O RBC é um resíduo proveniente do processo de extração da cana-de-açúcar, o qual é um produto potencial para substituição sustentável do cimento. Ele foi coletado na usina BIOSEV, unidade Estivas, localizada no município de Arês/RN.

Este resíduo é uma cinza, decorrente da queima do bagaço da cana após a retirada do sumo da planta. Ao ser queimado o produto é levado por uma esteira, lavado e coletado por caminhões para parte ser reutilizada no plantio e a outra parte é de difícil destinação.

O RBC é um produto com potencial pozolânico, contudo encontra-se em estado grosseiro e úmido após esse processo. Mediante isto, após a coleta, o produto foi seco em estufa e moído durante 3 horas, sendo colocado 2000 gramas de cada vez no moinho de bolas. Esse procedimento foi realizado em parceria com o LABEME/UFPB.

Apesar desse dispêndio energético para manufatura da cinza do bagaço, o processo se justifica pela geração de CO₂ produzido no processo. Segundo Lima (2010) a cada 1 tonelada de cimento produzida são gerados 659 Kg de CO₂, enquanto que o relatório anual do MCTIC (2017) mostra que a cada 1MWh são gerados apenas 81 Kg de CO₂.

Considerando o tempo e a potência da estufa e do moinho e tendo como base o traço referência deste estudo, há uma redução de 36% da emissão de CO₂, quando substituído 50% do cimento, teor pretendido pela atual pesquisa. Dessa forma, justifica-se a substituição.

- **Cal hidratada**

A Cal Hidratada será utilizada como adição aos traços com o intuito de verificar a sua influência na reserva alcalina. O produto foi fornecido pela empresa IMAP, produzido no município de Governador Dix-Sept Rosado/RN. Ela possui classificação CH-I, considerando-a como de alta reatividade.

- **Aditivo superplastificante**

O aditivo empregado foi o superplastificante à base de polímeros de éter carboxílico, da BASF, Glenium® 160 SCC, que atua como dispersante pela indução de dipolos nas partículas cimentantes e na quebra das pontes de hidrogênio da água de amassamento. Ele é ideal para obtenção de concretos autoadensáveis, sendo o principal utilizado pelo grupo de pesquisa do IFRN, o qual cedeu o aditivo para o estudo.

- **Agregado Graúdo**

Para confecção dos concretos utilizou-se uma brita de composição granítica e na dimensão comercial B0 (9,5 mm), proveniente de jazida no município de São Gonçalo do Amarante/RN, adquirida em loja de material de construção em Natal/RN.

- **Agregado Miúdo**

A areia foi retirada de duna proveniente de fonte de água doce, no município de Ceará Mirim/RN. Ela possui uma coloração mais branca e mais esférica que a areia de rio, sendo uma areia ideal para produção de concretos de alta resistência mecânica e encontrada com facilidade no município de Natal/RN.

- **Água de mistura**

A água empregada foi originada da companhia de fornecimento de água local (CAERN), a qual possui características potáveis, mediante relatório disponibilizado no site caern.rn.gov.br, sendo utilizada em temperatura de aproximadamente 23°C.

4.2 Caracterização dos materiais

4.2.1 Ensaios de caracterização dos agregados

Inicialmente separou-se duas amostras de areia e duas de brita, conforme NBR NM 26 (ABNT, 2009). A granulometria deu sequência para determinar o módulo de finura e classificar os agregados, de acordo com a NBR 248 (ABNT, 2003). A massa específica também foi mensurada para cálculo da dosagem do traço, sendo o ensaio de determinação da massa específica da areia realizado conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009) e a da brita de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2003).

4.2.2 Caracterização dos finos

- **Massa específica dos finos**

Para determinação das massas específicas do cimento, das adições minerais e da cal hidratada os ensaios seguiram as diretrizes da NBR NM 23 (ABNT, 2001). A determinação desses parâmetros foi essencial para o cálculo do volume de cada material nas misturas realizadas. Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios de construção civil do IFRN, campus Natal central.

- **Área superficial (Método BET)**

Com o intuito de entender a microestrutura e o empacotamento das misturas, foi determinada a área superficial do cimento e das adições minerais pelo método Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), o qual através da determinação do volume de gás adsorvido relaciona por equações este resultado com a superfície específica do material. Para este ensaio foi separada uma amostra, previamente seca, de aproximadamente três gramas, e realizado no Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN, utilizando o gás nitrogênio, em equipamento da JAPAN modelo BELSORP-mini II.

- **Difração de Raios X (DRX)**

O DRX é uma das mais importantes técnicas para estabelecer a caracterização química da microestrutura. Esse método consiste em incidir radiação, através de

fótons, e detectar a difração destes fótons após refletirem no plano cristalino na amostra. Essa difração é função da densidade da célula unitária e o conjunto das difrações é quem determina o composto químico presente.

O gráfico do DRX apresenta os cristais e os halos amorfos contidos na amostra, possibilitando averiguar se os resultados são compatíveis com o FRX e também, indiretamente, avaliar a amorficidade e pozolanicidade das adições. Este ensaio foi realizado no laboratório do Núcleo Tecnológico em cimentação de poços de petróleo (NTCPP) da UFRN utilizando equipamento Eco D8 ADVANCE da marca Bruker, com fonte de radiação anodo de Cobre (Cu-), tensão aplicada de 40 kv, potência de 1000W e corrente de 25 mA. A velocidade de coleta dos dados no goniômetro realizou-se à $0,025^{\circ}2\theta$, com tempo de passo de 0,5 segundos. A faixa varrida coletou dados entre 5 à $60^{\circ}2\theta$ com filtro detector de Nitrogênio.

- **Fluorescência de Raios X (FRX)**

Os ensaios químicos de fluorescência de raios X permitem averiguar quais compostos estão presentes na amostra. Ele apresenta os óxidos contidos na amostra, o qual juntamente aos resultados do DRX conduzem a aspectos da reatividade do material. Para realização deste ensaio utilizou-se o equipamento Shimadzu modelo EDX-720, do laboratório de caracterização mineral do campus Natal-Central do IFRN.

- **Granulometria à laser**

A granulometria à laser é um método de determinação do perfil granulométrico para materiais finos, sendo inviável caracterizá-los com as peneiras. As amostras são inseridas no equipamento juntamente com um líquido ou gás dispersante e são bombardeadas por feixes de luz que, por meio dos fenômenos físicos de absorção e difração, permitem o aparelho visualizar o volume em cada faixa através de lentes especiais.

O equipamento utilizado foi o CILAS Ecosizer 920, com faixa de leitura entre 0,3 à 400 μm , do laboratório de materiais cerâmicos e metais especiais – departamento de Física da UFRN. Foram separados aproximadamente 6 gramas de material, seco em estufa e realizado o ensaio.

• Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

A atividade pozolânica foi realizada pelo método com a cal conforme a norma NBR 12.653 (ABNT, 2014), onde foi obtida a consistência padrão e realizado o ensaio de compressão aos 7 dias. O ensaio foi realizado apenas com o RBC e PCA, visto que foram as adições avaliadas na presente pesquisa.

4.3 Estudo do CAA com baixos teores de cimento

Esta etapa do trabalho estudou o comportamento das misturas definidas, avaliando as propriedades nos estados fresco e endurecido, mediante ensaios supracitados no organograma da pesquisa. Os resultados desta etapa permitiram a análise dos indicativos de durabilidade e aplicabilidade dos concretos autoadensáveis. Visando entender melhor os processos destas análises para cada mistura o fluxograma, Figura 4.2, apresenta a cronologia dos ensaios realizados. Os ensaios esquematizados com duas cores representam que na hora no ensaio a condição ambiental foi alterada.

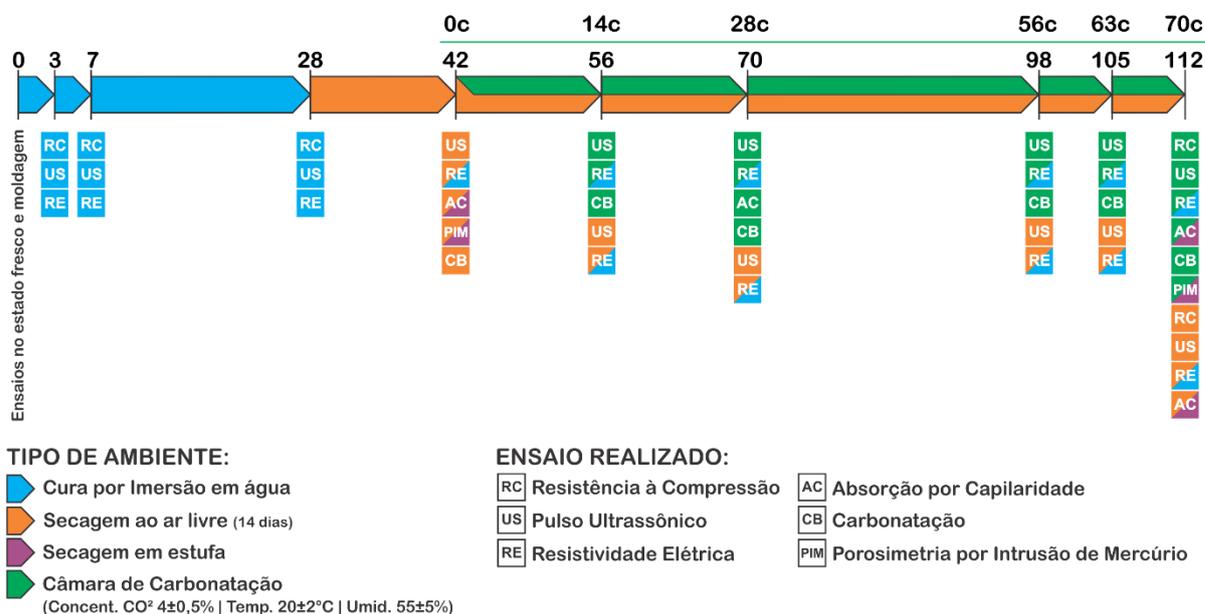


Figura 4.2 – Cronograma dos ensaios para cada traço

4.3.1 Definição dos traços

O proporcionamento das misturas teve o desígnio de reduzir o consumo de cimento de forma a tornar o concreto autoadensável ecoeficiente. Com base em pesquisas já realizadas por Medeiros (2016) e Fonseca (2016) mesmo com reduções de até 60% do cimento as resistências se mantêm acima dos 32 MPa aos 91 dias, sendo aplicável às estruturas de CAA. A dosagem dos materiais segue o proporcionamento já determinado pelo grupo de pesquisa em materiais cimentícios do IFRN, visto que este trabalho é parte de uma pesquisa ampla. Os traços estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – traços realizados

TRAÇOS	LIGANTES					AREIA	BRITA	Água/Lig.
	CIM	MK	RBC	PCA	CAL			
TR	100%	-	-	-	-	1,64	2,16	0,44
R30	50%	20%	30%	-	-	1,64	2,16	0,44
R30C10	50%	20%	30%	-	10%	1,64	2,16	0,44
R20	60%	20%	20%	-	-	1,64	2,16	0,44
R20C10	60%	20%	20%	-	10%	1,64	2,16	0,44
P30	50%	20%	-	30%	-	1,64	2,16	0,44
P30C10	50%	20%	-	30%	10%	1,64	2,16	0,44

Foram confeccionados sete traços, sendo um com 100% de cimento, o referencial, dois com proporções diferentes de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), variando entre 20% e 30%, no intuito de observar as modificações de comportamento com essa variação; E, uma terceira proporção, com 30% de pozolana da casca de arroz (PCA), a fim de estabelecer uma análise comparativa com o RBC, visto que ambos são resíduos agroindustriais ricos em sílica. Contudo, o PCA já tem diversos trabalhos comprovando sua eficácia, sendo parâmetro para o desempenho do RBC. Os traços com adições foram refeitos com a adição de 10% de cal hidratada, com o propósito de avaliar a realcalinização destes, frente à carbonatação.

Houve também a incorporação de 20% de metacaulim em todos os traços com adições. A presença desta adição teve o objetivo de reduzir ainda mais o cimento para ter no mínimo 50% de substituição. Não foi possível, mediante bibliografia e histórico da base de pesquisa do IFRN, colocar teores acima de 30% das cinzas

agroindustriais. Atrelado a isto, o metacaulim é um produto já consolidado e que mantém a resistência do concreto, viabilizando as misturas pensadas.

4.3.2 Moldagem e preparo da mistura

Os corpos de prova foram moldados de acordo com as diretrizes da norma da ABNT NBR 5738:2016, onde foram confeccionados trinta corpos de prova em moldes cilíndricos metálicos, para cada traço, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para verificar a resistência à compressão, absorção capilar, resistividade elétrica e pulso ultrassônico. Para o ensaio de carbonatação foi utilizado um molde prismático com 10x10x10 cm, sendo produzidas dez amostras por traço. Para a produção do concreto, foi utilizada uma betoneira com capacidade de 120 litros.

A produção dos concretos autoadensáveis iniciou com a pesagem dos materiais referente à metade do volume total necessário do traço. Isso ocorreu em função da capacidade da betoneira que suportava apenas 30 litros por vez, tendo que dividir o traço em duas betonadas. Após a pesagem a parte interna da betoneira foi umedecida para receber os materiais.

Com o intuito de obter melhor ligação entre os materiais e garantir que todos estes formassem uma matriz homogênea determinou-se uma sequência de inserção dos materiais na betoneira. Foram adicionados o agregado graúdo e 30% da água para molhar a superfície das britas, a fim de evitar poros maiores na zona de transição, e misturados por 30 segundos.

Após, inseriu-se 50% do agregado miúdo e 20% da água misturando-se por mais 30 segundos. A areia não foi colocada toda por que, nas primeiras tentativas, verificou-se uma concentração próxima ao fim das pás. O cimento, o metacaulim e mais 40% da água foram inseridos em sequência e misturados por 2 minutos. Nos primeiros 30 segundos desse tempo foi adicionado o restante da areia.

Em seguida, colocou-se 50% do aditivo superplastificante, misturando mais 2 minutos. A escolha por apenas metade do superplastificante foi motivada pelo comportamento nos testes preliminares de adequação do traço, onde percebeu-se que o aditivo funcionava melhor colocando 50% sobre a mistura com apenas cimento e metacaulim e o restante após as outras adições minerais.

As adições minerais, juntamente com a Cal, quando utilizada, foram inseridas por último no traço com os 10% restantes da água e os 50% do aditivo superplastificante. Dessa forma o concreto ficava extremamente fluido e as adições, após esse passo, agiam como modificadores de viscosidade, tendo o restante da água e do aditivo como agentes para que uma boa fluidez fosse mantida. A Tabela 4.2 apresenta a sequência de inserção dos materiais.

Tabela 4.2 – Sequência de inserção e mistura de cada traço

SEQUÊNCIA DE MISTURA NA BETONEIRA		
Ordem	Materiais e Teores	Tempo
1°	Agregado graúdo + 30% da água	30seg
2°	50% da areia + 20% da água	30seg
3°	Cimento + metacaulim + 50% da areia + 40% da água	2min
4°	50% do Aditivo	2min
5°	CAL + (PCA ou RBC) + 10% da água + 50% do aditivo	3min

4.3.3 Propriedades no estado fresco

No estudo de concretos autoadensáveis é fundamental comprovar, através das propriedades no estado fluido, as características que determinam um concreto ter adensamento por si próprio. Segue-se como parâmetro o guia europeu para CAA, produzido pela EFNARC e a norma brasileira NBR 15.823 (ABNT, 2017).

4.3.3.1 Espalhamento (*Slump Flow*) e Tempo de escoamento (T500)

Através do cone de Abrams é possível aferir o espalhamento e o tempo de escoamento dos concretos autoadensáveis e avaliar a capacidade de fluxo da amostra, na ausência de obstruções. Após a retirada do tronco de cone, o tempo (nomeado com T500) necessário para preencher uma circunferência de 500 mm de diâmetro é mensurado, sendo este um parâmetro da viscosidade do CAA, classificado pela Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Classificação do tempo de escoamento (T500)

Classe	Tempo (s)
VS1	≤ 2
VS2	> 2

Por fim, também é mensurado o diâmetro do espalhamento final, onde o fluxo do concreto estabilizou, por meio da média de duas medidas. O resultado é um indicativo de fluidez. O ensaio também é normatizado e classificado pela NBR 15.823-1 (ABNT, 2017), conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Classificação do espalhamento final (*Slump Flow test*)

Classe	Espalhamento (mm)
SF1	500 à 650
SF2	650 à 750
SF3	750 à 850

4.3.3.2 Teste do Funil V

O ensaio do funil em V é realizado seguindo os parâmetros da parte 5 da NBR 15.823 (ABNT, 2017) para avaliar a capacidade de preenchimento e a viscosidade do CAA. O método analisa a velocidade de passagem e a habilidade passante em totalidade do volume posto, mantendo a homogeneidade quando reunido após passar pelo funil, ou se ocorre entupimento. O resultado final é o tempo de passagem em segundos, sendo classificado de acordo com a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Classificação da viscosidade no Funil V

Classe	Tempo (s)
VF1	≤ 9
VF2	9 à 25

4.3.3.3 Teste da Caixa L

A caixa L é utilizada para mensurar a habilidade passante do CAA em um espaço com 3 barras verticais, avaliando o comportamento do concreto quando exposto a obstáculos em seu percurso. A avaliação nesse ensaio é normatizada pela NBR 15.823-4 (ABNT, 2017), sendo realizada pela variação de altura entre o início e final da caixa. A razão entre as alturas da superfície do concreto em relação a caixa classifica o concreto, de acordo com a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Classificação da habilidade passante na Caixa L

Classe	H1/H2
PL1	≥ 0,80, com duas barras de aço
PL2	≥ 0,80, com três barras de aço

4.3.3.4 Teste do Anel J

Semelhante ao *Slump flow*, o teste com o anel J avalia a capacidade de fluxo da amostra, porém, na presença de obstruções. O concreto autoadensável tem que deslocar-se do tronco de cone e fluir sobre os espaços entre as barras, mensurando ao final dois parâmetros: o diâmetro do espalhamento final e a diferença de altura entre um ponto do centro da circunferência e outro logo após as barras do anel.

Dessa forma é possível atribuir um valor para a fluidez com a presença de obstruções e também avaliar a capacidade de passar e preencher o entorno das barras de ferro. Esse teste simula uma situação bastante próxima à realidade que o concreto vai enfrentar.

O ensaio é normatizado pela NBR 15.823-3 (ABNT, 2017) e classifica o concreto pela diferença entre os diâmetros do Slump Flow sem obstrução (DSF) e do Slump Flow com o anel J (DAJ). A EFNARC (2002) também classifica o concreto, porém pela diferença de altura. A classificação é apresentada na Tabela 4.7, abaixo.

Tabela 4.7 – Classificação da Habilidade passante no Anel J

Classe	Variante	Valor	Fonte
PJ1 PJ2	DSF - DAJ	< 25 cm 25 à 50 cm	ABNT
(Aceitável)	H1 - H0	< 10 mm	EFNARC

4.3.3.5 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado foi mensurado pelo método pressométrico, utilizando-se um medidor tipo B, seguindo as recomendações da NBR NM 47 (ABNT, 2002). O método divergiu da norma apenas na recomendação de adensamento, que não foi realizada por se tratar de um CAA.

4.3.4 Propriedades no estado endurecido

4.3.4.1 Avaliação dos parâmetros de durabilidade

A avaliação da durabilidade é realizada por meio de ensaios indicativos que mediante resultados podem conduzir a inferências sobre a capacidade do concreto em resistir aos mecanismos de deterioração. Esses indicativos, no presente estudo, são a resistência à penetração do gás carbônico, a estrutura porosa da matriz, a capacidade de absorver água por capilaridade e a resistência à passagem de corrente elétrica.

- **Carbonatação acelerada**

A profundidade de penetração é o parâmetro mais aproximado da exposição ao dióxido de carbono. Para o ensaio de carbonatação os corpos de provas foram curados em tanque por imersão em água por 28 dias e após, secos ao ar livre por 14 dias. Conseqüente, as faces dos corpos de prova foram revestidas com parafina (Figura 4.3 a) e, após, inseridos na câmara de carbonatação acelerada.

A carbonatação foi mensurada em 6 idades, contabilizando a contagem a partir da entrada da câmara, com 0d, 14d, 28d, 56d, 63d e 70 dias, conforme prescrito na norma europeia FprCEN/TS 12390-12. O procedimento de execução na câmara é apresentado na Figura 4.3.

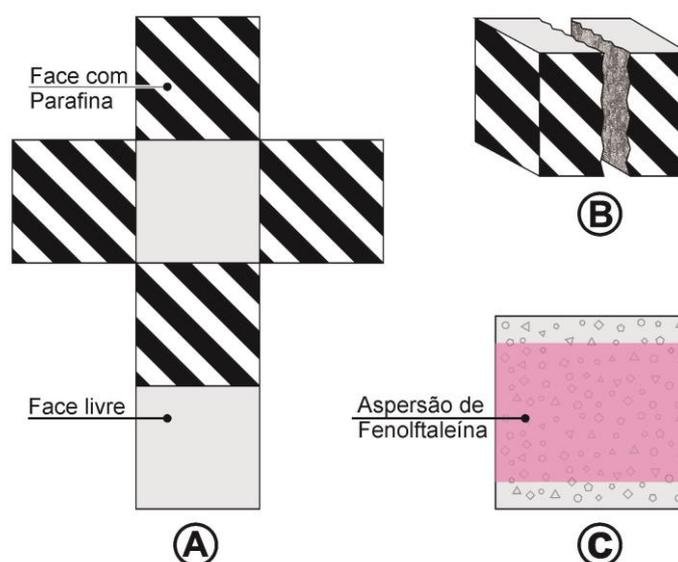


Figura 4.3 – Ilustração da amostra submetida à carbonatação: a) faces livres e com parafina; b) sentido do corte de seção; c) aspersão de fenolftaleína.

Após ser retirada de dentro da câmara acelerada, a amostra foi cortada na prensa (Figura 4.3 b), sendo uma parte para a análise e o restante é devolvido à câmara de carbonatação. Sobre o primeiro pedaço é aspergido Fenolftaleína (Figura 4.3 c), um indicador de pH, com ponto de viragem de 9,5. Após a aspersão esperou-se a substância secar e aferiu-se com um paquímetro as profundidades carbonatadas em 7 pontos de cada lado que represente a face livre, sendo o resultado a média da profundidade de penetração do CO₂.

O parâmetro de avaliação do valor da penetração foi dado mediante comparação com o traço referência e também comparando com as espessuras mínimas da NBR 6118 (ABNT, 2014), descritas na Tabela 4.8. Pois se a frente de carbonatação não atingir o ferro, a possibilidade de ocorrência de corrosão é mínima.

Tabela 4.8 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal. Fonte: tabela 7.2 NBR 6118 (ABNT,2002) adapt.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	52	35	45
	Viga/ Pilar	25	30	40	50
	Elementos em contato com o solo	30		40	50
Concreto Protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/ Pilar	30	35	45	55

Foi utilizada a câmara de carbonatação acelerada do laboratório de durabilidade do IFRN, campus Natal central, construída na pesquisa de mestrado de Lucena (2016), estando esta já validada. Dentro da câmara há concentração média de 4% ± 0,5% de CO₂ controlada manualmente 2 vezes ao dia, com temperatura de 30°C ± 2°C e umidade relativa média de 80%.

- **Porosimetria por intrusão de mercúrio**

A durabilidade de um CAA é diretamente ligada à quantidade e dimensões dos vazios existentes, pois os poros e suas interligações são os principais pontos de infiltração de agentes deletérios. Para aferir esta propriedade foi realizado o ensaio de Porosimetria por intrusão de mercúrio, com o equipamento AutoPore IV 9500 V1.07, com pressão de 0,031 MPa, no laboratório de meios porosos e propriedades termofísicas da UFSC.

Mediante a pressão de intrusão foi possível mensurar o volume e diâmetro médio dos poros. Os ensaios foram realizados aos 42 e 112 dias, datas do primeiro e último dia na câmara, para avaliar a influência da carbonatação. O ensaio foi patrocinado pelo grupo de pesquisa do IFRN.

As amostras preparadas tiveram entre 1 e 2 gramas com dimensão máxima de 10 mm, sendo estes os requisitos para realização do ensaio. Como as dimensões da amostra inviabilizam moldar e retirar uma fatia de um concreto feito, podendo fissurá-la, invalidando o ensaio, foram moldadas duas amostras de argamassas para cada traço no formato cilíndrico com forma plástica de 1 cm de diâmetro por 1 cm de profundidade.

As amostras passaram pelos mesmos ambientes do concreto, com 28 dias de cura e 14 dias de secagem, sendo enviado ao laboratório de meios porosos da UFSC no último dia da secagem 1 amostra de cada traço. A outra amostra foi inserida na câmara de carbonatação. Como a dimensão era pequena, ao fim dos 70 dias dentro da câmara, ela já estava completamente carbonatada, sendo assim enviada. O envio se deu em caixa com plástico bolha e isopor para evitar fissuração no traslado.

- **Absorção de água por capilaridade**

Este ensaio consiste em inserir 3 corpos de prova, previamente secos em estufa por 72 horas, sobre uma superfície de água, imergindo a amostra a uma profundidade de 5 mm. Com o decorrer do tempo a água vai percolando por capilaridade, elevando o peso próprio da amostra e com essa massa de água adicional tem-se o resultado do ensaio.

Os resultados da absorção por capilaridade foram obtidos realizando-se pesagens com as amostras secas e após a imersão em 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h e

48 horas, obtendo-se a diferença entre o peso inicial. O ensaio seguiu as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2002), contudo algumas adaptações nos horários previstos na norma foram necessárias devido ao horário de funcionamento dos laboratórios do IFRN, campus Natal central.

Todavia, como a análise foi comparativa e todos os traços estiveram na mesma condição, os resultados foram válidos. Os ensaios foram realizados nas idades de 42, 70 e 112 dias, sendo na última data o ensaio realizado com três amostras que estavam dentro e três fora da câmara. O ensaio aos 70 dias teve o objetivo de se averiguar a absorção na metade do tempo dentro da câmara a fim de observar se o comportamento era linear.

O gráfico foi montado de modo a comparar os traços por meio da quantidade em massa de água absorvida dividida pela área da amostra em contato com a água.

- **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. A verificação utilizou o equipamento Resipod da marca Proceq, modelo de espaçamento de 50 mm entre as sondas, com precisão de $\pm 0,2$ k Ω cm e faixa de medição de 1 a 1000 k Ω cm, Figura 4.4. As leituras foram realizadas no laboratório de durabilidade do IFRN, campus Natal-central.

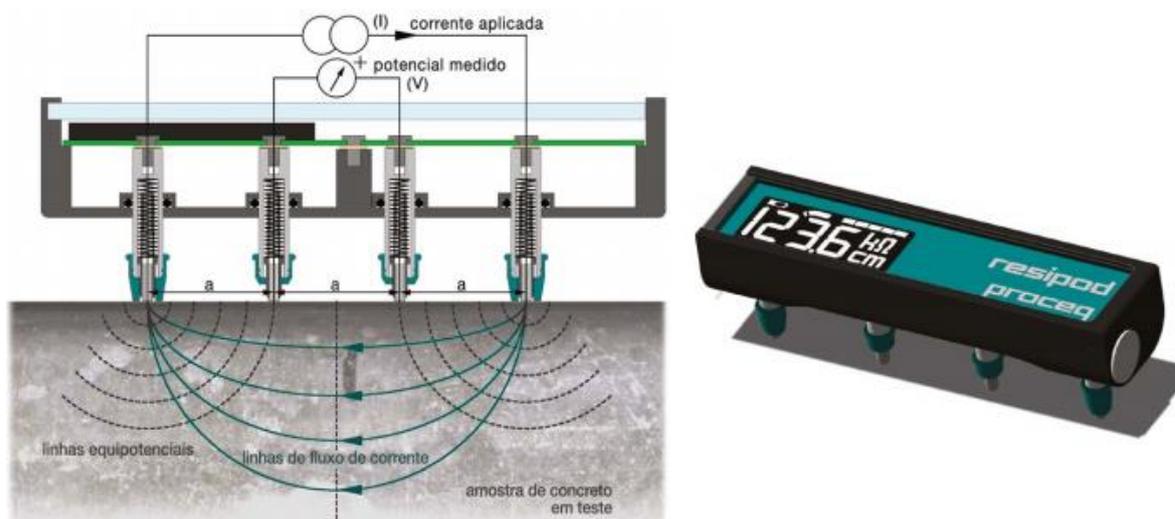


Figura 4.4 – Aferição da resistividade elétrica (Esquerda: obtenção dos resultados; Direita: Equipamento). Fonte: Manual do equipamento.

Foram ensaiadas duas amostras de cada traço, sendo estas submetidas ao processo de cura por imersão durante 28 dias e em seguida a 14 dias de secagem. Em sequência uma amostra foi colocada no interior da câmara de carbonatação e outra foi deixada fora da câmara, no interior do laboratório. As medidas foram retiradas aos 3d, 7d, 28d, 42d, 56d, 70d, 98d, 105d e 112 dias, onde nas três primeiras idades a condição foi igual para as duas amostras.

Todas as amostras foram previamente saturadas, por um período de 24h antes da leitura. Onde, as amostras eram imersas em tanque de água a temperatura ambiente, exceto nas primeiras idades, pois nesta idade as amostras já estavam imersas, não sendo necessária a saturação. Após a leitura as amostras foram secas com secador de ar quente durante 20 minutos, cada, para poder voltar à câmara.

Os resultados foram classificados pela probabilidade de corrosão, expressa na Tabela 4.9, disponibilizada no manual do equipamento e também pela análise comparativa entre os traços.

Tabela 4.9 – Taxa provável de corrosão em função da resistividade elétrica. Fonte: Manual do equipamento Resipod – Proceq.

Resistividade do concreto (KΩ.cm)	Taxa provável de corrosão
> 20	Desprezível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
< 5	Muito alta

4.3.4.2 Avaliação das propriedades mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas é indispensável, pois valida a utilização do concreto autoadensável, uma vez que envolve a principal característica do concreto: a resistência à compressão. É fundamental que os concretos sustentáveis atinjam as propriedades mecânicas equivalentes aos concretos já utilizados para justificar a substituição dos mesmos e implantar a ideia de

sustentabilidade viável no mundo da construção civil. São avaliadas, no presente estudo, as propriedades de resistência à compressão axial e do pulso ultrassônico.

- **Resistência à Compressão**

Para esse ensaio utilizou-se uma prensa hidráulica, com capacidade de carga de 100 toneladas, fabricação Contenco, modelo Pavitest, com leitura obtida no software disponibilizado pelo fabricante, Figura 4.5. O ensaio foi realizado no laboratório de materiais e produtos cimentícios do IFRN, campus Natal central. Os procedimentos de rompimento dos corpos de prova obedeceram a NBR 5739 (ABNT, 2007).



Figura 4.5 – Prensa hidráulica de rompimento

Para conferir uniformidade às tensões por toda a superfície do corpo de prova é realizada uma retificação na base e no topo do corpo, nivelando a superfície à 90° da lateral. Os ensaios foram realizados nas idades de 3d, 7d, 28d e 112 dias, sendo o resultado a média de 3 amostras. As amostras nas três primeiras idades foram retiradas uma hora antes do ensaio e colocadas em frente a um ventilador com vento

frio para tornar a amostra saturada com superfície seca. Os ensaios seguiram a tolerância normativa, mediante Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Tolerância de desvio de horário de rompimento de acordo com a idade do concreto. Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2007)

Rompimento	Tolerância
24 horas	0,5 hora
3 dias	2 horas
7 dias	6 horas
28 dias	24 horas
63 dias	36 horas
91 dias	48 horas

- **Velocidade do pulso ultrassônico**

O ensaio de propagação do pulso ultrassônico é ideal para monitoramento de concretos, pois o mesmo permite mensurar parâmetros que determinam a durabilidade e qualidade do concreto, como uniformidade e presença de vazios. As amostras foram as mesmas do ensaio de resistência à compressão, sendo a velocidade do pulso aferida antes do rompimento, consoante a NBR 8802 (ABNT, 2003), isto é possível devido à este ensaio não ser destrutivo.

As amostras foram previamente retificadas e ensaiadas com idades de 3d, 7d, 28d, 42d, 56d, 70d, 98d, 105d e 102d, sendo o resultado a maior velocidade dentre as 6 amostras, para as três primeiras idades. A partir dos 42 dias, 3 amostras foram colocadas dentro da câmara e 3 mantidas fora, dentro do laboratório e o resultado foi a maior velocidade dentre as 3 amostras em cada ambiente.

O aparelho utilizado foi o Pundit Lab+, da marca Proceq SA, com dois transdutores de 54 kHz e resolução de 0,1 μ s, no laboratório de materiais e produtos cimentícios do IFRN, campus Natal-central. Antes de todas as leituras o aparelho foi calibrado e utilizou-se gel para ultrassom nas faces onde era colocado o transdutor. A Figura 4.6 retrata esse procedimento.



Figura 4.6 – Leitura do pulso ultrassônico: a) Equipamento; b) Transdutor com o gel; c) realização da leitura. Fonte: acervo do autor.

4.4 – Delineamento estatístico fatorial

O estudo estatístico é fundamental para a validação dos resultados e avaliação de qual variável produz maior efeito sobre a resposta. O método escolhido é o fatorial completo 2^2 , onde é possível estabelecer duas variáveis, sendo cada uma com dois níveis +1 e -1. A interação gráfica, Figura 4.7 a, entre estes quatro pontos gera uma superfície de resposta tridimensional, Figura 4.7 b, que permite melhor avaliar o resultado, pelo seu efeito e por sua inclinação.

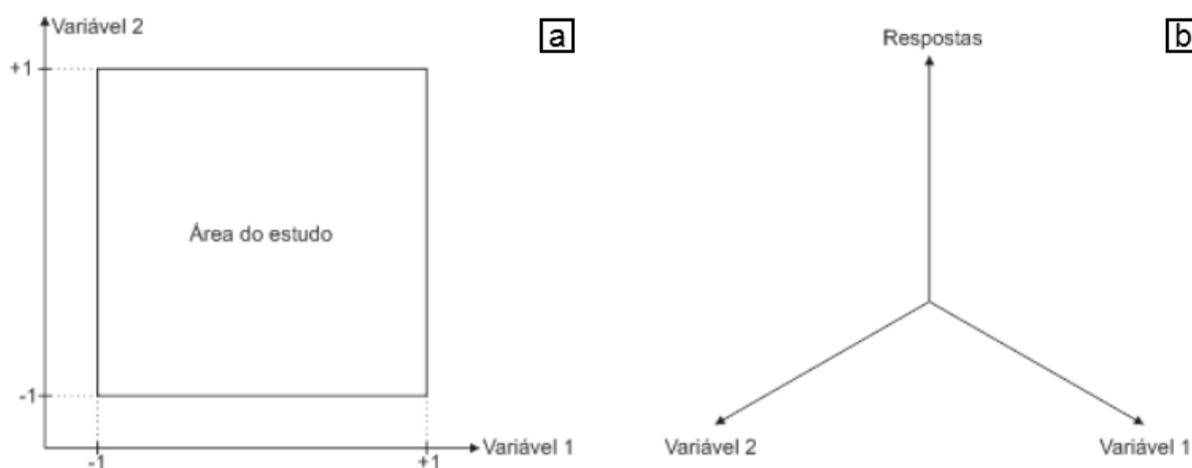


Figura 4.7 – Delineamento estatístico: a) Área de estudo; b) Estrutura tridimensional da superfície de resposta.

O efeito é a quantificação da influência da variável sob a resposta, quando esta variável sai do ponto -1 para o ponto +1, na mesma unidade da resposta. Ele é expresso através de uma superfície de resposta, que apresenta conjuntamente o efeito das duas variáveis. A significância do efeito é baseada na variação de 2 ou mais resultados em um mesmo ponto, devendo em todos os pontos as variações serem equivalentes para tornar o resultado válido.

Contudo, como os resultados só podem ser comparados quando o teor ou o tipo é variado, logo, tem-se como analisar comparativamente alguns traços do trabalho, porém, não todos. As variáveis que foram estudadas são: presença da cal (0% e 10%), teor de RBC (20% e 30%) e influência das cinzas agroindustriais (PCA e RBC). Optou-se por avaliar prioritariamente os efeitos de forma comparativa, pois a análise da ANOVA, teste F e regressão linear não estavam contemplados no objetivo principal da pesquisa.

CAPÍTULO 5

Resultados e discussões

5.1 Caracterização dos agregados

Inicialmente foi realizada a análise granulométrica, com determinação do módulo de finura e consequente classificação dos agregados, de acordo com a normas citadas na metodologia. Para caracterização da brita foram obtidas a curva granulométrica, Figura 5.1.

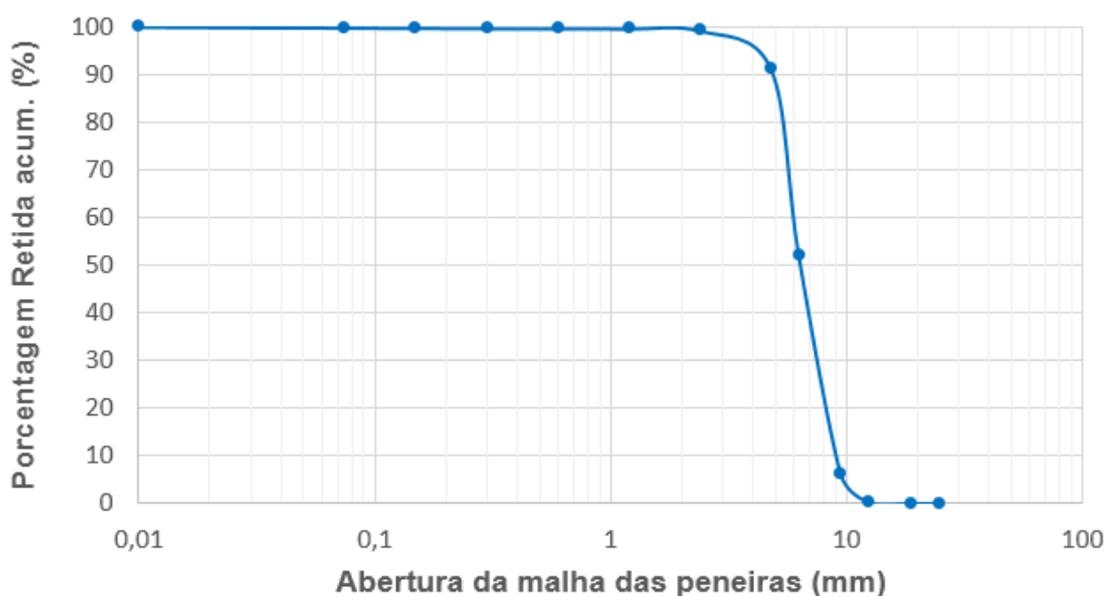


Figura 5.1 – Perfil granulométrico do agregado graúdo

O módulo de finura e o diâmetro máximo foram retirados da curva e são apresentados na Tabela 5.1. Também foi apresentado na respectiva tabela a massa específica.

Tabela 5.1 – Caracterização do agregado graúdo

Característica	Valor	Unidade	Norma
Diâmetro máximo	12,5	mm	NBR NM 248
Módulo de finura	6,95	-	NBR NM 248
Massa específica	2,67	kg/dm ³	NBR NM 52

A caracterização da areia está apresentada por meio da curva granulométrica, Figura 5.2, onde observou-se uma distribuição uniforme na faixa de 0,1 à 1mm.

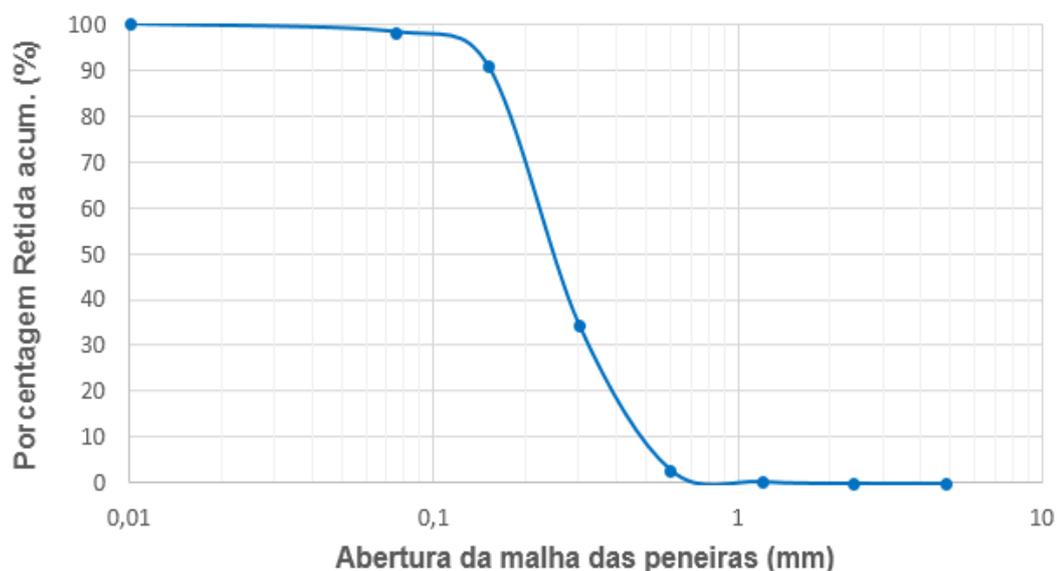


Figura 5.2 – Perfil granulométrico do agregado miúdo

Na Tabela 5.2 apresentou-se o diâmetro máximo, o módulo de finura e a massa específica da areia. Esta, pelo módulo de finura foi classificada como média fina, com uma concentração elevada na peneira com abertura de 300mm. A massa específica dos agregados foi utilizada para cálculo do consumo dos componentes do CAA.

Tabela 5.2 – Caracterização do agregado miúdo

Característica	Valor	Unidade	Norma
Diâmetro máximo	2,4	mm	NBR NM 248
Módulo de finura	2,2	-	NBR NM 248
Massa específica	2,64	kg/dm ³	NBR NM 52

5.2 Caracterização dos finos

5.2.1 Área superficial BET

A área superficial é uma propriedades dos finos de imprescindível conhecimento, pois ela contribui para o entendimento de parâmetros físico-químicos que influenciam nas propriedades do concreto nos estados fluido e endurecido. Esta área está diretamente ligada à capacidade de retenção de água e reatividade dos materiais empregados.

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados do ensaio BET, sendo estes a soma das áreas (em metros quadrados) das superfícies das partículas contidas em 1 grama de material, que conseguem adsorver o Nitrogênio, e o volume total dos poros. O resultado indica indiretamente a morfologia, porosidade e finura das partículas.

Tabela 5.3 – Superfície específica dos finos pelo método BET

 Materiais	 CIM	 PCA	 RBC	 MK	 CAL
Área superficial específica BET - (m²/g)	1,70	16,04	54,26	16,11	10,64
Volume Total dos poros (cm³/g)	0,35x10 ⁻²	1,75x10 ⁻²	3,99x10 ⁻²	3,22x10 ⁻²	6,90x10 ⁻²

A tabela mostra que o cimento é o material com menor área superficial, o que induz a uma maior granulometria e partículas menos porosas. No entanto é necessário uma análise microscópica para afirmar tal morfologia. Todas as adições obtiveram uma área superficial maior que a do cimento, com destaque para o RBC, que apesar do baixo tempo de moagem, devido à sua geometria angular e desuniforme obteve o maior resultado.

Contudo, no trabalho de Cordeiro e Kurtis (2017), os valores de BET apresentados destoaram dos obtidos, com área de 38.650 m²/g para o PCA e 11.350 m²/g para o RBC. Joshaghani e Moeini (2017) obtiveram um valor de 9675 m²/g para o RBC, condizente com os valores de Cordeiro e Kurtis.

O resultado do RBC deu muito alto provavelmente por ter passado na peneira 200, onde, na manipulação, percebeu-se que ele tem um pó muito fino e o que faz ele ficar mais grosso são fibras presentes. E isso foi constatado também por Cordeiro e Kurtis (2017), onde apesar do BET ter dado menor, após os 10 µm o RBC apresenta uma curva com partículas bem mais finas.

O volume total dos poros apresentou resultados negativos para as adições minerais, onde todas elas apresentaram porosidade maior que o cimento. Contudo, como os valores das áreas superficiais foram elevados essa porosidade é possivelmente derivada da própria porosidade das adições. Isto faz com que elas tenham uma maior retenção de água, proporcionando uma cura interna, e melhorem a tendência de exsudação no estado fresco.

5.2.2 Composição química e mineralógica

Analisou-se a composição dos finos através dos ensaios de difração e fluorescência dos raios-X. Nestes ensaios obtêm-se os picos de cristalinidade e os óxidos presentes nas amostras, respectivamente, que auxiliam nas análises de outros ensaios realizados. Destaca-se na análise de FRX os teores de óxido de Cálcio (CaO), Dióxido de Sílica (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃) presentes nas amostras, expostos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Fluorescência de Raio X dos finos

Substância química	Teor em cada material (%)				
	CIM	MK	PCA	RBC	CAL
CaO	61,39	0,45	0,94	2,47	97,20
SiO ₂	19,13	53,92	92,42	60,04	1,32
Fe ₂ O ₃	3,65	9,90	0,09	25,78	0,47
SO ₃	3,26	0,22	0,13	0,34	0,13
Al ₂ O ₃	3,99	30,34	2,01	3,08	0,40
MgO	3,15	-	-	1,02	-
K ₂ O	0,52	2,25	-	3,39	0,40
Outros	4,91	2,92	4,40	3,88	0,08

É importante ressaltar que o alto teor de óxido de Ferro presente na amostra da Biomassa da Cana-de-açúcar é decorrente do processo de moagem, feito com esferas metálicas, interferindo na composição. No FRX apresentado por Cordeiro e Kurtis (2017) o teor de óxido de ferro foi de apenas 1,6%, indicando que não faz parte da composição da cana-de-açúcar.

Mediante aplicação da equação de R. H. Bogue (Mehta e Monteiro, 2014) é possível calcular os valores previstos dos compostos que serão produtos da hidratação do cimento. Os resultados das equações estão evidenciados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Teores potenciais dos produtos hidratados do cimento

Elemento potencial	Teor potencial (%)
C ₃ S	60,16
C ₂ S	10,20
C ₃ A	5,40
C ₄ AF	10,11

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), a quantidade de Alita (C_3S) e Belita (C_2S), nos teores de 50% a 60% e 10 a 15%, respectivamente, indicam um cimento com característica de alta resistência inicial. Esse fato comprova que o cimento utilizado está condizente com a classificação e não possui adições que prejudiquem a comparação entre os concretos. Os produtos também foram encontrados em grande intensidade no DRX, Figura 5.3, ratificando o cálculo.

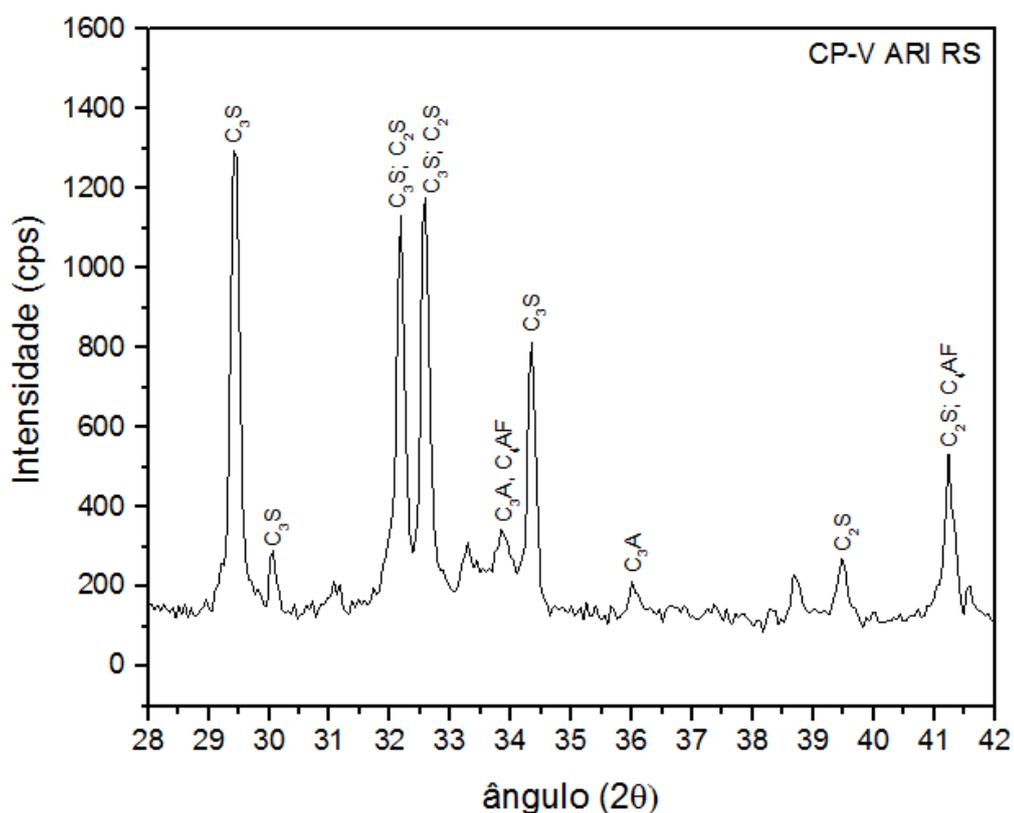


Figura 5.3 – Difração de raios X do cimento

Para as adições minerais observa-se a presença marcante dos compostos supracitados, sílica e alumina, e novamente a presença do ferro no RBC, o que indica mais uma vez a interferência das esferas metálicas do moinho. Os resultados de DRX são expostos na Figura 5.4.

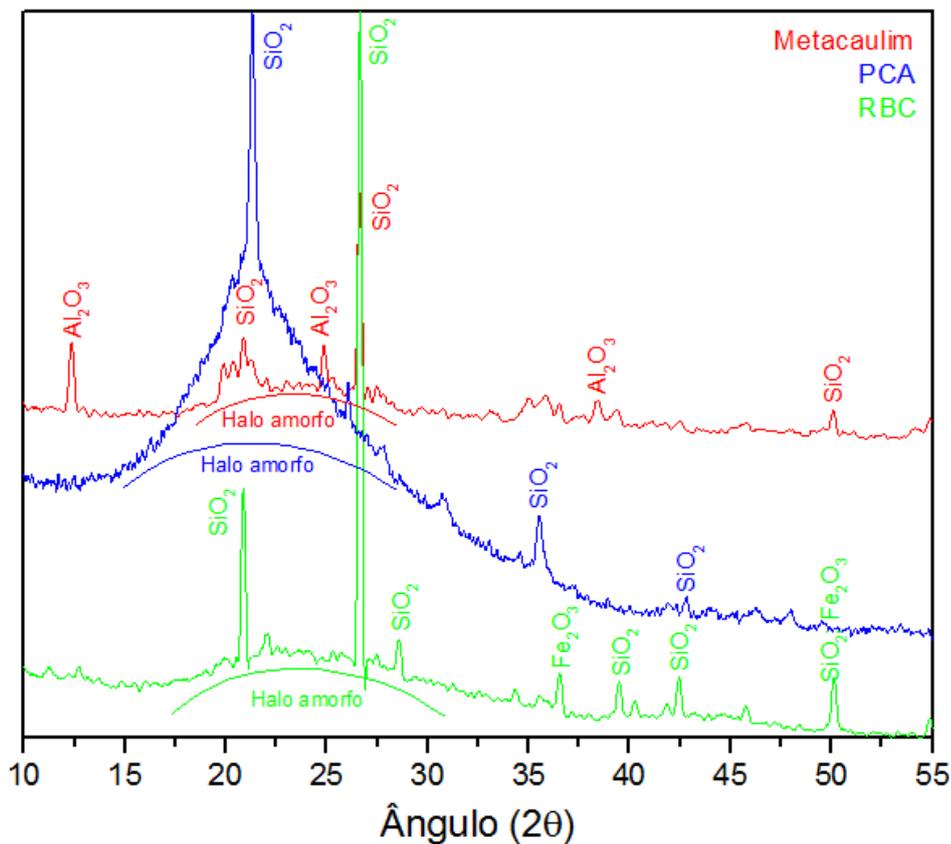


Figura 5.4 – DRX das adições minerais

Foi encontrada uma quantidade considerável de sílica em todas as adições indicando que há uma tendência de reatividade pozolânica. Atrelado à presença do óxido de sílica há também uma indicação de um halo amorfo na faixa de $18^{\circ}2\theta$ à $32^{\circ}2\theta$. Logo, há outra indicação da pozolanicidade das adições.

Há um destaque do halo amorfo do PCA e a presença de Sílica em picos pequenos, assim como no RBC, o que indica uma maior amorficidade da sílica presente e, conseqüentemente, uma maior tendência à pozolanicidade.

5.2.3 Granulometria à laser

A granulometria à laser realizada caracteriza os materiais finos presentes nos concretos confeccionados por meio do perfil granulométrico e histograma, o qual é a derivada da função do perfil e permite a visualização das faixas que os grãos se concentram, com precisão de $0,3\mu\text{m}$. A Figura 5.5 mostra o perfil do cimento.

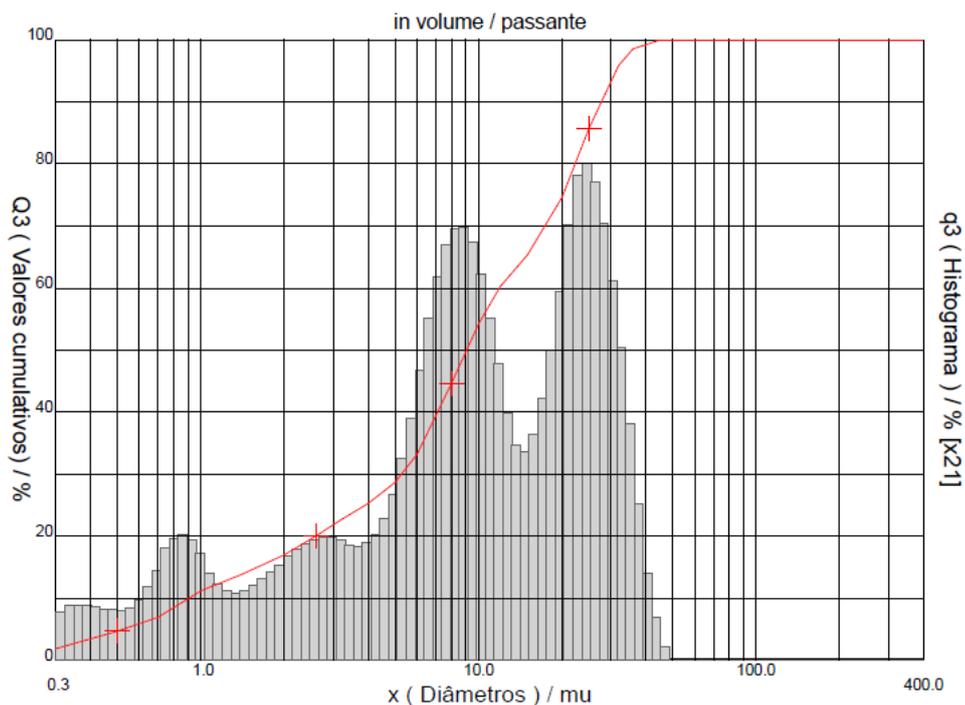


Figura 5.5 – Granulometria à laser do cimento

O cimento possui um diâmetro médio de $12,32\mu\text{m}$ com dois picos relevantes nas faixas entre 5 e $14\mu\text{m}$ e 17 e $26\mu\text{m}$. Já a cal, tem um diâmetro médio de $6,82\mu\text{m}$ e apenas um pico que ocupa uma faixa maior entre 2 e $20\mu\text{m}$. A curva da cal é apresentada na Figura 5.6.

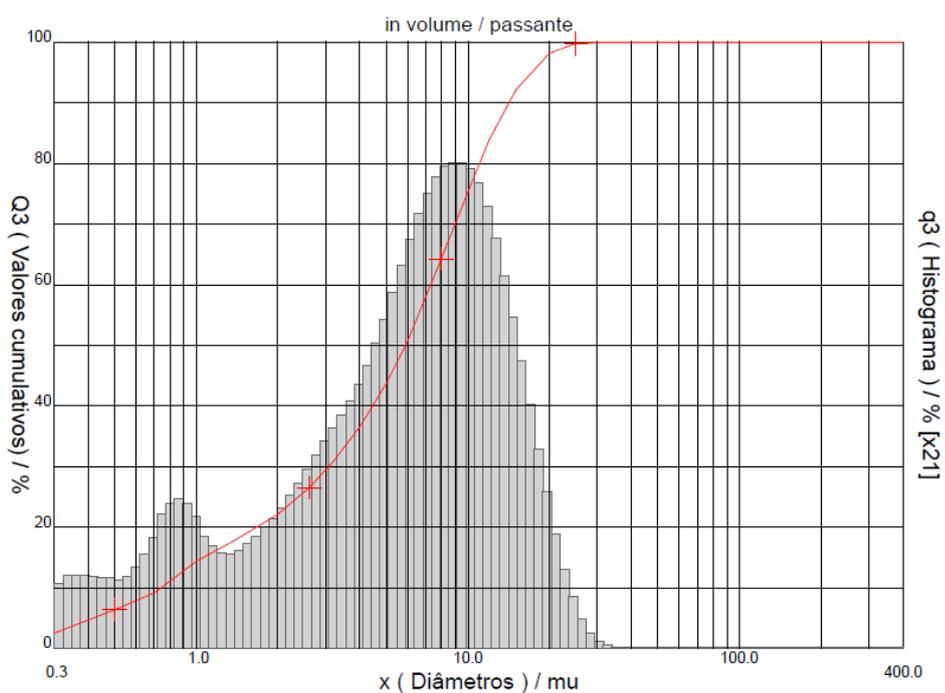


Figura 5.6 – Granulometria à laser da Cal

Analisando as adições agroindustriais, o RBC possui a granulometria mais grossa, com diâmetro médio de $18,21\mu\text{m}$, contudo apresentando um perfil bem distribuído, o que pode ocasionar em melhor preenchimento dos vazios da matriz. A curva do RBC está representada na Figura 5.7.

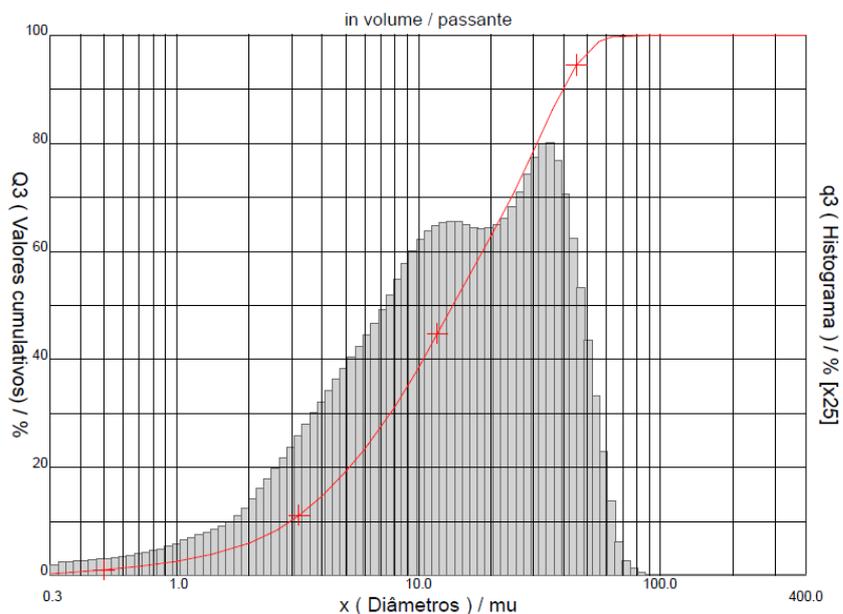


Figura 5.7 – Granulometria à laser da Biomassa da cana-de-açúcar

Já o PCA possui um diâmetro médio um pouco menor, de $16,22\mu\text{m}$, com 3 picos distribuídos ao longo do perfil, Figura 5.8. O último perfil granulométrico exposto é do metacaulim, com diâmetro médio de $10,50\mu\text{m}$, Figura 5.9.

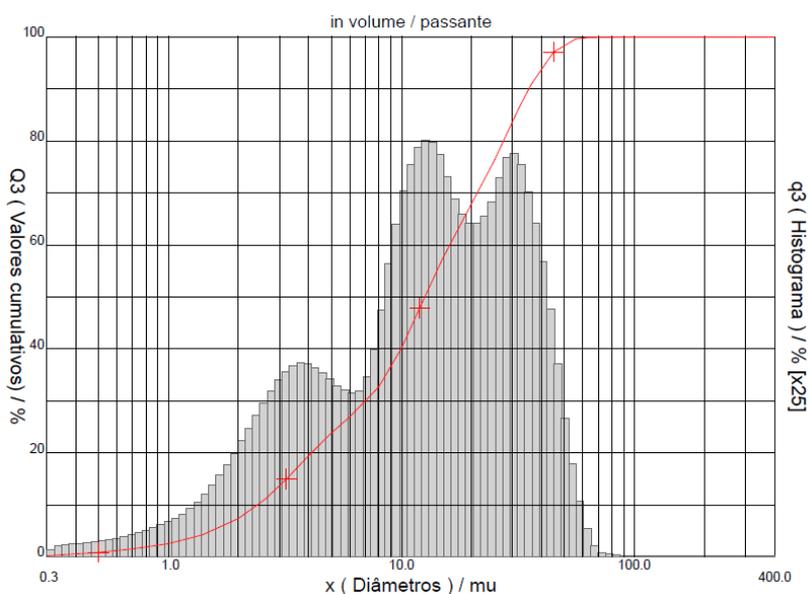


Figura 5.8 – Granulometria à laser da Pozolana da casca de arroz

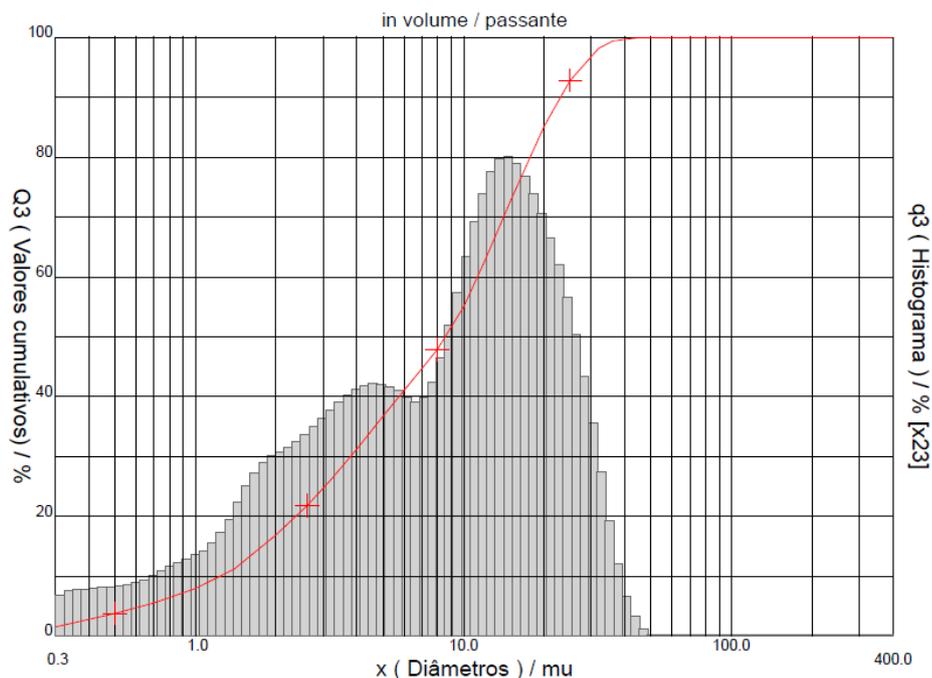


Figura 5.9 – Granulometria à laser do Metacaulim

5.2.4 Índice de atividade pozolânica com cal

A Tabela 5.6 apresenta a resistência das argamassas confeccionadas conforme a NBR 12.653 (ABNT, 2014), para análise do índice determinado pela norma para caracterização da adição como pozolânica.

Tabela 5.6 – Índice de atividade pozolânica das cinzas agroindustriais

Amostra	IAP - 7 dias (MPa)
Referência	6*
RBC	3,35
PCA	4,71

*Valor mínimo normativo

Os resultados dos ensaios de IAP não foram satisfatórios pois não atingiram o valor mínimo da norma para caracterizar as adições como pozolânicas, contudo isto ocorre em função da baixa idade de ensaio, não havendo tempo hábil para a reação desenvolver e também, em relação ao RBC, a finura que atrasa o desencadeamento

da reação. Na avaliação das DRX pôde-se indicar no gráfico características de pozolanicidade.

Também, nos estudos de Medeiros (2016) estas adições não apresentaram valores de IAP acima de 6 MPa, no entanto outros ensaios feitos pela autora indicaram pozolanicidade, assim como os halos amorfos acentuados e a presença de sílica no DRX da adições, no presente estudo. Outro indicativo são os resultados de resistência à compressão, apresentados na Figura 5.27, onde os CAA's com as adições tiveram o crescimento da resistência potencializados após os 28 dias, sendo um indicador para a ocorrência da reação pozolânica.

Ademais, Cordeiro e Kurtis (2017) comprovaram, através do estudo do CH contido por calorimetria, a pozolanicidade do PCA e do RBC, sendo mais marcante a do PCA e a do RBC de forma mais retardada. Makul e Sua-iam (2018) também destacam a pozolanicidade do PCA.

5.3 Avaliação do comportamento dos CAA's no estado fresco

Foram investigadas as propriedades no estado fluido das sete misturas de CAA, no intuito de validá-las como concretos autoadensáveis e compará-las entre si. Essa comparação só foi possível pela constância do fator água/finos e do traço, alterando apenas as adições e seus respectivos teores de substituição.

Apenas o concreto referência teve alteração na relação entre areia e brita, contudo a relação agregados/finos manteve-se constante. Foi necessária tal alteração devido ao CAA referência não apresentar boa homogeneidade, resultando por vezes em uma segregação dos agregados graúdos após realização de testes preliminares. A relação entre areia e brita no TR foi de 1 enquanto que nos demais concretos foi de 0,76.

Contudo, essa alteração foi necessária para possibilitar a manutenção do fator água/finos, devido à presença de água ser mais determinante para a fluidez do CAA e para melhor comparação da resistência e dos índices de durabilidade. Dessa forma, os CAA's apresentaram bom comportamento e não prejudicou a análise comparativa entre os mesmos. O consumo e os parâmetros utilizados estão expostos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Consumos e parâmetros das misturas realizadas

TRAÇOS		TR	R30	R30C10	R20	R20C10	P30	P30C10
Consumos (Kg/m ³)	CIM	442,6	215,9	212	260,8	256	216,3	212,3
	MK	-	86,4	84,8	86,9	85,3	86,5	84,9
	PCA	-	-	-	-	-	129,8	127,4
	RBC	-	129,6	127,2	86,9	85,3	-	-
	CAL	-	-	42,4	-	42,7	-	42,5
	AM	841	708,3	695,2	712,9	699,6	709,3	696,2
	AG	841	932,9	915,7	938,9	921,5	934,2	917
	ÁGUA	221,3	215,9	212	217,3	213,3	216,3	212,3
Parâmetros	ADITIVO (%)	0,61	2,5	2,5	1,72	1,72	2,2	2,2
	TEOR DE ARG (%)	60%	55%	56%	55%	56%	55%	56%
	FINOS (kg/m ³)	442,6	431,9	466,3	434,7	469,3	432,5	467
	(AM+AG) / FINOS	3,8	3,8	3,5	3,8	3,5	3,8	3,5

Com a alteração da quantidade de areia no TR houve uma diferença no teor de argamassa, todavia a relação de agregados / finos manteve-se em 3,8, garantindo a comparação. Como a cal foi calculada como adição à mistura e não como substituição do cimento há um aumento dos finos nos CAA's com a sua presença, baixando a relação agregados / finos e elevando o teor de argamassa.

Entretanto, é importante ressaltar que a alteração não interferiu nas comparações, e que a cal foi incorporada como adição propositalmente para não interferir na relação entre o cimento e os agregados.

A quantidade de finos das misturas variou em uma faixa de 432 e 467 kg/m³ em decorrência da diferença de densidades entre os materiais utilizados e pelos diferentes teores de substituição. Entretanto, os valores estão dentro da faixa entre 380 e 600 kg/m³, recomendada pela EFNARC para os concretos atingirem a autoadensabilidade.

Com os teores de substituição escolhidos houve uma redução acentuada no consumo de cimento, contudo houve uma maior demanda de aditivo superplastificante. A ocorrência deste fato decorre da maior porosidade e área superficial das partículas do PCA e RBC, o que provoca um travamento no rolamento

interno por efeito de encunhamento das partículas mais alongadas. Arelado às partículas das adições têm-se também a maior porosidade e área superficial, havendo um maior consumo de água, reduzindo a lubrificação na matriz do compósito.

Comparando os concretos R30 e P30 é possível observar que o RBC tem um maior consumo do aditivo em relação ao PCA. Isso ocorre devido ao RBC utilizado ter maior área superficial, de acordo com o BET, necessitando de mais aditivo para atingir toda a superfície do RBC. Contudo, o aditivo consumido também foi alto, e isso também ocorreu com Le e Ludwig (2016), que observou uma forte porcentagem de consumo do aditivo, acima de 2%.

5.3.1 Propriedades físicas

As propriedades no estado fresco dependem muito da estrutura da matriz do concreto após o procedimento de mistura. Logo, foi necessário averiguar os teores de ar incorporado e a densidade a fim de subsidiar as análises de caracterização da auto adensabilidade. A Tabela 5.8 mostra os resultados encontrados.

Tabela 5.8 – Resultados do Ar incorporado e da Densidade das misturas

Ensaio	Traços						
	TR	R30	R30C10	R20	R20C10	P30	P30C10
Ar incorporado (%)	1,8	2,2	2,4	1,95	1,7	1,7	1,35
Densidade (g/cm ³)	2,34	2,27	2,26	2,28	2,29	2,29	2,29

O CAA que apresentou menor teor de ar incorporado foi o P30C10, indicando que a interação entre a cal e o PCA reduzem os espaços vazios. No entanto, apenas os concretos com 30% de RBC tiveram esse teor elevado, acima do TR. Isso indica que esse teor de 30% de RBC é elevado demais e começa a prejudicar o empacotamento da mistura, provavelmente pela fibrosidade visualmente observada.

Avaliando por meio do delineamento estatístico, obtêm-se as seguintes superfícies de resposta, Figura 5.10.

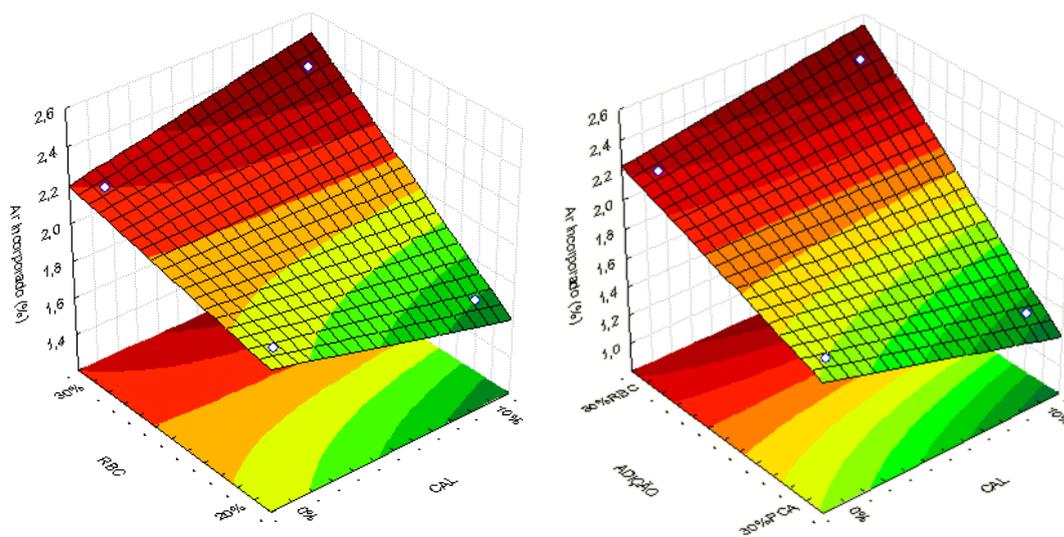


Figura 5.10 – Superfície de resposta do ar incorporado

As superfícies da análise comparativa entre os CAA's com 20 e 30% de RBC (a) e entre os CAA's com 30% de PCA e RBC (b) apresentaram-se muito próximas. O efeito calculado já elimina influência da Cal pois o resultado se aproximou à zero e apresentou tendências opostas no mesmo eixo, ou seja, a significância é baixa.

A incorporação de RBC tanto no aumento percentual de 10% quanto na substituição do PCA refletiu em um efeito de aumento do teor em 0,5% e 0,8%, respectivamente. Esse efeito aduz que a incorporação de RBC prejudica o encaixe das partículas na intenção de melhorar a coesão do concreto e conseqüente redução dos vazios. Contudo esse efeito é prejudicial apenas com 30% de RBC, como supracitado.

A densidade é um parâmetro indicativo da porosidade de uma mistura, no entanto, como os materiais utilizados possuíam diferentes massas específicas então torna-se inviável a comparação direta dos resultados. Contudo, calculando-se a densidade teórica (considerando o volume de vazios igual a zero) é possível analisar o distanciamento da curva entre as densidades real e teórica.

Na Figura 5.11 é exibido o gráfico que representa esse distanciamento e compara-se com os valores obtidos no ensaio de teor de ar incorporado. Pode-se observar que a diferença entre as densidades é diretamente proporcional ao teor de

ar incorporado. Isso ocorre porque quanto mais ar presente, menor é a densidade, em virtude do peso do ar ser considerado zero.

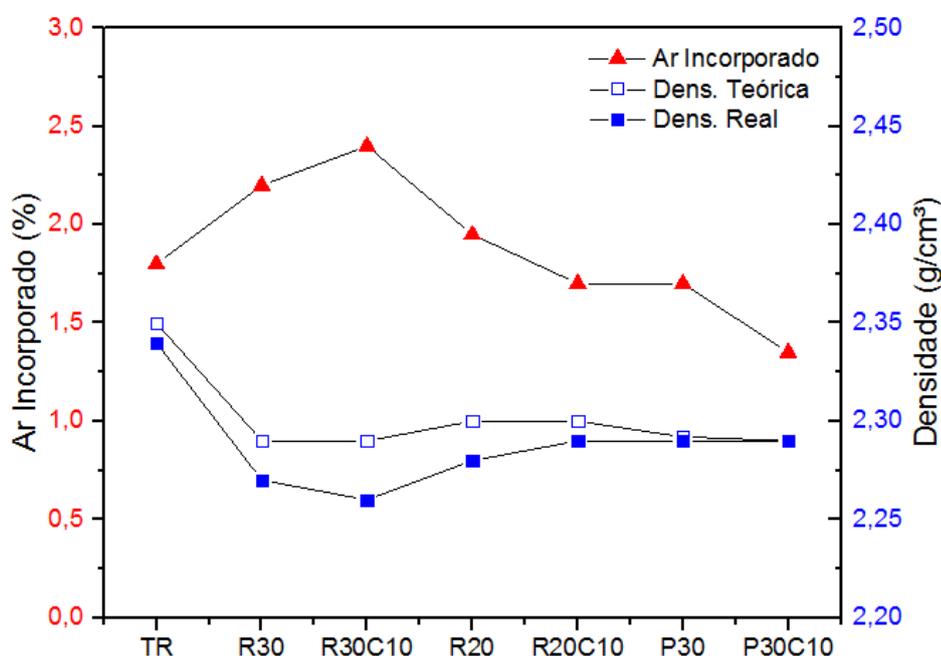


Figura 5.11 – Gráfico do ar incorporado x Densidades real e teórica

É fundamental relatar que, em virtude do número de ensaios elevados, cada concreto foi confeccionado mais de uma vez. Foi feito dessa forma para viabilizar a realização de todos os ensaios com pouco tempo após a mistura, no intuito de retirar a variável tempo, uma vez que, alguns resultados foram prejudicados na pesquisa de Medeiros (2016) “devido à não simultaneidade na execução dos ensaios”.

Dessa forma apesar dos CAA serem misturados em diferentes betonadas, há uma boa homogeneidade entre as betonadas do mesmo CAA, visto que o teor de ar e densidade medidos nas diferentes betonadas apresentaram forte coerência entre si. Este fato valida os resultados apresentados em ambos os ensaios e revela que as diferentes betonadas mantiveram uniformidade da mistura.

5.3.2 Ensaios de caracterização do comportamento dos CAA's

Para a avaliação do comportamento e classificação dos traços escolhidos como concretos autoadensáveis, foram realizados os ensaios descritos nas seis partes da NBR 15.823 (ABNT, 2017). Ademais, foram mensurados os tempos T500 com e sem

o anel J e também medida a altura do concreto antes e depois do anel, resultando nos dados apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios no estado fresco

Traços	Ensaio						
	Slump Flow		Anel J		Altura (h1-h2)	Funil V (s)	Caixa L (h2/h1)
	Espalhamento (mm)	T500 (s)	Espalhamento (mm)	T500 (s)			
TR	777	1,2	730	1,6	1	3,05	0,98
R30	748	3,1	718	4	0,9	11,3	0,92
R30C10	762	3,4	753	5,1	0,7	14,5	0,95
R20	752	3	720	4	1	8,9	0,93
R20C10	777	3,3	768	3,7	0,8	10,4	0,93
P30	781	2,9	770	3,4	0,6	11,1	0,92
P30C10	787	4	780	4,2	0,5	13,8	0,95

Na Figura 5.12, é possível observar os resultados do espalhamento no *Slump Flow*. Todos os CAA's ficaram próximos ou acima de 750mm, classificando-os com SF3, segundo a NBR 15.823-1 (ABNT, 2017). A EFNARC (2005) aduz que os CAA com essa classificação podem ser utilizados em diversos tipos de estruturas, validando o uso de todos os CAA's confeccionados.

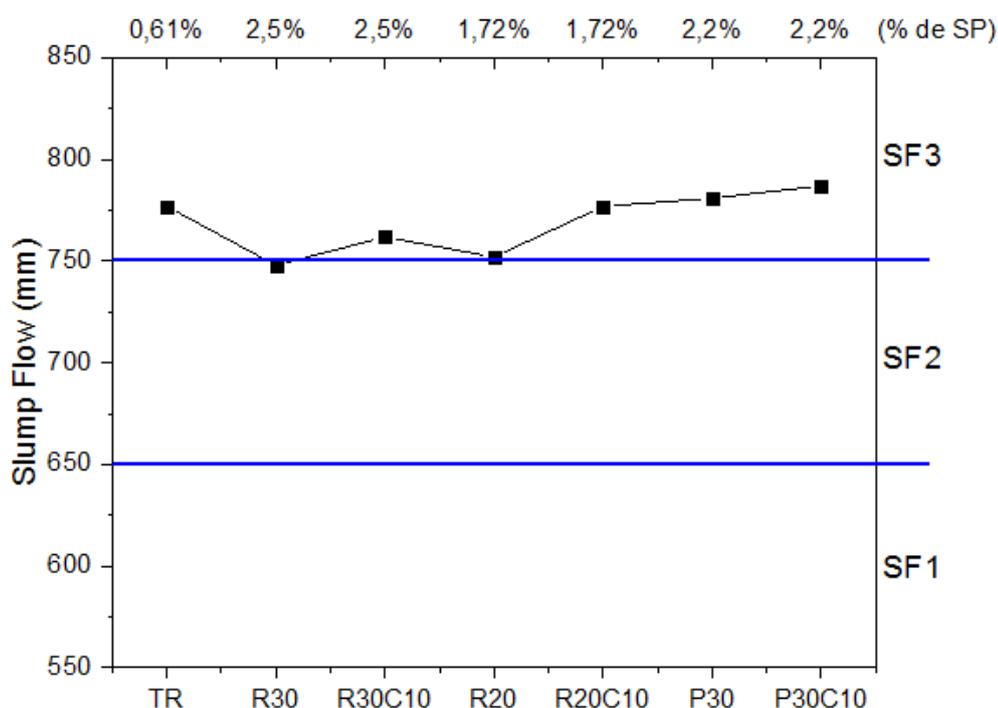


Figura 5.12 – Gráfico do resultado do Slump Flow Test

Quanto à aparência do concreto, após o *Slump flow test*, todos os CAA's apresentaram-se homogêneos, sem concentração de britas no centro da circunferência e não houve indícios de exsudação, conforme Figura 5.13.

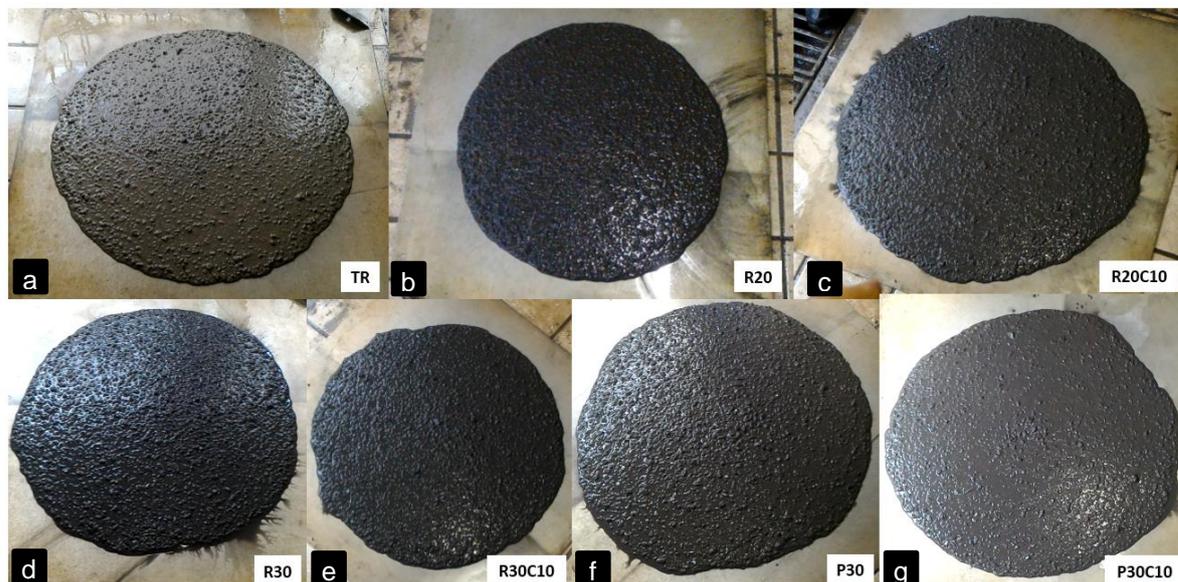


Figura 5.13 – Espalhamento das misturas: a) TR; b) R20; c) R20C10; d) R30; e) R30C10; f) R20; g) R20C10.

Apenas na figura 5.13 d, referente ao traço R30 é visível que a placa estava muito molhada na realização do ensaio, porém presencialmente foi possível constatar que o concreto apresentava as características citadas acima. De acordo com a NBR 15.823 (ABNT, 2017) todas são classificadas com classe IEV 0, melhor índice de estabilidade visual.

Como os teores de aditivo foram iguais para os CAA's com e sem presença de cal e a classificação foi igual à do espalhamento, para discutir a influência das adições nos percentuais de aditivo e no espalhamento foi necessário observar a relação espalhamento *versus* aditivo, que revela a eficiência de 1 grama de aditivo no espalhamento. Na Figura 5.14, é apresentado um gráfico com essa relação.

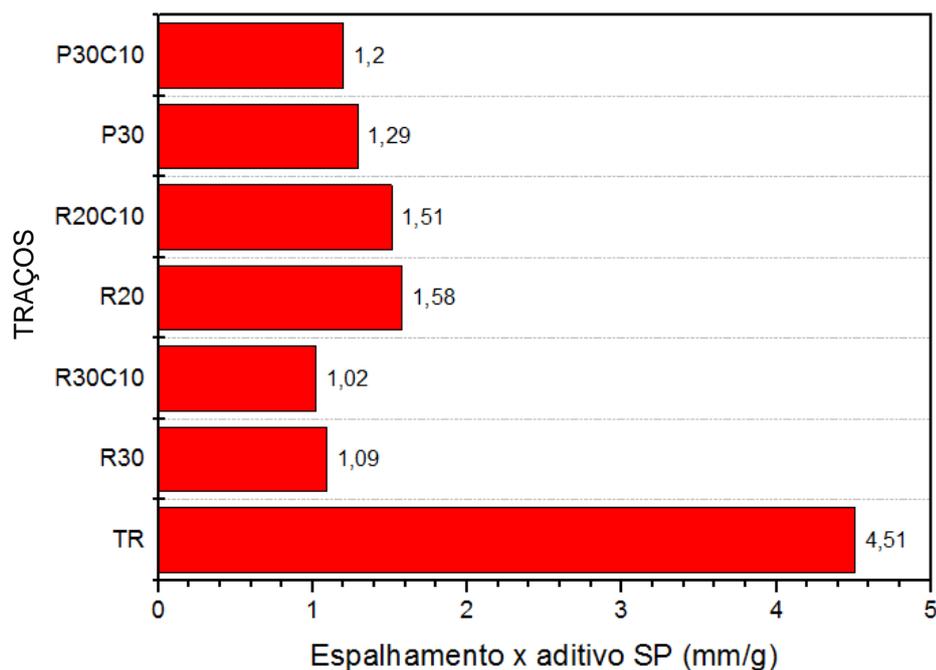


Figura 5.14 – Eficiência do aditivo superplastificante

O cimento foi a variável que possibilitou maior espalhamento com 1 grama de aditivo, com grande discrepância dos CAA's com as adições. Devido às partículas do cimento terem uma área superficial menor há uma necessidade muito pequena para atingir todo o grão para ionizá-lo e aumentar o espalhamento.

Le e Ludwig (2016) afirmam que a substituição parcial do cimento por adições com maior área superficial promovem um aumento da superfície absorvente do superplastificante, elevando o seu teor e a saturação de aditivo.

Com essa relação comprova-se também a afirmativa que o RBC provoca um maior travamento quando comparado ao PCA, visto no gráfico do *Slump flow*. Entretanto, é menos destoante quando analisada a eficiência do aditivo. Também há indícios que a presença da cal provoque um travamento no espalhamento, isto, devido ao volume total dos poros ser bem superior aos demais finos.

Apesar do concretos autoadensáveis com cal apresentarem um valor de *slump flow* menor, como ela foi acrescida como adição, e não como substituição, a quantidade de finos aumentou e, sendo o percentual de aditivo o mesmo, a quantidade em gramas do aditivo aumenta, e conseqüentemente o espalhamento também.

Todavia a eficiência do aditivo não se desenvolve na mesma proporção do espalhamento, atribuindo esse comportamento à cal. O espalhamento é maior também porque a elevada quantidade de finos aumenta o teor de pasta, a qual é um lubrificante entre as partículas, favorecendo a fluidez da mistura.

Sendo assim, esse índice apresenta um resultado mais real sobre o efeito da Cal em relação ao espalhamento sozinho. Todavia, como a diferença no espalhamento e no índice criado é pequena é necessário observar esses valores estatisticamente, como a seguir.

A Figura 5.15a mostra a superfície de resposta da análise estatística do efeito da cal e da redução de RBC de 30% para 20%. Pôde-se aferir que o efeito do acréscimo de Cal foi apenas de $-0,07$ mm/g, mostrando que a cal reduz a fluidez, contudo de forma pouco significativa. Fonseca (2016) apresenta uma imagem de MEV da cal mostrando sua geometria irregular, comprovando que esse tipo de forma provoca o travamento à fluidez do CAA.

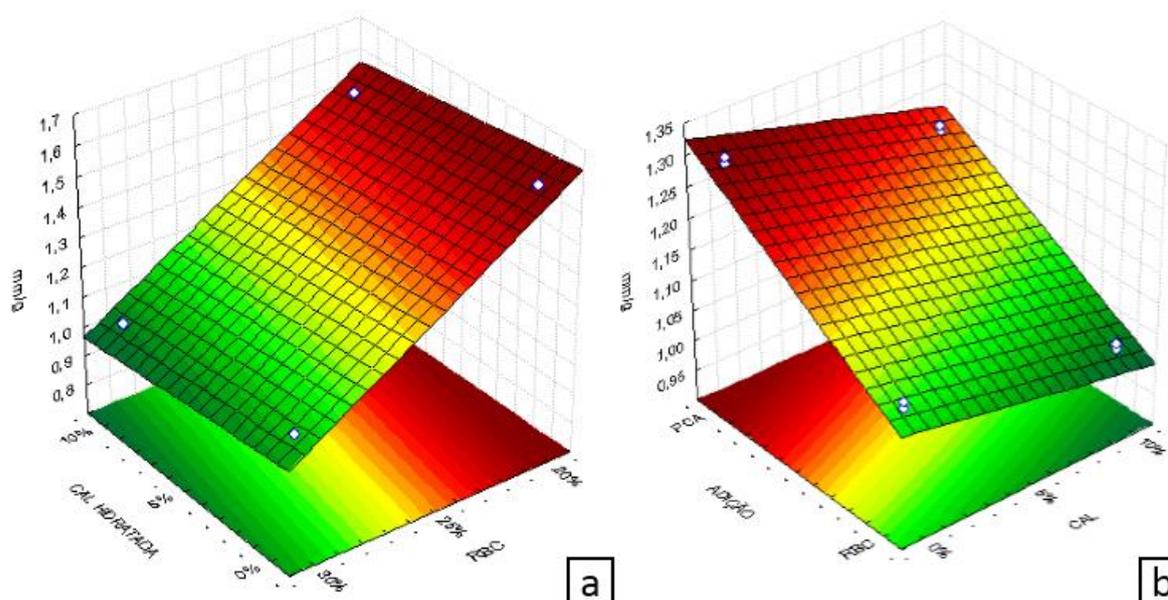


Figura 5.15 – Superfície de resposta da eficiência do aditivo

O acréscimo de RBC também tem um efeito negativo, porém bem mais acentuado, de $-0,49$ mm/g. Isso demonstra que apesar da geometria influenciar na fluidez o fator que tem maior influência no espalhamento é o cimento, uma vez que o

aumento do teor de RBC implica em redução de cimento. Esses resultados tiveram significância de 99%.

Na superfície de resposta 5.15b a mudança de RBC para PCA produz um efeito de 0,19 mm/g, o que indica que apesar de o RBC reduzir a fluidez por sua maior área superficial, quando comparado ao PCA, a redução do teor de substituição ainda produz maior efeito que qualquer uma das adições. Isso ratifica que a quantidade de cimento é o fator preponderante para a fluidez, o que também é observado no tempo de espalhamento (T500) e de queda no Funil-V, na figura 5.16.

Entretanto, é necessário observar que o TR, apesar de ter uma fluidez bem mais elevada, foi preciso mudar a relação entre os agregados graúdo e miúdo para a mistura se manter coesa, porém no limite de exsudação. Esse fato gera mais um ponto positivo para as adições minerais, onde foi possível manter a classificação SF3 para todas as misturas sem ocorrer a segregação ou exsudação.

É inevitável admitir que a presença das adições aumenta o consumo de aditivo superplastificante, o que torna eleva o custo do concreto, nesse item. No entanto, avaliando o processo de produção do RBC, observado na coleta e no preparo e comparando-o com a fabricação do cimento, é possível inferir que se este resíduo se torne um produto industrializado com preço competitivo ao cimento.

Apesar de ser uma conclusão empírica, foi visto que o processo de beneficiamento do RBC demanda bem menos etapas que a fabricação do cimento, requerendo apenas a secagem, moagem e ensacamento. Ademais, existe o fator ambiental, uma vez que é um resíduo que não tem ainda 100% de destinação.

Continuando a análise, no estado fresco, os tempos aferidos nos ensaios de T500 e funil V, apresentado na Figura 5.16, legitimam os resultados do *Slump Flow test*, pois, da mesma forma, os CAA's com adições reduziram a fluidez do concreto, uma vez que demandaram muito mais aditivo para atingir o espalhamento. Esses CAA's foram todos rotulados como de viscosidade menor em ambas as classificações (VS2 e VF2) dos ensaios. Entretanto, em nenhum dos traços houve obstrução do funil V.

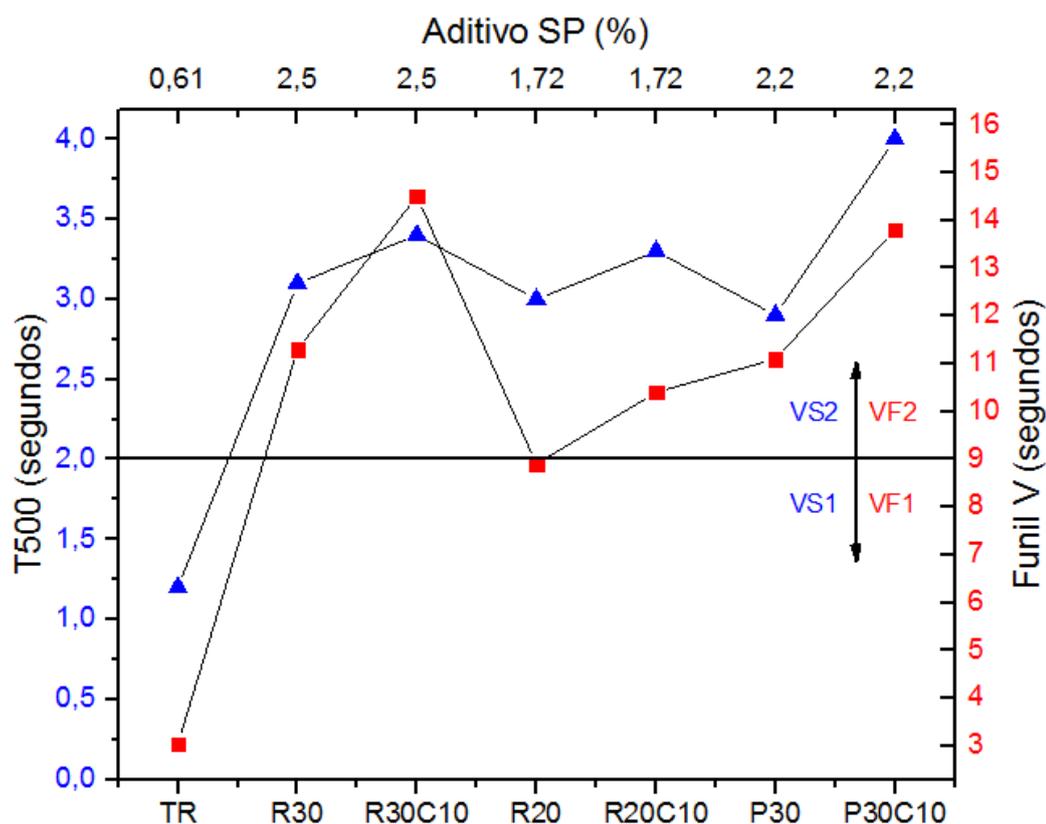


Figura 5.16 – Tempo de T500 x Funil V

Percebe-se também que, apesar dos concretos em ambos os ensaios apresentarem as mesmas classificações, no ensaio do Funil V houve uma variação maior nos tempos, exposto na análise estatística, na tabela 5.10. Contudo, isso é função do maior volume de concreto e menor área do vertedouro do funil.

Sendo assim, é mais interessante avaliar a semelhança de comportamento dos gráficos, que são coerentes entre si. O único ponto que destoa é no traço P30, sendo essa anormalidade detectada na análise dos efeitos.

Esse comportamento inverso, cujo efeito no T500 foi de melhora da fluidez quando inserido o RBC, enquanto que o efeito no Funil V o PCA apresentou melhor fluidez, atrelado ao baixo valor do efeito, indica que com 30% de RBC ou de PCA o comportamento será semelhante, para estes concretos autoadensáveis.

Kannan e Ganesan (2014) citam que a partir de 20% de PCA com 20% de metacaulim a classificação VF1 não é mais obtida, em consenso com os resultados

presentes. Makul e Sua-lam (2018) também avaliaram CCA's com o PCA e verificaram um aumento significativo do T500.

Tabela 5.10 – Efeito estatístico do T500 e funil V

EFEITO (segundos)				
ENSAIOS	R20/R20C10/R30/R30C10		P30/P30C10/R30/R30C10	
	ACRÉSCIMO DE RBC	ACRÉSCIMO DE CAL	SUBST. PCA POR RBC	ACRÉSCIMO DE CAL
T 500	0,1	0,3	-0,2	0,7
FUNIL V	2,35	3,25	0,45	2,95

Constata-se também que a cal é a mais influente, dentre as adições, para o aumento do tempo dos ensaios (aumento da viscosidade). Esse resultado endossa a afirmativa de que a microestrutura porosa e irregular da Cal provoca um efeito de travamento no concreto, já constatada no ensaio *Slump Flow*.

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam as superfícies de resposta referente aos efeitos da Tabela 5.10. Com elas é possível observar melhor os efeitos apresentados. Não foi considerado nos cálculos da Tabela 5.10 o efeito da interação entre as variáveis. Como o tempo foi retirado de um vídeo só possui uma aferição, logo, não foi possível calcular a significância. Todavia, como a análise foi comparativa, é possível avaliar os efeitos.

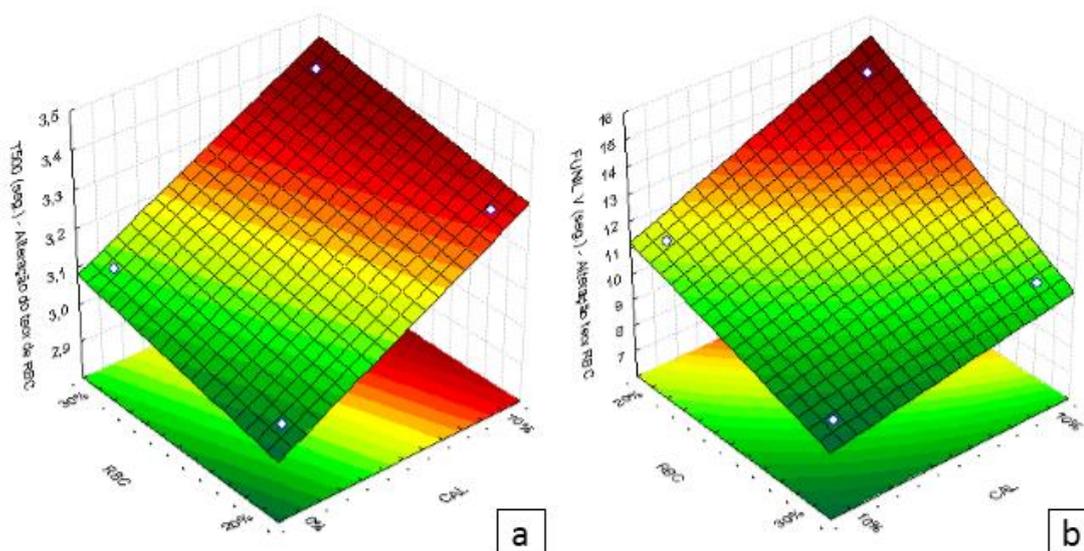


Figura 5.17 – Superfície de resposta funil V no aumento do RBC

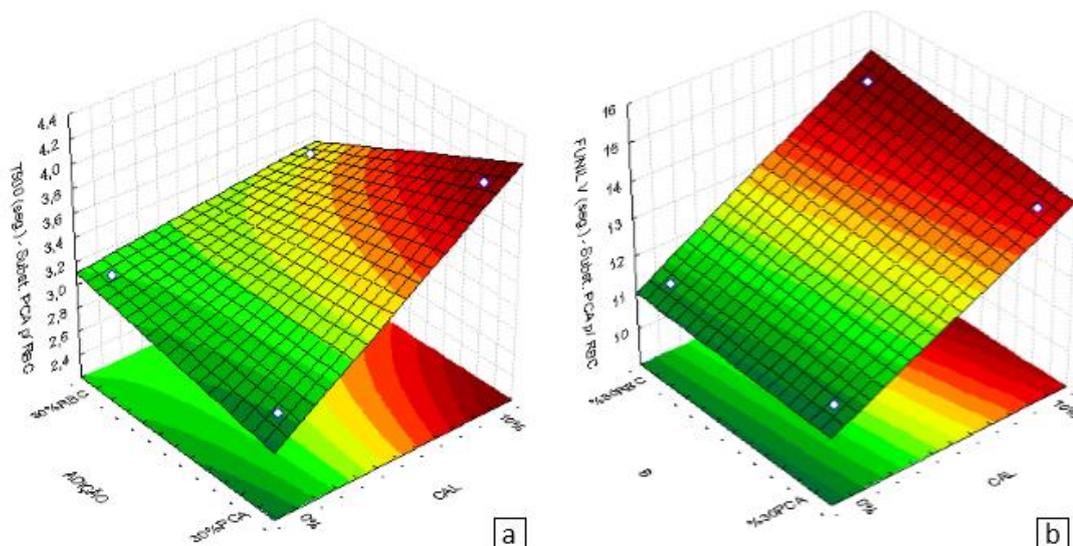


Figura 5.18 – Superfície de resposta funil V na substituição do PCA por RBC

Outra medição de tempo que foi aferida, é o tempo para o espalhamento de 500 mm com o entrave do Anel J (T500-J). A diferença entre esse tempo e o T500 revela a habilidade da mistura passar por obstáculos sem perder a fluidez e mantendo a coesão, preenchendo o entorno dos obstáculos.

Segundo a NBR 15.823-1 (ABNT, 2017) essas são as características desejáveis em um concreto autoadensável, habilidade passante e de preenchimento (atrelada a fluidez). O T500-J aferido está apresentado na Figura 5.19.

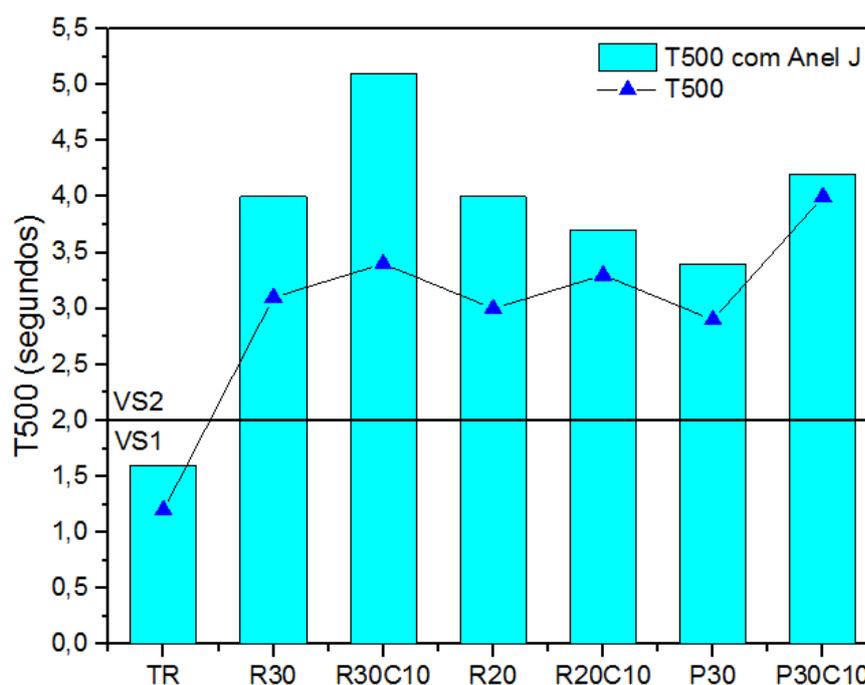


Figura 5.19 – Gráfico T500 com e sem anel J

Constata-se, como era previsto, que em todos os CAA's o anel J demandou um maior tempo para preencher o círculo de 500 mm. Porém, o concreto referência ainda manteve-se na classificação VS1. Isso assevera a forte ação do teor de cimento na fluidez do CAA, sendo agora, constatada a influência na habilidade passante.

O traço P30C10 foi a mistura que apresentou menor diferença entre os tempos, induzindo que essa proporção de materiais tem uma boa coesão entre seus componentes, o que facilita a passagem pelas barras do anel. Essa afirmativa foi comprovada no teste do teor de ar incorporado, onde esse CAA apresentou menor percentual de ar incorporado, conforme detalhado na Figura 5.10.

Os traços R30, R30C10 e R20 apresentaram a diferença entre os tempos mais elevados que os demais. Esse resultado indica que o RBC prejudica a coesão do concreto, devido à sua área superficial ser bem menor, prejudicando a energia de ligação com os outros componentes, e suas partículas grandes e lamelares serem mais facilmente contidas nas barras.

O resultado do teor de ar incorporado corrobora com essa afirmação, pois os três concretos autoadensáveis supracitados foram os que apresentaram, não respectivamente, os maiores valores de ar presente. Analisou-se também a diferença entre T500 e T500-J, pelo efeito estatístico, Figura 5.20.

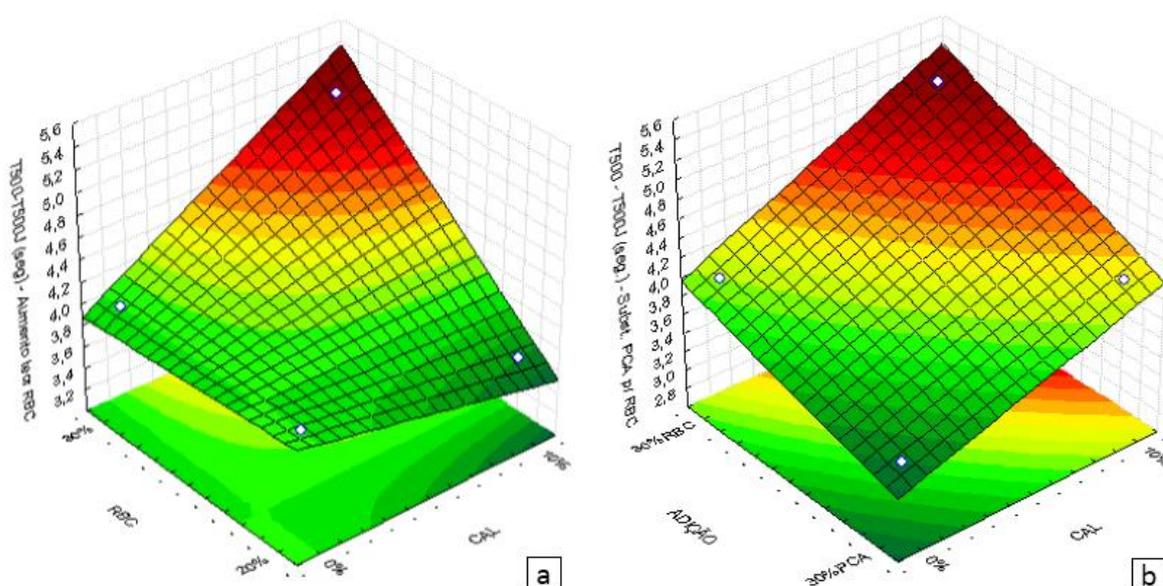


Figura 5.20 – Superfície de resposta T500 na substituição do PCA por RBC

Na Figura 5.20a o efeito causado pelo aumento de RBC foi de 0,7 segundos, enquanto que o de Cal 0,4 segundos, indicando mais uma vez que a adição de RBC provoca um maior travamento nas barras no anel. Têm-se nessa figura um comportamento interessante, onde há um pico no traço R30C10, indicado também nos efeitos estatísticos, onde a interação entre o RBC e a Cal obtiveram um efeito de 0,7 segundos.

Logo, na composição da mistura R30C10, foi possível observar que não é possível utilizar as duas adições juntas nesses teores, pois provocam um efeito sinérgico negativo às propriedades no estado fresco. Isto é consequência da perda de fluidez da cal atrelada ao travamento do RBC no anel-J. Contudo esse efeito sinérgico foi positivo para a resistência à compressão, exposto adiante.

Na análise entre a troca de PCA por RBC relacionando-a com a incorporação de cal, Figura 5.20 b, o efeito da troca por RBC foi de 0,75 segundos, sendo coerente com o efeito apresentado quando incorporado mais 10% de RBC. Isto corrobora com a conclusão supracitada de que o resíduo da biomassa de cana-de-açúcar, pela geometria de suas partículas, favorece o travamento no anel J.

Observou-se também, na Figura 5.20 b, que a substituição de PCA por RBC produziu um efeito de 0,95 segundos quando inserida a Cal. Comparando com o efeito da mesma na incorporação de RBC de 20% para 30%, o efeito foi de apenas 0,4s. Ou seja, há uma forte probabilidade de haver a sinergia entre a Cal e o RBC para redução da habilidade passante do concreto, como já previsto.

É possível inferir esta conclusão, pois ao se analisar que, com o acréscimo de 10% o RBC *versus* acréscimo de 10% de Cal, na Figura 5.20 a, o RBC teve maior efeito (maior influência), e sabendo que o RBC tem um travamento no anel J muito maior que o PCA, teoricamente o efeito do RBC era para ser maior, já que se está inserindo 30%, ao invés de 10%, o que não ocorreu.

Contudo, a Cal apresentou um salto muito grande quando inserida essa maior quantidade de RBC, ou seja, parte do efeito da cal não foi contato na primeira situação, pois já havia 20% de RBC. Na segunda, como houve um acréscimo maior de RBC, a sinergia da Cal se mostrou mais forte, para obstrução do concreto no anel J.

É importante ressaltar que este travamento no traço R30C10 não pode ser explicado pela maior presença do cimento nos traços R20 e R20C10. Apesar do cimento lubrificar, a perda de tempo no espalhamento com o anel J do TR foi igual a perda do P30.

Outro fato que justifica que a Cal só apresentou o efeito dominante de travamento pela presença dos 30%RBC é ao observar que o CAA com PCA obteve otimização da habilidade passante com a Cal. Isso ratifica que o RBC influencia a Cal para ela produzir o travamento, contudo, ela não necessariamente terá sempre esse efeito, dependerá dos materiais e das proporções escolhidas no traço.

Como a mistura R30C10 foi a que apresentou maior teor de ar incorporado, 2,4%, essa relação apresentada entre o RBC e a Cal, provavelmente é decorrente da falta de encaixe das partículas, por incompatibilidade da granulometria nesse CAA. A perda de coesão, por ter mais vazios, não permite que a argamassa carregue os agregados graúdos, ficando no anel J.

Outros dois resultados importantes, a serem observados no anel J, são a diferença entre os espalhamentos finais, em milímetros, das misturas com e sem o anel (NBR 15.823-4, ABNT 2017) e a diferença entre as alturas da mistura no centro e fora do anel (EFNARC). Ambos são apresentados na Figura 5.21.

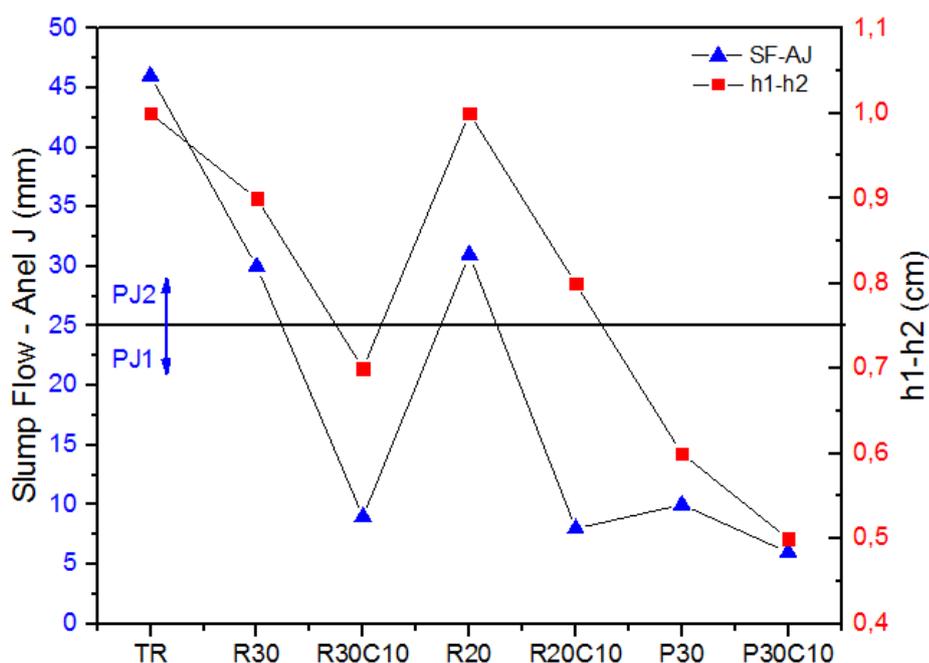


Figura 5.21 – Gráfico Slump Flow - Anel J x Diferença de altura no anel

Considerando a habilidade passante avaliadas pelos critérios de diferenças entre as alturas e os empalhamentos, pôde-se averiguar que há um comportamento semelhante entre os dois parâmetros, havendo coerência entre si na tendência e na proporcionalidade. Essa conduta de equivalência induz a uma validação dos dados, visto que são medições em eixos diferentes.

O gráfico mostra que não há relação direta entre tempo e espalhamento final, ocorrendo até comportamento inverso no caso da Cal. O concreto referência apesar de passar mais rápido pelo anel, atingindo os 500 milímetros, não conseguiu atingir um bom espalhamento com o anel. Essa mistura estava no limite da exsudação, então estava bastante líquida, no entanto houve um travamento elevado no anel dos agregados, que não passaram mesmo após a pasta espalhar, dando uma diferença de 1 centímetro na altura.

Além do TR, os CAA's com apenas RBC também tiveram sua classificação prejudicada (PJ2) pelo menor espalhamento, diferentemente dos CAA's com PCA e CAL, os quais foram classificados como PJ1. Ou seja, essas duas adições promoveram uma maior coesão, o que manteve unida a matriz da mistura e possibilitou um maior espalhamento.

Isto ocorre porque, sendo mais coesa, a mistura tem a capacidade de carregar mais o agregado graúdo, este, pelo peso próprio maior empurra o restante do concreto para espalhar mais e ao mesmo tempo, como está coeso, é levado também. Apesar de muitas vezes mais lento, o espalhamentos com e sem anel tem maior proximidade.

Contudo, é relevante ressaltar que todos os CAA's com adições apresentaram resultados melhores que o concreto referência. Logo, as adições promovem uma melhor coesão da amostra. Essa característica é de suma importância para os concretos autoadensáveis, pois, após a passagem pelas ferragens dos elementos é preciso que a habilidade passante seja mantida para o correto preenchimento das fôrmas.

Avaliando por meio do software de estatística os resultados, Figura 5.22, é possível asseverar o foi previsto, o PCA e a CAL tem efeito positivo na coesão, otimizando a habilidade passante, com a Cal sempre a variável preponderantemente nos efeitos obtidos. O RBC apresentou efeito zero quando acrescido os 10%.

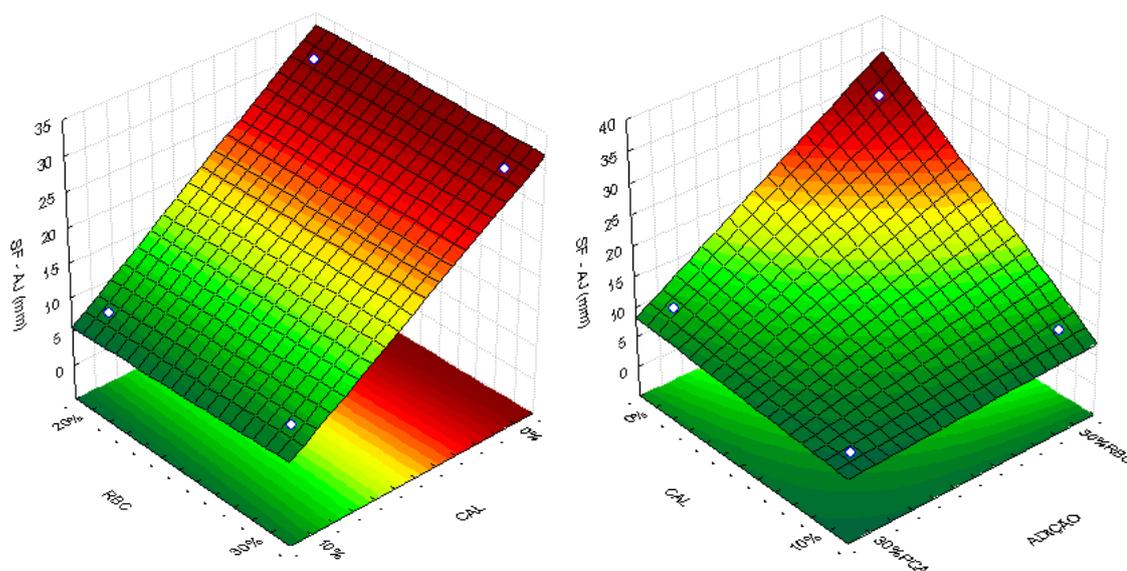


Figura 5.22 – Superfície de Resposta Anel J

O efeito da Cal no primeiro gráfico foi de – 22 milímetros e no segundo -12,5 mm. Como o efeito do RBC foi zero na primeira análise e o PCA obteve um efeito de -11,5 mm, no segundo gráfico, justifica o maior efeito da Cal na primeira situação, pois na segunda a melhora no espalhamento foi realizada em conjunto com o PCA.

Considerando que a Cal tinha provocado um aumento no tempo de passagem, é fundamental atentar para a não correlação entre o tempo necessário para passar pelo anel J com a capacidade de manutenção do espalhamento. Pois, a presença do RBC provocou travamento no anel e no espalhamento final, contudo a Cal otimizou o espalhamento final dos CAA's com o mesmo efeito de elevação do tempo nas barras.

Observou-se também que nas diferenças entre as alturas e os espalhamentos os concretos que obtiveram os piores desempenhos foram o TR e R20. Estes traços são os que possuem maior consumo de cimento, favorecendo a ideia de que o cimento não tem boa capacidade de manter a planicidade com concreto. Entretanto, não houve acumulação significativa de brita dentro do anel, nesses dois traços, Figura 5.23, viabilizando seu uso também.



Figura 5.23 – Espalhamento com o anel J: a) TR b) R20.

Outro ensaio que mensura a planicidade é a caixa L, apresentado na Figura 5.24. Todos os concretos confeccionados apresentaram boa classificação, segundo a NBR 15.823 (ABNT, 2017), os quais foram enquadrados na categoria PL1.

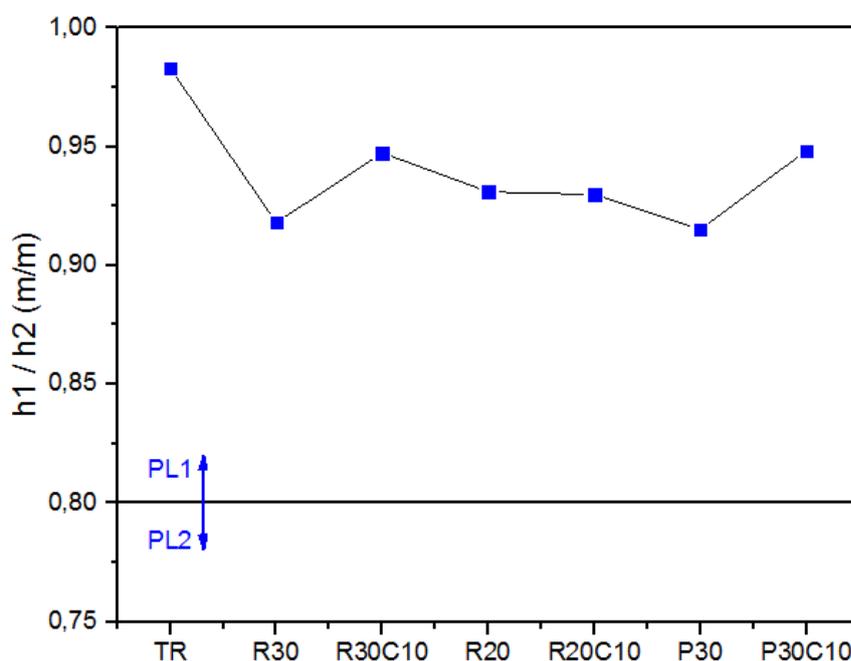


Figura 5.24 – Gráfico Caixa L

O concreto autoadensável referência obteve o melhor resultado apresentando uma planicidade quase total. Contudo, esse resultado mascarou uma exsudação que

ocorreu, mostrada a Figura 5.25. Como a água foi para a superfície do concreto houve um melhor nivelamento, no entanto, esse nivelamento não representou a real situação do concreto.



Figura 5.25 – Exsudação do TR na caixa L

É possível ver também a separação da areia do concreto. Percebeu-se nesse concreto que após muita movimentação, devido à realização dos ensaios, a matriz do concreto se desunificava, contudo nos traços com adição não ocorreu.

Comparando os resultados apresentados na caixa L para os traços com a presença das adições, há uma equivalência dos resultados, uma vez que os pontos tendem a formar uma reta. Esse comportamento se dá devido ao aumento da viscosidade e da plasticidade pelo incremento das adições.

Estas adições possuem partículas com geometria e porosidade que tornam a matriz mais coesa e unida, contudo demandam mais aditivos, o que deixa o concreto com mais liga. O resultado é um concreto com boas habilidades passante e de preenchimento, com boa homogeneidade, porém, com velocidade menor, Figura 5.26.



Figura 5.26 – Execução da Caixa L: RBC30 (esquerda) e PCA30 (direita).

Como todos os traços foram classificados em PL1 e os resultados da razão entre as alturas tendeu a uma função linear constante, não houve a necessidade de avaliação estatística desse ensaio, uma vez que o mesmo mensura a planicidade e esta propriedade foi atingida com êxito por todas as misturas.

5.4 Avaliação do Comportamento dos CAA's no estado endurecido

A avaliação no estado endurecido dos concretos autoadensáveis confeccionados caracterizou as propriedades físicas e os indicativos de durabilidade. Há o entendimento que concretos com altos teores de substituição do cimento podem apresentar redução da resistência e da alcalinidade, facilitando a ação dos agentes agressivos.

Partindo deste pressuposto, os ensaios buscaram validar o uso dos concretos com altos teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e da pozolana da casca de arroz, buscando concretos com resistência suficiente para serem utilizados e com características que inibam ou minorem a ação dos agentes agressivos, otimizando a sua durabilidade.

5.4.1 Avaliação das Propriedades Físicas

5.4.1.1 Resistência à compressão

A análise dos resultados da resistência à compressão axial, apresentados na Figura 5.27 e na Tabela 5.11, revelam um resultado surpreendente, onde cinco traços obtiveram aos 112 dias resultados iguais ou superiores ao traço referência. Apenas o traço R30 não o alcançou, contudo atingiu um resultado 85% do valor do TR na idade citada.

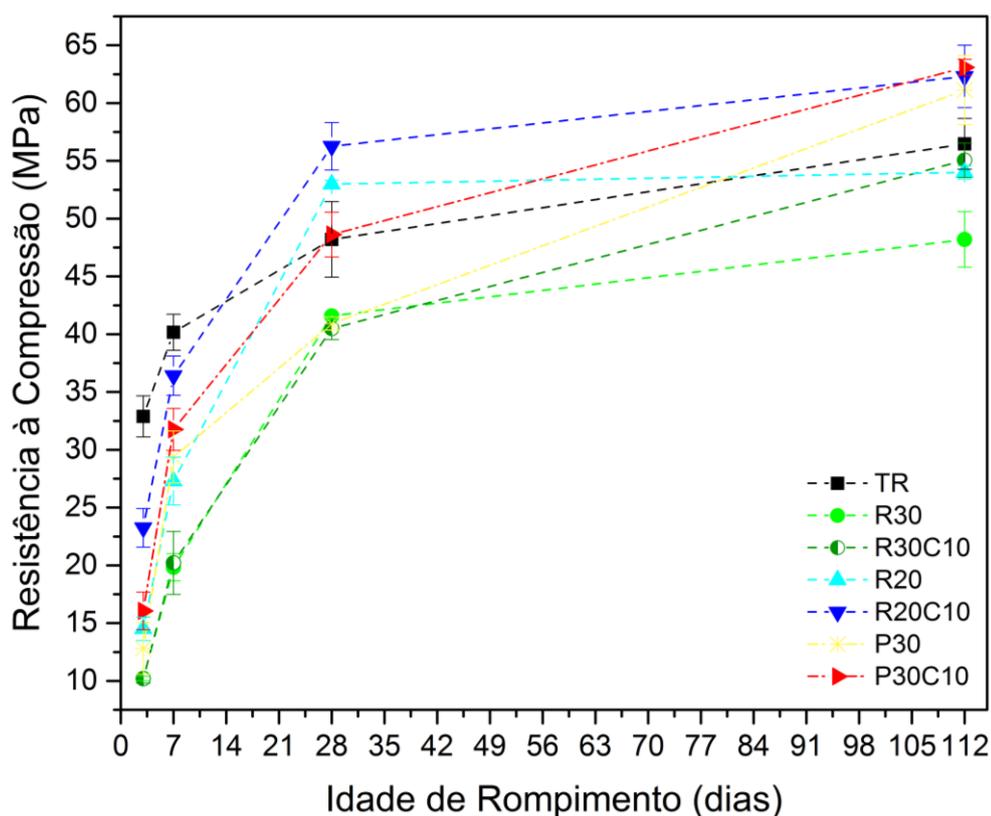


Figura 5.27 – Gráfico resistência à compressão axial

Tabela 5.11 – Resultados de resistência à compressão

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)					
TRAÇOS	3d	7d	28d	112d	%TR (112d)
TR	32,89	40,16	46,36	56,47	100%
R30	10,21	19,83	41,57	48,20	85%
R30C10	10,19	20,21	40,49	55,05	98%
R20	14,51	27,29	52,99	54,01	97%
R20C10	23,25	36,41	56,26	62,30	110%
P30	12,80	29,37	40,91	61,12	108%
P30C10	16,06	31,76	48,62	63,09	112%

Contudo é importante ressaltar que parte dessa resistência elevada é proveniente da presença do metacaulim, o qual está presente em percentual igual em todos os traços com adições. A razão para esta melhoria significativa na resistência está associada ao efeito do preenchimento dos vazios e reação pozolânica (GILL & SIDDIQUE, 2017).

Até os 7 dias o traço referência apresentou resistência superior aos outros traços. Isso ocorre porque as adições necessitam da formação do hidróxido de cálcio, proveniente da reação do cimento, para dar início à reação pozolânica, através da formação de silicatos e aluminatos de cálcio secundários presentes nas adições minerais.

Le e Ludwig (2016) apresentam uma situação semelhante com o PCA e cinza volante e citam que essa baixa resistência em idades precoces são devido à demora de reação da sílica amorfa com o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do cimento.

Tabela 5.12 – Percentual de crescimento da resistência por idade

CRESCIMENTO DA RESISTÊNCIA				
TRAÇOS	De 3 para 7 dias	De 7 para 28 dias	De 28 para 112 dias	De 3 para 112 dias
TR	22%	20%	17%	72%
R30	94%	110%	16%	372%
R30C10	98%	100%	36%	440%
R20	88%	94%	2%	272%
R20C10	56%	56%	11%	168%
P30	129%	39%	49%	377%
P30C10	98%	53%	30%	293%

Esse comportamento é ratificado na tabela 5.12 quando se observa o crescimento de 3 dias para 112 dias. Os concretos referência e com 20% de RBC, são os que apresentaram menor crescimento nessa faixa de idade, sendo estes os que tem maior teor de cimento.

É possível observar também na tabela 5.12 que os CAA's com PCA (P30 e P30C10) tem seu maior crescimento observado entre 3 e 7 dias. Gill e Siddique (2017) obtiveram CAA's com PCA os quais obtiveram resistência de 2,8% superior ao referência aos 7 dias. Isso ocorre devido ao PCA ter uma maior finura em relação ao RBC.

O RBC mostrou-se mais tardio no ganho de resistência, tendo seu maior pico de crescimento entre 7 e 28 dias. Gar *et al* (2017) citam que o ganho de resistência está relacionado ao teor de substituição, com teor ideal em 15%, e refinamento do poro pela reação pozolânica.

Como o crescimento dos CAA's com RBC foram mais tardios quando comparados aos CAA's com PCA pode se inferir que, apesar da resistência ser bastante influenciada pela presença do metacaulim, o RBC possui pozolanicidade, mesmo que em menor grau e mais tardia. Isso se deve ao metacaulim ter maior reatividade pozolânica que o PCA, sendo comprovado isso na pesquisa de Fonseca (2016), onde comparou-se concretos com metacaulim e com PCA.

Kannan e Ganesan (2014) apresentam em resultados com CAA uma melhora de 20% no metacaulim e de 15% nas cinzas, comprovando o efeito do metacaulim no incremento de resistência.

No entanto, analisando o crescimento após 28 dias dos CAA's com RBC há uma redução muito grande da evolução da resistência. Pode-se justificar essa desaceleração pelo pouco tempo de moagem que diminui a área superficial e, conseqüentemente, a reatividade.

Outro dado que justifica é a menor quantidade de sílica e alumina apresentados no FRX, 63,12% no RBC, 84,25% no metacaulim e 94,43% no PCA. Apesar do PCA possuir maior teor de compostos reativos, a finura do metacaulim propulsiona a velocidade da reação pozolânica, além de favorecer a hidratação do cimento através de efeito físico (FERREIRA, 2016; MADANDOUST e MOUSAVI, 2012).

Aos 28 dias todos os CAA's atingiram resistência acima de 40 MPa. Sendo a resistência, segundo Metha & Monteiro (2014), uma propriedade que indiretamente exprime a qualidade do concreto, pode-se inferir que a substituição do cimento pelas adições de RBC e PCA mostrou-se viável nos concretos autoadensáveis da presente pesquisa, podendo até otimizar a matriz da mistura.

Para analisar a influência do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e da pozolana da casca do arroz comparou-se o desempenho dos CAA's R30 e P30, onde pode-se observar que ao longo das idades o concreto com PCA apresentou resistência superior, exceto aos 28 dias onde, devido ao desvio padrão, ambos os CAA's apresentaram resultados iguais.

O PCA tem uma área superficial maior, devido a sua finura, e um teor elevado de composto reativos, quando comparado com o RBC. Com isso o PCA tem um melhor desempenho. Esse resultado está em conformidade com a pesquisa de

Medeiros (2016), a qual o CAA com 30% de PCA obteve 66 MPa, enquanto que o CAA com 30% de RBC resultou em 60 MPa.

Thomas (2018) ratifica esse resultado do PCA, onde aos 98 dias o concreto com 20% de PCA atingiu 98% da resistência, quando no presente trabalho este percentual foi de 112%. Kannan e Ganesan (2014) também atingiram percentuais superiores ao TR quando compatibilizados o PCA e metacaulim, chegando a 30% de aumento.

O desempenho do RBC no trabalho de Medeiros (2016) apresentou-se melhor quando comparado aos da presente pesquisa, mesmo a fonte do material ter sido a mesma. Isso ocorreu devido ao seu tempo de moagem do RBC ter sido em maior, possibilitando uma maior finura e, também, pelo fator água/ cimento do traço ser 0,4, menor que os 0,5 da atual pesquisa.

A presença da cal influenciou positivamente no desempenho da resistência, onde todos os CAA's com a adição de cal obtiveram resultados superiores aos respectivos concretos sem a cal. Apenas em duas idades do traço R30 os resultados foram estatisticamente iguais. Pantawee et al (2017) confeccionaram concretos com e sem cal e observou também o aumento de resistência nas amostras com a cal.

Estes resultados são ratificados na análise estatística, apresentada na Figura 5.28. Nessa análise verificou-se a influência da adição de cal e do acréscimo de RBC de 20% para 30%. A inserção Cal apresentou um efeito positivo de 7,23 MPa, com significância de 97,9%.

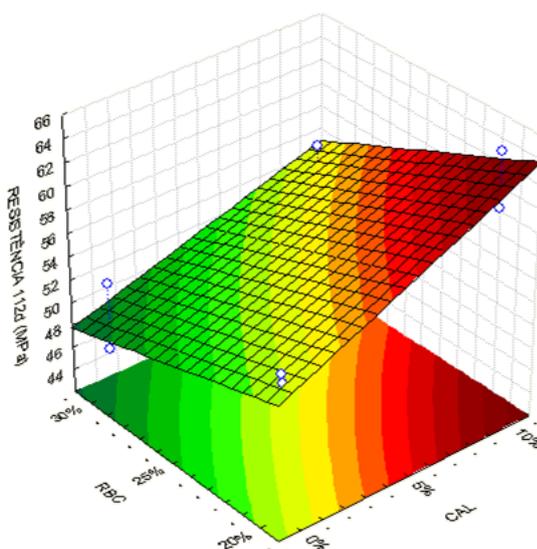


Figura 5.28 – Superfície de resposta da Resistência aos 112 dias

A cal otimiza a resistência pela melhor coesão da matriz devido aos seus finos preencherem melhor os poros e pela presença de mais hidróxido de cálcio (composto majoritário da cal) que favorece a ocorrência da reação pozolânica com os compostos das adições. Anjos et al (2015) obtiveram resultados semelhantes com a cal em concretos autoadensáveis, onde houve um aumento 38% da resistência.

A Figura 4.28 também apresenta a influência negativa da adição de RBC acima de 20%, com um efeito de -6,18 MPa e significância de 96,6%. Logo, esse é o máximo teor possível de substituição do cimento para apresentar resultados compatíveis com o referência, em conjunto com o metacaulim. Anjos (2009) observou a resistência de pastas com RBC de zero a 40% em intervalos de 10% e verificou que até 20% a resistência era otimizada, após, havia queda, assim como no presente trabalho.

A figura 5.29 mostra a relação de eficiência do uso do cimento em cada mistura parametrizada pela razão entre a resistência à compressão (MPa) e o consumo de cimento (Kg/m^3) considerando um volume de 1 m^3 . Todos os CAA's com adições apresentaram eficiência maior que o referência, logo, não houve redução proporcional da resistência quando diminuído o cimento.

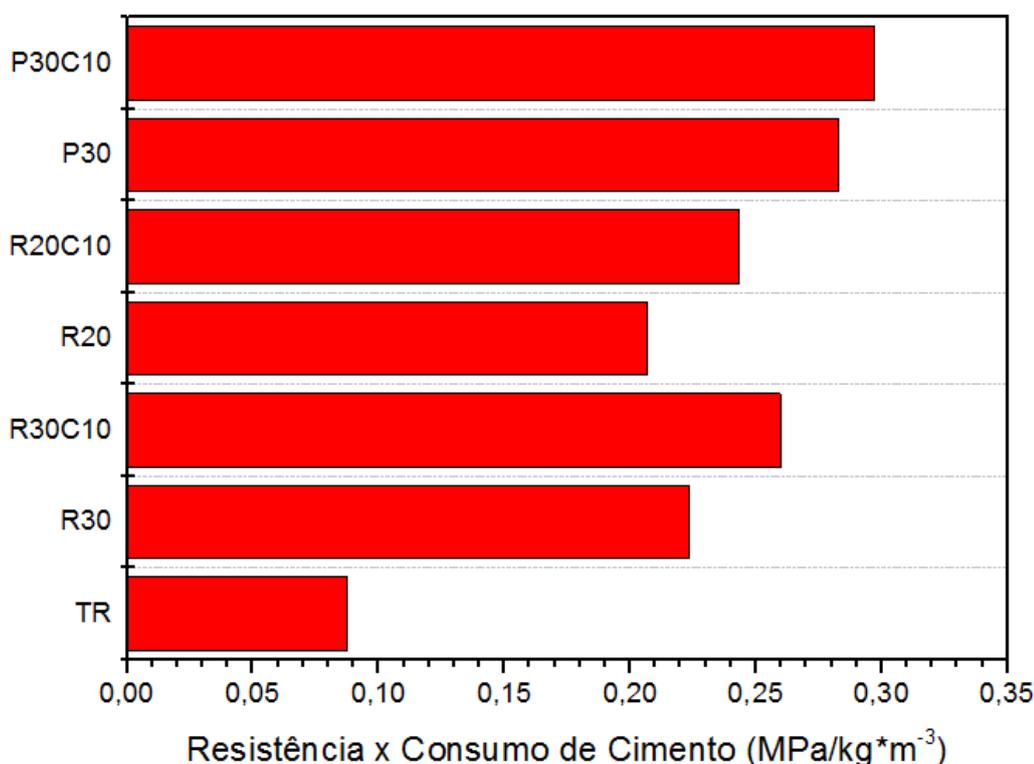


Figura 5.29 – Gráfico resistência x consumo de cimento

Dessa forma é possível, mais uma vez, confirmar que as adições trabalharam positivamente para o melhor desempenho da resistência dos CAA's. Os concretos de Fonseca (2016) apresentaram esse índice entre 0,13 e 0,27, sendo comprovada a eficiência dos CAA's. No presente estudo, os índices variaram de 0,20 a 0,29, mostrando eficiência equivalente e comprovando o bom desempenho dos concretos autoadensáveis confeccionados.

Observa-se também a melhor otimização dos CAAs com a cal hidratada, onde nas misturas R30C10 e R20C10 houve um salto de 17% enquanto que o P30C10 apresentou um acréscimo de 5%. Isso aduz a uma melhor sinergia entre a Cal e o RBC quando comparada a mesma interação com o PCA.

O desempenho dos CAA's R20 e R20C10 são notáveis, mediante Figura 5.29, pois mesmo com um maior consumo de cimento (em relação aos outros concretos com adições), o que em tese provocaria uma redução deste índice, a resistência foi suficientemente elevada para manter o bom desempenho frente ao CAA referência, ratificando novamente que a taxa de 20% de RBC mostra-se a ideal para substituição do cimento.

5.4.1.2 Velocidade do Pulso ultrassônico

A avaliação do pulso ultrassônico é complementar ao ensaio de resistência mecânica. Ela indica o desenvolvimento e as possíveis falhas do processo de hidratação dos compostos da matriz. Os resultados desse ensaio são relacionados com a porosidade do concreto, e conseqüentemente, com a qualidade e as propriedades mecânicas.

À medida que a hidratação ocorre, sabendo-se que ela é expansiva, os vazios contidos no concreto são reduzidos. Com isso, há uma continuidade maior da estrutura interna, o que faz que as ondas ultrassônicas se propaguem mais rapidamente. A Figura 5.30 ilustra a velocidade do pulso ultrassônico nos diferentes CAA's utilizados na pesquisa, em relação as idades estudadas no período da pesquisa.

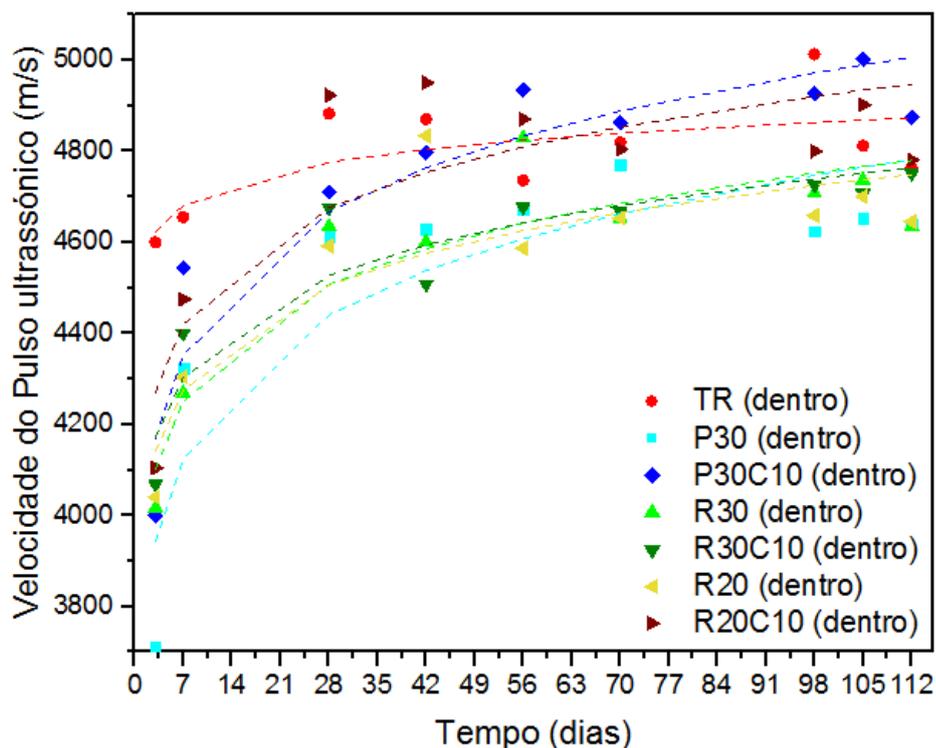


Figura 5.30 – Velocidade do pulso ultrassônico ao longo das idades

Verificou-se uma heterogeneidade dos resultados, onde a curva de cada CAA possuía sinuosidades, não conferindo linearidade ao gráfico. É provável que essas ondulações nas curvas sejam decorrentes de fatores externos, como umidade e temperatura interna no laboratório e os três diferentes ambientes à que as amostras foram submetidas nessa pesquisa. Dessa forma, fez-se necessário a inserção de uma curva de tendência por meio de uma função de 2º grau.

Por meio das curvas de tendência é possível afirmar que a porosidade inicial do CAA referência é bastante superior aos CAA's com a presença das adições minerais. Isso já era previsto, pois a hidratação das adições só ocorre após a hidratação do cimento. Isso ocorreu também no estudo de Sandhu e Siddique (2017) com a presença de PCA de 10 à 100%, aos 7 e 28 dias.

Contudo aos 42 dias há uma estabilização da velocidade do pulso no TR, enquanto que nos CAA's com as adições o processo de redução da porosidade continua à ocorrer. Fato este, comprova que a ocorrência das reações pozolânicas por haver uma elevação na inclinação da curva. Nessa idade, 42 dias, o processo de hidratação do cimento já tem ocorrido em teores bastante elevados, Mehta e Monteiro

(2014) citam que aos 28 dias 75% já foi desenvolvido, enquanto que as reações pozolânicas provenientes das adições ainda estão acontecendo.

É possível observar também que dois CAA's com adições se destacam dos demais, o R20C10 e o P30C10. Correlacionado as curvas de tendência desse dois traços com o gráfico de resistência, Figura 5.27, pode-se afirmar que há uma comprovação da resistência elevada desses dois CAA's em virtude da menor porosidade.

Percebe-se também que há uma coerência das curvas dos dois gráficos se comparado em cada CAA, o que comprova que o comportamento da curva da função dos pontos é válida. Ao realizar a análise estatística aos 7, 42 e 112 dias foram obtidos os efeitos descritos na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Efeito da resistência à compressão

EFEITOS ESTATÍSTICOS (m/s)			
Idade	Acréscimo de CAL	Acréscimo de RBC	Subst. RBC p/ PCA
7	119,025	-70,800	-38,950
42	105,45	-74,600	60,600
112	96,825	-76,65	122,2

Analisando a tabela, a cal tem o efeito determinante na velocidade do pulso e, indiretamente, na porosidade dos concretos. Isso decorre de sua finura e área superficial elevada.

Já o RBC, tem efeito negativo quando acrescido os 10% do traço R20 para o R30. Mais uma vez é notável que a quantidade substituição limite do RBC é de 20%, sendo elevado esse limite o RBC torna-se prejudicial ao concreto.

O efeito do PCA é positivo em relação ao RBC, exceto aos 7 dias. Contudo a presença do PCA em idades elevadas é determinante para ao aumento do pulso dos concretos estudados, isso induz uma reatividade pozolânica maior se comparada ao RBC.

No entanto, é válido lembrar que este RBC foi utilizado com um baixo tempo de moagem, visando a redução do gasto energético na sua produção. Isso reflete em

redução de custos e maior indicativo de material sustentável. Porém, reflete também em uma partícula com menor área superficial, o que prejudica o empacotamento e a reatividade.

Os CAA's R20C10 e P30C10 tiveram desempenhos equivalentes, ultrapassando o concreto referência nas últimas idades, em decorrência do avanço das reações pozolânicas e também da presença de cal. Sandhu e Siddique (2017) relatam que aos 91 dias os CAA's com até 20% de PCA obtiveram velocidade de pulso próximos ao TR, sendo o desempenho equivalente ao presente estudo, e corroborando para a proposição que a cal otimiza o processo.

Ademais, apesar de possuir efeito negativo (com 30%) quando comparado ao PCA, o RBC mostrou-se muito eficiente com no teor limite de 20%, garantindo a sua eficácia e utilização como material sustentável frente ao cimento.

5.4.2 Indicativos de Durabilidade

5.4.2.1 Profundidade de Carbonatação acelerada

Este ensaio foi um dos principais objetivos da pesquisa, onde testou-se um ambiente agressivo ao concreto buscando entender o uso das adições quanto à durabilidade do concreto. O resultado dos ensaios está apresentado a Figura 5.31.

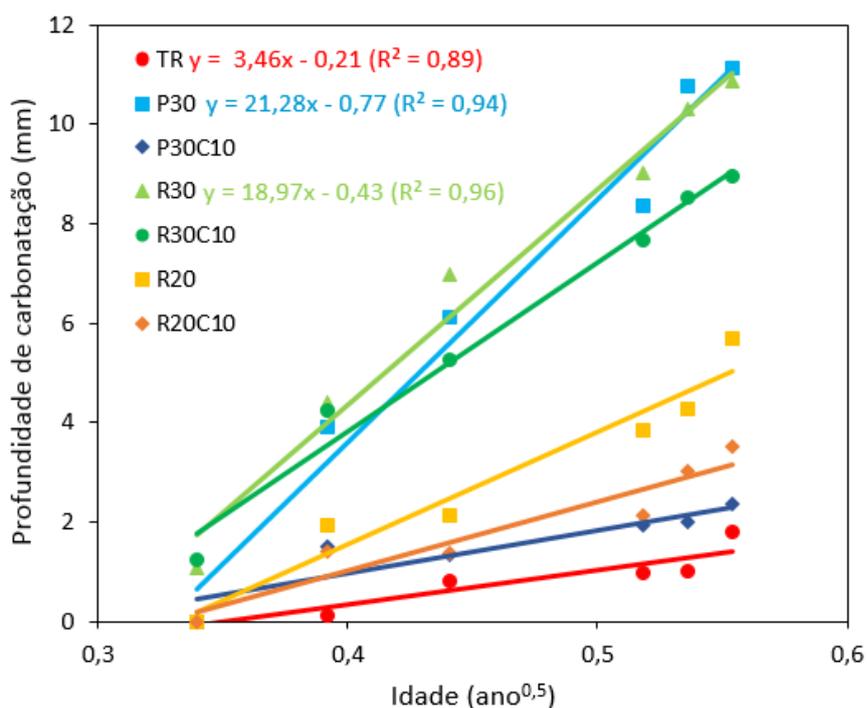


Figura 5.31 – Profundidade de carbonatação ao longo de 6 idades dentro da câmara

Os resultados obtidos no ensaio de carbonatação revelam que o TR foi o que apresentou menor profundidade de carbonatação e que as adições minerais tendem a sofrer, em maior profundidade, com a frente de gás carbônico. Isso ocorre pela menor quantidade de hidróxido de cálcio, nos CAA's com adições, devido ao menor percentual e cimento e a reatividade pozolânica das adições.

Samimi *et al* (2018) afirmam que quanto maior o teor de adições mais profunda será a carbonatação. Isso, devido ao CO₂ somente difundir da posição "1" para a "2" (mais profunda) quando todos os compostos da posição "1" forem consumidos ou reagirem com o gás difuso (LI & LI, 2018).

Com menos CH, o pH da matriz é reduzido, facilitando a carbonatação dos compostos, por tornar o ambiente mais ácido. Thomas (2018) cita que esse aumento da frente de carbonatação também pode ser atribuído ao aumento de porosidade e a menor concentração de cimento. A maior penetração de CO₂ indica, teoricamente, uma maior tendência de carbonatação, todavia, é necessário observar os resultados da resistividade elétrica, pois se não houver a passagem de corrente elétrica pela matriz, a probabilidade da formação da pilha de corrosão é irrelevante.

Dessa forma, apesar da frente de carbonatação ter apresentado a penetração do CO₂ maiores que o TR, nas misturas com as adições minerais, existem duas justificativas que possibilitam mesmo assim o uso desses concretos. A primeira é a resistividade elétrica elevada e a segunda é a espessura do cobrimento previsto na NBR 6118 (ABNT, 2011).

Esta norma estabelece que em ambientes urbanos (ambientes expostos à presença de CO₂) o cobrimento mínimo do concreto seja de 25 mm para lajes e 30 mm para as demais estruturas. Como as profundidades de carbonatação obtidas no presente estudo, mesmo em processo de carbonatação acelerada, foram todas inferiores à 12 mm, logo, têm-se a indicação que a estrutura da matriz desses concretos não permite que o CO₂ consiga atingir a armadura, inibindo a corrosão, no período relativo aos 70 dias em concentração real.

Para saber esse período é necessário calcular o coeficiente de difusão do CO₂ (K_{dc}). De acordo com Mohammed *et al* (2014) o K_{dc} pode ser calculado, através da lei de Fick pelo coeficiente linear da função entre a profundidade de carbonatação e o tempo em anos elevado a 0,5.

Sisomphon e Franke (2007) citam que o fator de conversão da profundidade da carbonatação acelerada para a real (atmosférica) é obtida pela raiz da razão entre as concentrações na câmara e real. Dessa forma o coeficiente da carbonatação (K_{ca}) é obtido pela multiplicação entre o K_{dc} e o esse fator de conversão, equação 5.1.

$$K_{ca} = K_{dc} \times \sqrt{\frac{\text{Teor máximo na câmara de carbonatação}}{\text{Concentração atmosférica}}} \quad (5.1)$$

Considerando a concentração máxima na câmara de carbonatação de 4,5% de CO_2 e a concentração atmosférica de 400 ppm (MOHAMMED *et al*, 2014) que é equivalente a 0,04% de CO_2 , foi calculado quantos anos equivalem aos 70 dias na câmara, apresentado na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Coeficiente de carbonatação acelerada

TRAÇO	K_{dc}	K_{ca} (mm/ano)	Equivalência 70 dias na câmara (anos)
TR	3,46	0,33	5,5
P30	21,28	2,01	5,5
R30	18,97	1,79	6,0

Pôde-se observar que o K_{dc} do P30, surpreendentemente foi maior, indicando que apesar da menor profundidade da região carbonatada, inicialmente, há uma tendencia de evolução maior quando comparado ao RBC. A exposição em 70 dias dentro da câmara equivaliu em média a 5,5 anos na atmosfera comum. Dessa forma, para atingir os 25 mm estabelecidos pela NBR 6118 (2014) são necessários 14 anos em média nos CAA's com adições e 77 anos para o CAA referência.

Apesar de nos concretos autoadensáveis com as adições minerais o coeficiente de carbonatação ter sido bem mais elevado, Gastaldini *et al* (2007) apresentaram em sua pesquisa diversos concretos com PCA e mostraram que o coeficiente também depende do fator água/ cimento, tendo até concretos com PCA que obtiveram o K_{ca} menor do que o cimento, quando esse fator foi maior que 0,5.

O efeito de cada adição foi mensurado por meio do delineamento estatístico, exposto na Tabela 5.15. Constatou-se que o RBC tem um efeito mais negativo na frente de carbonatação quando comparado ao PCA. Mesmo tendo uma porosidade

total menor (apresentado adiante na porosimetria), o diâmetro dos poros do RBC são maiores facilitando a entrada do CO₂.

Esse maior diâmetro facilita a interconexão entres os poros e, segundo Mohammed *et al* (2014) com poros ligados a carbonatação tem um maior impacto por facilitar a difusão. Corroborando com a proposição, Li e Li (2018) afirmam que a carbonatação está diretamente relacionada a permeabilidade, porosidade e diâmetro do poro.

O PCA também foi avaliado no trabalho de Gastaldini *et al* (2007) onde seu uso provocou também um aumento na profundidade de carbonatação em relação ao concreto de referência. Cita também que 20% de PCA teve uma profundidade de 7,5mm, quando no presente trabalho, 30% de PCA apresentou 11mm.

Tabela 5.15 – Efeitos estatísticos da carbonatação em 5 idades

EFEITOS ESTATÍSTICOS (mm)			
Idade	Acréscimo de CAL	Acréscimo de RBC	Subst. PCA p/ RBC
14 dias	-0,81	2,65	1,61
28 dias	-2,24	4,35	2,37
56 dias	-2,71	5,35	3,19
63 dias	-3,38	5,77	3,03
70 dias	-3,7	5,30	3,15

Como a reatividade do PCA é maior do que o RBC, teoricamente, haveria um consumo maior do hidróxido de cálcio e conseqüentemente uma maior queda do pH, refletindo em uma maior profundidade de carbonatação. Contudo a frente de carbonatação foi maior no RBC, o que indica que o diâmetro do poro tem efeito preponderante na carbonatação se comparado a queda do pH e a própria porosidade total.

Essa proposição é ratificada quando observado o efeito do acréscimo de 10% de RBC. Esta condição provocou as maiores elevações de profundidade de carbonatação. Ao comparar o perfil dos poros dos CAA´s R20 e R30, nas curvas da porosimetria, a mistura com mais RBC tem picos nos diâmetros mais elevados, corroborando para a afirmativa acima.

Thomas (2018) apresenta concretos com 20% de PCA e obtem profundidades de carbonatação menores quando comparadas a sua referência. Como a porosimetria apresentou a curva do PCA com poros menores, isso é mais uma afirmação de que o diâmetro do poro é quem está influenciando. As referidas curvas da porosimetria serão apresentadas adiante no presente trabalho, entretanto, como a carbonatação é o foco principal foi relevante trazer alguns resultados para este item no intuito de enriquecer a discussão.

Contanto, é importante ressaltar que esse comportamento só é valido para baixos teores de cimento. Pois, apesar do TR ter uma densidade elevada de poros de diametro maiores, quando comparado aos demais CAA's, a grande quantidade de hidróxido de cálcio faz com que o efeito químico passe a ser preponderante em relação ao efeito físico.

Samimi *et al* (2018) explanam que a agressividade do ataque de CO₂ depende de diferentes variáveis, sendo uma variável a quantidade de reação com o cálcio. Ou seja, o teor de hidróxido de cálcio eleva a quantidade de cálcio e o gás difunde menos pelo fato do carbono estacionar para reagir com todo o cálcio da posição.

Esse efeito do hidróxido de cálcio também é observado nos CAA's com a adição de cal. A sua presença provoca também um efeito significativo na redução da profundidade de carbonatação do concreto, em decorrência da elevação do teor de hidróxido de cálcio.

Quando há um teor elevado de hidróxido de cálcio o efeito químico é preponderante na carbonatação, contudo, quando esse teor é reduzido o efeito físico, do diâmetro dos poros, passa a ser mais relevante para o aumento da profundidade de carbonatação. Mohammed *et al* (2014) citam que, no seu estudo, quando houve um maior percentual de macroporos o fator físico prevaleceu sobre o efeito químico.

Li e Li (2018) apresentam nos seu estudo concretos com adição de escória de alto forno e cinza volante, obtendo carbonatações de 10 a 50 mm. Isso mostra que independente de adição a redução do teor de cimento é preponderante para o aumento da frente de carbonatação.

A concentração de agregado e a presença de vazios abertos também influencia para a maior região de carbonatação, sendo este um cuidado a ser observado no

preparo e execução do concreto. A Figura 5.32 mostra a influencia de um vazio aberto, onde a amostra apresentou uma profundidade mais elevada que o restante da face.



Figura 5.32 – Influência visual do poro na carbonatação

Outro dado que deve ser avaliado é a influência da carbonatação na resistência à compressão dos concretos autoadensáveis, exposto na Tabela 5.16 e Figura 5.33. Aos 112 dias a resistência mensurada nos corpos de prova expostos à carbonatação, com exceção do TR, foi maior se comparada a resistência das amostras que não entraram na câmara.

Tabela 5.16 – Resistência à compressão aos 112 dias dentro e fora

TRAÇOS	RESISTENCIA EM 112d (MPa)		Desvio padrão
	Expostos à carbonatação	Não expostos à carbonatação	
TR	56,47	58,43	0,9
R30	48,20	45,53	2,1
R30C10	55,05	50,30	1,3
R20	54,01	51,31	1,1
R20C10	62,30	61,33	1,2
P30	61,12	59,51	0,9
P30C10	63,09	60,69	2,9

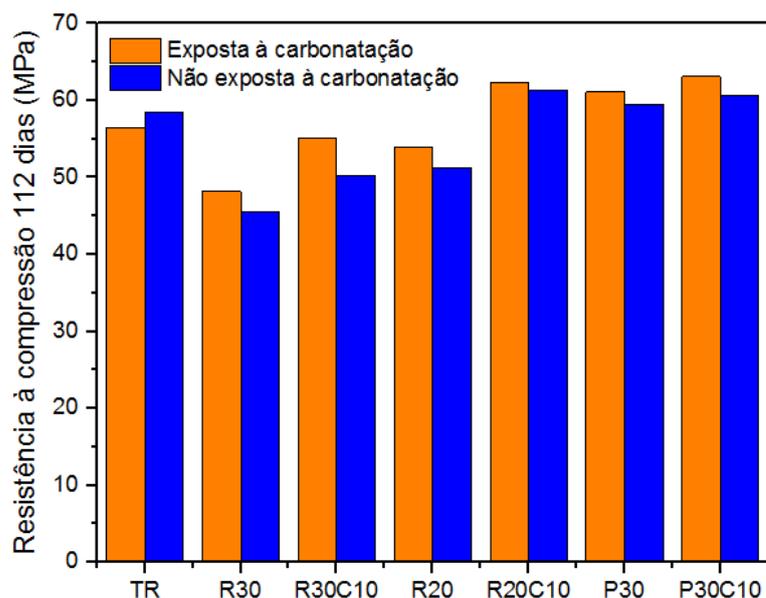


Figura 5.33 – Gráfico resistência à compressão aos 112 dias dentro e fora

Isso ocorre porque os CAA's com as adições minerais sofreram maior ataque na presença do gás carbônico. Como a reação de transformação dos compostos hidratados do cimento em produtos carbonatados é expansiva, o concreto na condição não armada tem uma otimização com o processo de carbonatação, visto que essa expansão preenche os poros ao redor, tornando a matriz do concreto mais coesa.

Essa afirmativa está condizente com os resultados do trabalho de Ahmad *et al* (2017) os quais explorou os efeitos positivos da exposição à carbonatação onde constatou-se que essa exposição oferece melhora nas propriedades físico-mecânicas sem necessariamente causar corrosão da armadura, pela redução superficial da porosidade, como mostra a Figura 5.34.

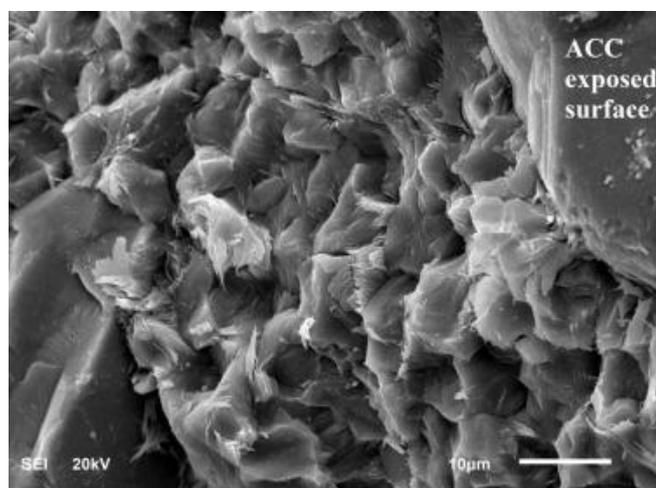


Figura 5.34 – superfície de concreto carbonatada. fonte: Ahmad *et al* (2017)

Esse acréscimo ocorreu em média de 4,8% de ganho para os CAA's com as adições minerais. Sendo o desvio padrão médio na idade de 112 dias 1,5% há indicação estatística de que houve a real influência da carbonatação. Entretanto, no CAA referência houve uma perda de 3,4% de resistência.

É provável que essa redução seja decorrente da carbonatação, nesse traço, que ainda esteja na fase de acidificação dissolvendo os cristais que contém Cálcio, tendo como consequência a menor resistência. Samimi *et al* (2018) explanam que inicialmente a dissolução da Portlandita e a precipitação do CaCO_3 conduzem a uma queda da porosidade. Contudo, ao longo do tempo a permeabilidade do gás diminui (Samimi et al, 2018), induzindo a redução dos poros ao longo do processo.

Foram aferidas também as medidas dos pulsos ultrassônicos nos diferentes ambientes (expostos ou não à carbonatação acelerada) a fim de verificar se a alteração na porosidade decorrente da formação expansiva dos produtos carbonáticos era percebida pelo pulso ultrassônico, mediante Figura 5.35.

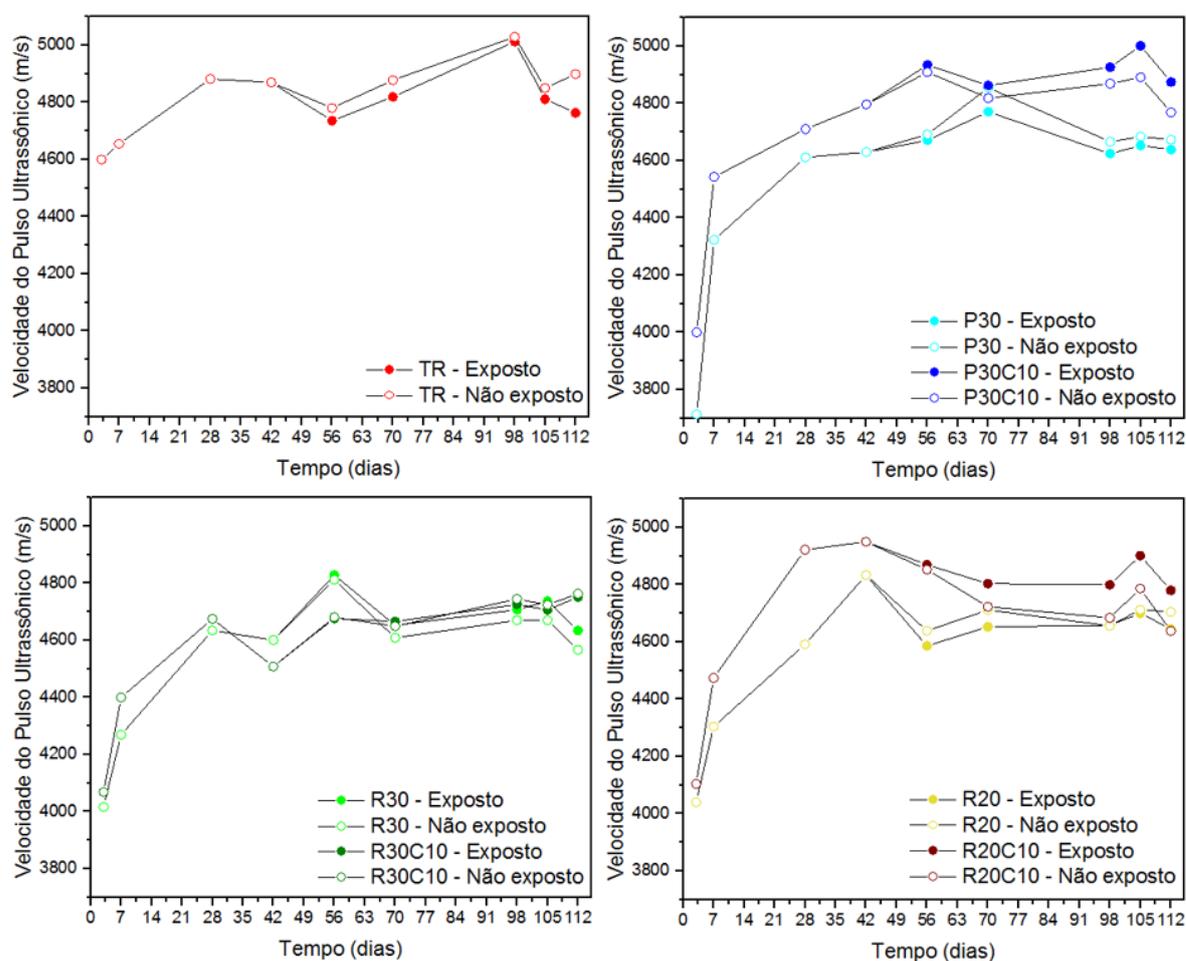


Figura 5.35 – Velocidade do pulso ultrassônico por série

Observando a Figura 5.35, nota-se que a aferição da velocidade de pulso não conseguiu constatar a carbonatação ocorrida, visto que foi comprovada a ocorrência desta nas medidas de profundidade de carbonatação.

Uma das possibilidades para explicar a ocorrência desse fato está relacionada ao grau de grandeza que ocorrem as reação de carbonatação, onde pode não ser possível obter diferença significativa na porosidade.

Sendo assim, constatou-se que a presença da frente de carbonatação não influenciou a velocidade do pulso ultrassônico nos concretos estudados, contudo há necessidade de aprofundar a análise com a realização de ensaios.

Outra forma de avaliar a influencia da carbonatação nos CAA´s confeccionados é comparando os resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio com amostras antes da carbonatação (42 dias) e carbonatadas (112 dias). Nesse intervalo as amostras de argamassa foram inseridas na câmara, sendo o tempo suficiente para carbonata-las totalmente. Os percentuais referentes as porosidades podem ser observadas na Figura 5.36.

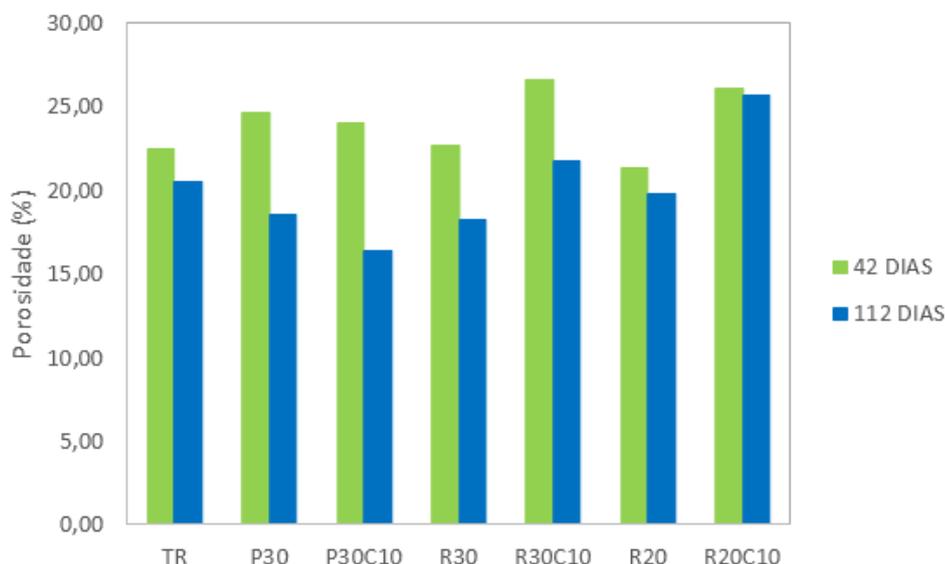


Figura 5.36 – Percentual porosidade pela intrusão de mercúrio aos 42 e 112 dias

Avaliou-se que a frente de carbonatação tem efeito positivo na redução da porosidade das misturas, em consonância com Xuan *et al* (2017) os quais concluíram que a carbonatação reduz a absorção de água pela redução da porosidade.

No entanto, essa redução estava condicionada à, principalmente, o teor de cimento. Os traços TR, R20 e R20C10 foram os que apresentaram menores reduções

da porosidade. Isso ocorre porque o cimento é responsável pela reserva alcalina, reduzindo a carbonatação e sua influencia.

Os CAA's com adições foram mais suscetíveis a carbonatação e não houve uma diferença significativa entre os traços com e sem a cal. Percebe-se, no entanto, que a redução nos CAA's com RBC foi menor, indicando que pela maior reatividade do PCA a cal é consumida pelo mesmo e ficando uma menor reserva de cal para inibir a frente de carbonatação.

A comprovação dessas proposições é apresentada na análise dos efeitos estatísticos da queda de porosidade ao longo da carbonatação, Tabela 5.17, quando comparados o PCA *versus* RBC, ambos com 30%, e entre os CAA's com RBC, acrescido ao seu teor 10%.

Tabela 5.17 – efeito da porosimetria aos 42 dias

EFEITOS ESTATÍSTICOS (%)		
Acréscimo de CAL	Acréscimo de RBC	Subst. PCA p/ RBC
0,2	3,65	-2,19

A substituição do PCA por RBC produz um efeito negativo de -2,19%, ou seja, a carbonatação nos CAA's com PCA influenciam para aumentar a queda de porosidade ao longo do período de carbonatação. Isso ocorre para o teor de 30% das adições. Como supracitado, é provável que essa queda maior na presença do PCA seja devido a sua maior reatividade pozolânica.

O aumento do teor de RBC apresenta uma queda da porosidade, em 3,65%. Logo, a presença de cimento no traço R20 promove a carbonatação nos poros maiores pela presença de CH. Nesses poros maiores, os resultados indicam que a reação de carbonatação não tem grande interferencia na porosidade, diferente do que ocorre nos traços com mais adição, por não ter CH e o carbono ataca o C-S-H. Li e Li (2018) afirmam que com um menor relação cálcio/ sílica o C-S-H é consumido mais rapidamente pela carbonatação.

A cal em média produz um efeito de 0,2% para redução da porosidade. Isso Mostra que a presença das adições tem mais influência do que a cal. As superfícies de resposta destes efeitos são apresentadas na Figura 5.37.

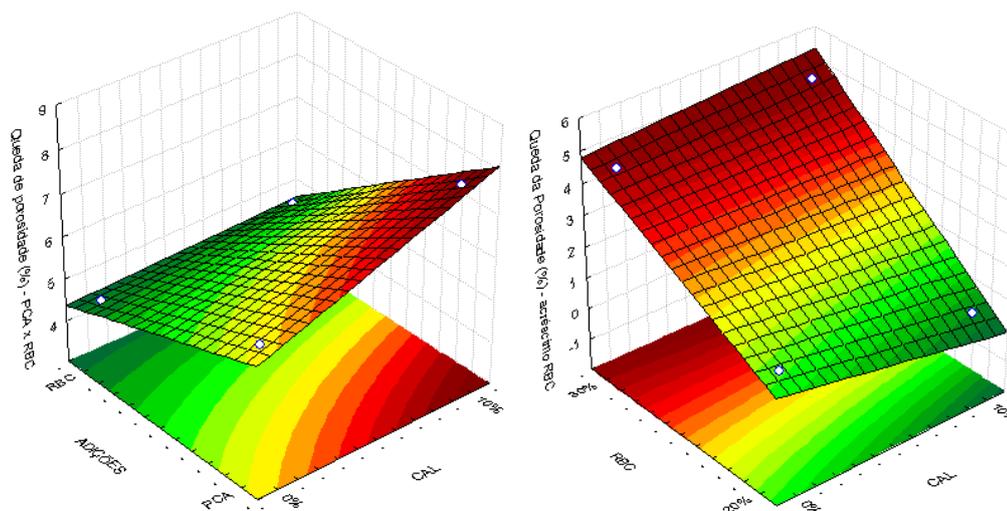


Figura 5.37 – Superfície de resposta da queda de porosidade entre 42 e 112 dias

5.4.2.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosimetria é um ensaio de grande importancia para aferição da durabilidade, pois, permitiu observar a rede de poros presente nas argamassas confeccionadas em uma escala de até $0,001\mu\text{m}$. Nessa escala é possível investigar o comportamento conjunto das adições na coesão da matriz cimentícia. A Figura 5.38 apresenta o resultado da intrusão de mercúrio nos 4 traços sem a cal, aos 42 dias.

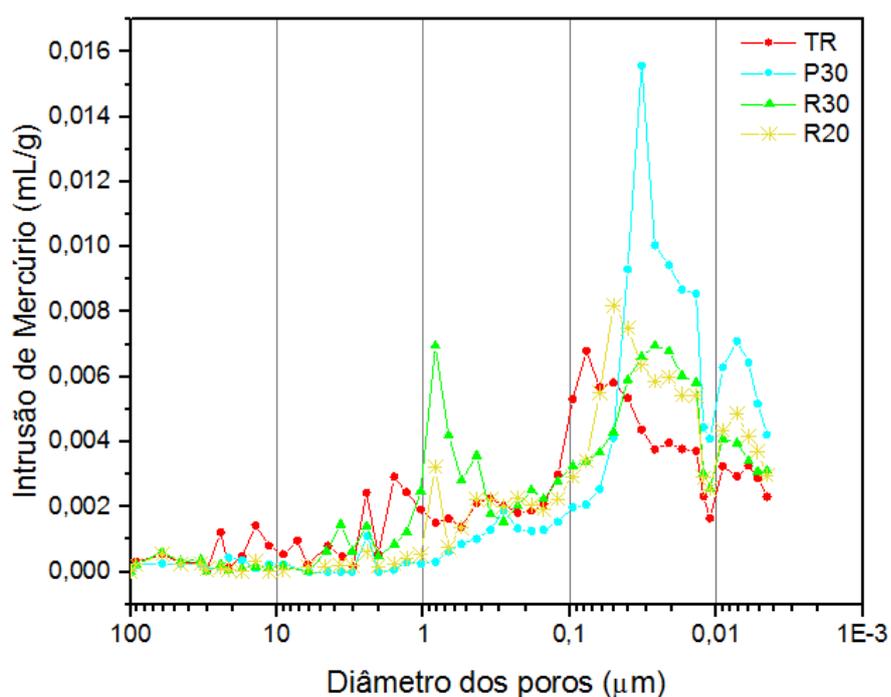


Figura 5.38 – Intrusão de mercúrio dos 4 CAA's base

Pôde-se averiguar que cada adição promoveu um comportamento diferente. No TR, observa-se que o cimento promove uma distribuição mais uniforme no tamanho dos poros da amostra, apresentando picos logo no início da intrusão. O comportamento continua no decorrer de redução do tamanho dos poros, tendo seu pico máximo em $0,08\mu\text{m}$, contudo esse pico foi bem menor do que os picos provocados pelas adições.

Dessa forma, apesar do TR apresentar mais picos nos poros maiores, como a intensidade dos picos é pequena a porosidade não se elevou e manteve-se próxima ao demais misturas, como apresentado na Tabela 5.17. Isso ocorre porque uma menor intensidade do pico é decorrente de um menor volume de mercúrio intrudido e, conseqüentemente, menor volume de vazios, como apresentado na Figura 5.39.

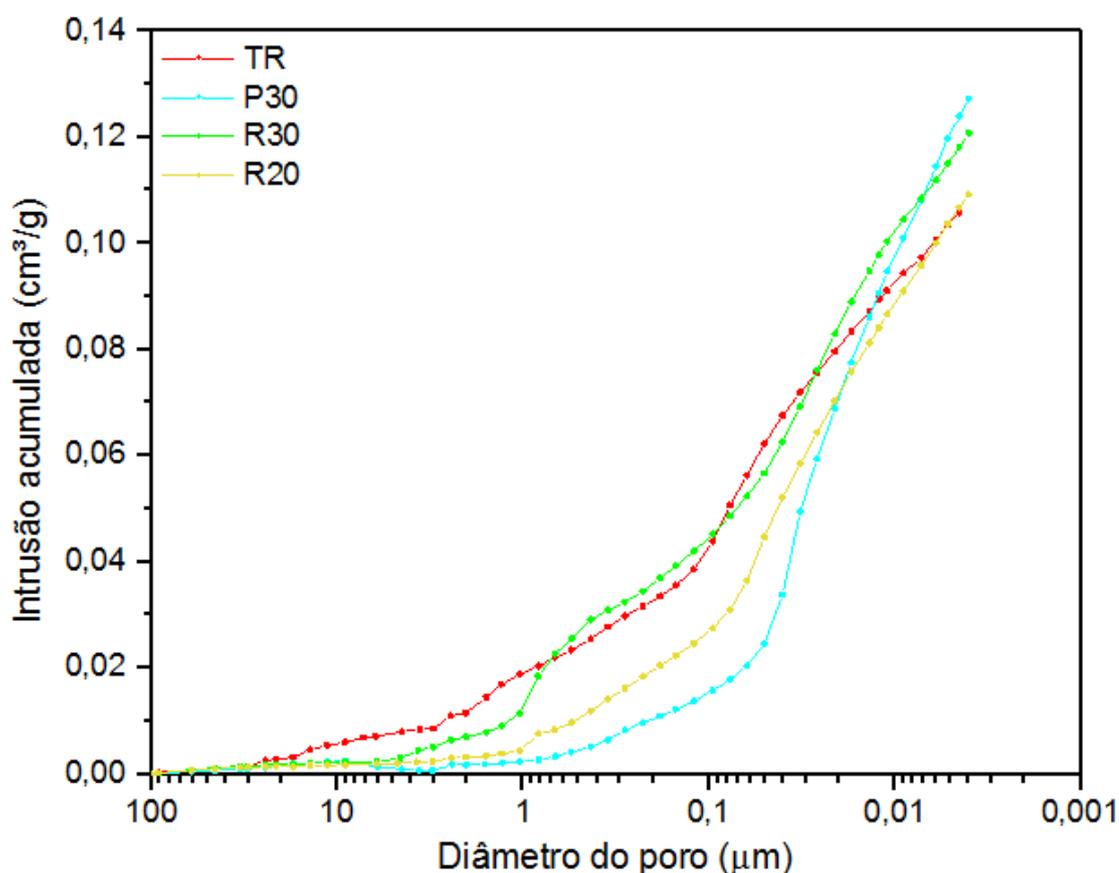


Figura 5.39 - Intrusão acumulada de mercúrio dos 4 CAA's base

Nesta figura pôde-se constatar que apesar do TR ter poros maiores o volume total de poros é menor e confere a ele uma menor porosidade, como apresentado no Tabela 5.17. No estudo de Durgun e Atahan (2018) ocorre o mesmo comportamento,

o CAA referencia tem volume acumulado maior até $0,1 \mu\text{m}$ e nos poros menores sua porosidade fica menor do que os CAA's com adições.

Contudo, mesmo com porosidades maiores, esse comportamento é positivo para os CAA's com adições, uma vez que, segundo Mehta e Monteiro (2014), um poro maior influencia mais na resistência e permeabilidade (parâmetro de durabilidade), enquanto um poro menor têm mais influência na retração por secagem.

Durgun e Athan (2018) citam que é necessário na avaliação das porosimetrias observar a largura crítica. Essa largura crítica, é o poro correspondente à maior taxa de intrusão [Durgun e Athan, 2018; Cook e Hover, 1999]. Ou seja, o maior pico, na Figura 5.38. Dessa forma, o R30 apresenta o pico mais à esquerda, sendo o traço com maior possibilidade de degradação, pela porosimetria, seguido do TR, R20 e P30.

O traço P30 tem um comportamento inverso ao TR, onde nos diâmetros dos poros menores houve um melhor preenchimento dos vazios, não sendo apresentado nenhum pico visível, na Figura 5.38. Madandoust et al (2011) mostraram no microscópio eletrônico esse fechamento dos poros, elevando a resistência à compressão. Contudo, nos poros abaixo de $0,04 \mu\text{m}$ há uma concentração de picos de grande intensidade, o que eleva a porosidade da argamassa, sendo a maior aos 42 dias, conforme Tabela 5.17.

Isso indica que o PCA tem uma deficiência granulométrica nessa faixa, de forma que os vazios do traço P30 são predominantes nos poros abaixo de $0,04 \mu\text{m}$. Essa proposição é indicada na granulometria à laser do PCA, Figura 5.8, o qual tem início da curva granulométrica aos $0,3 \mu\text{m}$. E, como o PCA nesta idade já está hidratado e a reação de hidratação é expansiva a tendência seria de redução desse poro, porém a hidratação também não foi capaz de preencher esse tamanho de vazio.

Na curva acumulada o PCA teve um desempenho melhor, quando comparado ao traço R30, onde a inversão do comportamento com a curva do TR se dá aos $0,02 \mu\text{m}$, mesmo tendo apresentado uma volume total de poros maiores. No entanto, é válido ressaltar que o comportamento de ambos os traços foram satisfatórios e que, segundo Silva e Brito (2015), a distribuição não segue sempre a mesma tendência do volume de intrusão, sendo necessário avaliar as duas curvas.

As misturas com RBC apresentaram resultados positivos, com porosidades menores ou equivalentes ao CAA referência. Como a moagem foi baixa, esperava-se

um traço mais poroso. O ensaio da intrusão do R30 resultou em 2 picos bem característicos, em $0,8 \mu\text{m}$ e $0,03 \mu\text{m}$.

Os resultados do R20 ratificaram que o RBC influencia nesses picos, onde, com a redução de 10% no seu teor, no pico de diâmetro $0,8 \mu\text{m}$ houve uma redução da intensidade. Já no poro de $0,03 \mu\text{m}$ tem-se uma tendência do pico da mistura R20 se deslocar em direção ao pico do TR, aos $0,08 \mu\text{m}$, em decorrência da entrada de cimento na mistura.

O traço R30 tem um comportamento melhor até $0,1 \mu\text{m}$, na intrusão acumulada, em relação ao TR. Depois deste ponto ele passa a ter maior volume de poros e uma porosidade total maior, no entanto, como supracitado, diâmetros maiores influenciam mais na durabilidade. O traço R20 teve um desempenho ótimo tendo uma curva acumulada sempre menor do que o TR, mesmo que no fim apresentou o volume de poros equivalente ao referência.

É importante ressaltar que a granulometria à laser do RBC, Figura 5.7, o apresentou como um material com diâmetro maior do que o PCA, contudo, pelo histograma é possível ver que a granulometria do RBC é mais uniforme. Isso explica o melhor desempenho quando comparadas as duas cinzas. Outro fator que pode ter influenciado é a proporção dos materiais da mistura que otimizaram o empacotamento, contudo, este estudo não foi realizado.

Tabela 5.18 – Resultados da posimetria aos 42 e 112 dias

42 DIAS							
PROPRIEDADES	TR	P30	P30C10	R30	R30C10	R20	R20C10
DIÂMETRO MÉDIO [μm]	0,025	0,015	0,014	0,022	0,017	0,019	0,016
DENSIDADE REAL [g/mL]	2,080	1,940	2,013	1,882	1,946	1,954	2,024
POROSIDADE TOTAL (%)	22,47	24,68	23,98	22,72	26,58	21,33	26,13
112 DIAS							
PROPRIEDADES	TR	P30	P30C10	R30	R30C10	R20	R20C10
DIÂMETRO MÉDIO [μm]	0,020	0,016	0,018	0,026	0,021	0,027	0,024
DENSIDADE REAL [g/mL]	2,156	2,090	2,013	1,987	2,122	1,964	2,023
POROSIDADE TOTAL (%)	20,46	18,58	16,34	18,19	21,75	19,76	25,65

A Tabela 5.18 apresenta também a influência da carbonatação, onde foram ensaiadas amostras aos 112 dias (70 dias dentro da câmara). Pôde-se constatar que a carbonatação influenciou na redução da porosidade Total, sendo isto decorrente da

reação expansiva para formação dos carbonatos, explicitada por Carasek e Cascudo (2011). Esse fenômeno também ocorreu nos concretos de Xuan *et al* (2017) onde as amostras carbonatadas obtiveram porosidades significativamente inferiores.

Contudo houve o aumento do diâmetro médio em todos os CAA's com adições, indicando que a maior quantidade de hidróxido de cálcio no TR faz com que o gás carbônico reaja com estes elementos e não atinja o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) o qual é responsável pelo preenchimento dos poros menores, deslocando a curva para à direita, conforme Figura 5.40.

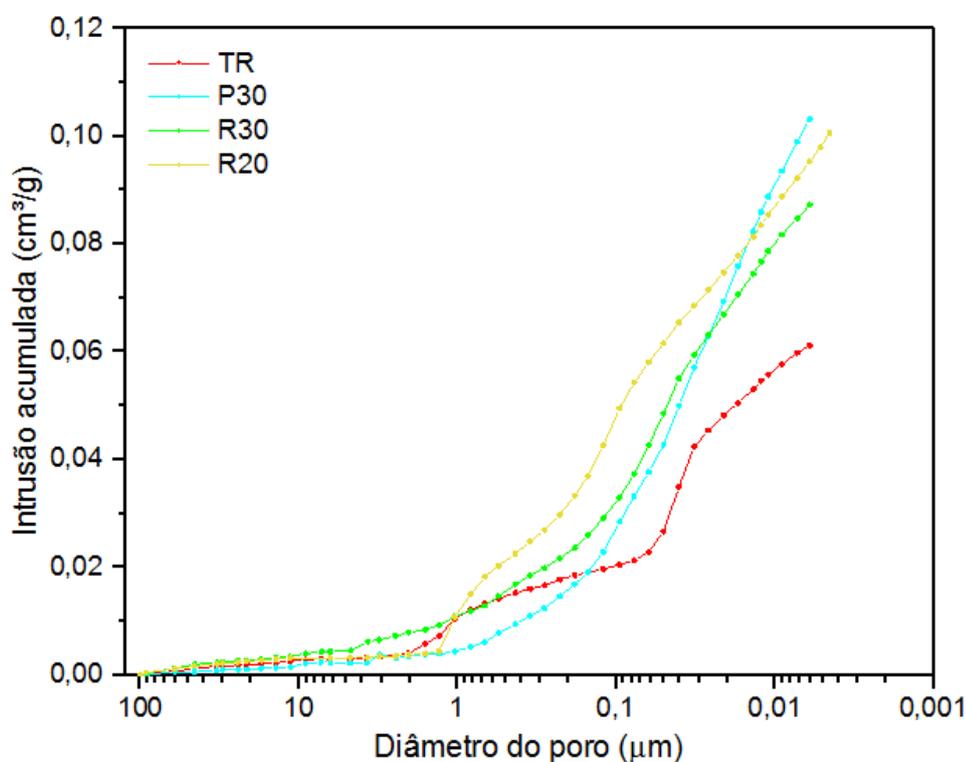


Figura 5.40 - Intrusão acumulada de mercúrio dos 4 CAA's base carbonatados

Na reação pozolânica há o consumo do CH para formação de C-S-H secundário, ratificada esta reação na porosimetria aos 42 dias onde os diâmetros médios dos CAA's com adições são menores.

Logo, quando ocorreu a carbonatação, como há uma reduzida quantidade de CH, a gás carbônico ataca o C-S-H aumentando o diâmetro médio dos poros. Como supracitado, conforme Li e Li 2018, isso ocorre pela menor relação Ca/Si facilitar a

degradação do C-S-H, sendo este composto responsável pela preenchimento dos poros menores

No intuito de comparar os CAA's com e sem a presença da Cal, aos 42 dias, foi idealizada a Figura 5.41, deslocando verticalmente as curvas e deixando valido apenas o eixo X, não tendo valores definidos no eixo Y. Contudo, todo o procedimento foi realizado em um softwares de gráficos no intuito de não perder a escala dos eixos.

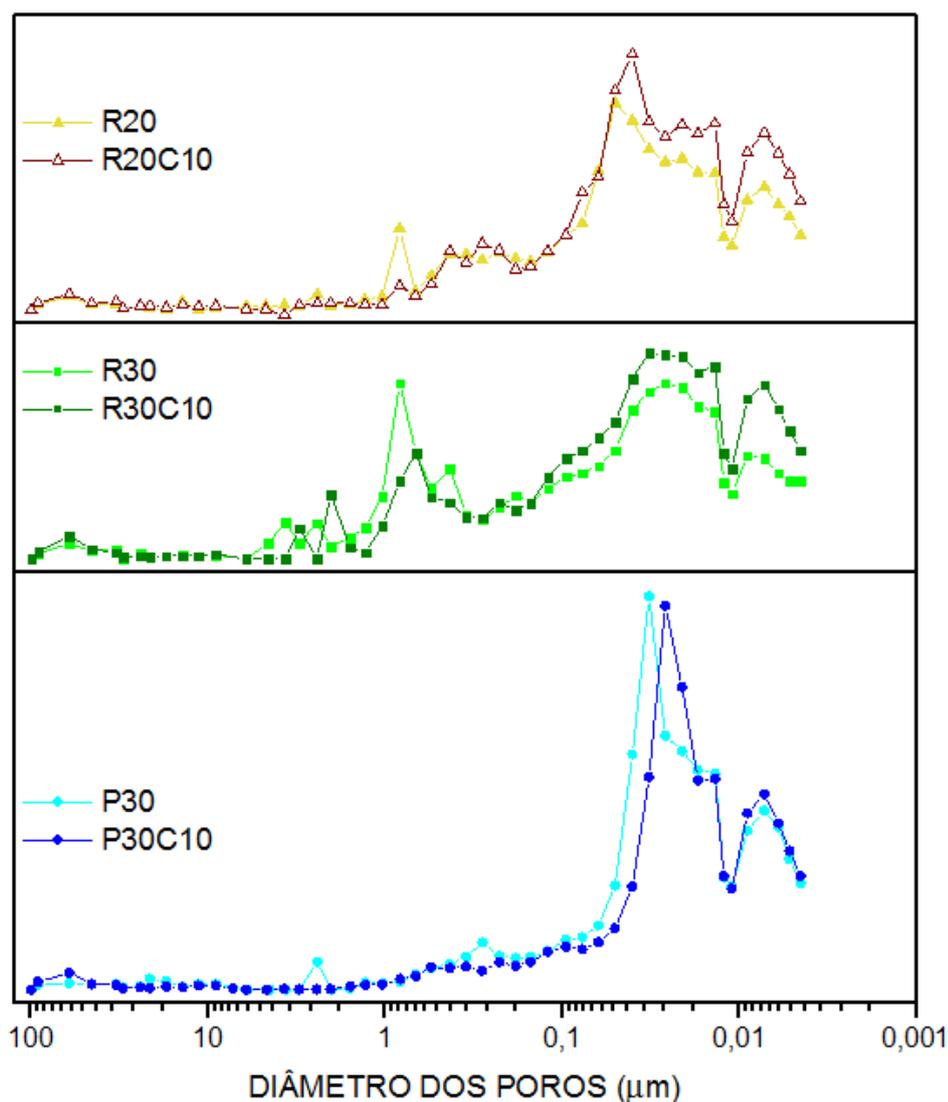


Figura 5.41 – Comportamento da intrusão aos 42 dias

O comportamento das misturas com e sem a Cal não variou muito, entretanto, foi possível notar que a sua presença no traço com PCA reduz a porosidade. Nos CAA's com RBC há um aumento da porosidade a partir da inserção da cal, em média

de 20%. Tal fato é percebido pela elevação dos picos e comprovado pelos valores de porosidade apresentados na Tabela 5.17.

Outro fato importante ocorre na faixa de 0,6 a 0,9 μm , onde, nos traços com RBC a Cal provoca a redução do pico. Apesar da Cal prejudicar a porosidade das misturas, nessa faixa há a presença de grãos de Cal ou hidróxido de cálcio que fecham os vazios e reduzem a porosidade na faixa, no entanto não é suficiente para compensar o aumento dos picos em outros diâmetros.

5.4.2.3 Absorção de água por capilaridade

A estrutura porosa está intrinsecamente ligada a durabilidade dos concretos, pois são os caminhos que os agentes agressivos utilizam para atacar o concreto. Logo a absorção capilar é um parâmetro indicador da qualidade do concreto. Essa qualidade irá imprimir uma maior durabilidade.

No entanto Silva e Brito (2015) ressaltam que esse valores medem apenas os poros abertos, sendo necessario também estudar a porosimetria por ver os poros fechados. Os resultados da absorção capilar, às 48 horas, são apresentados na Figura 5.42.

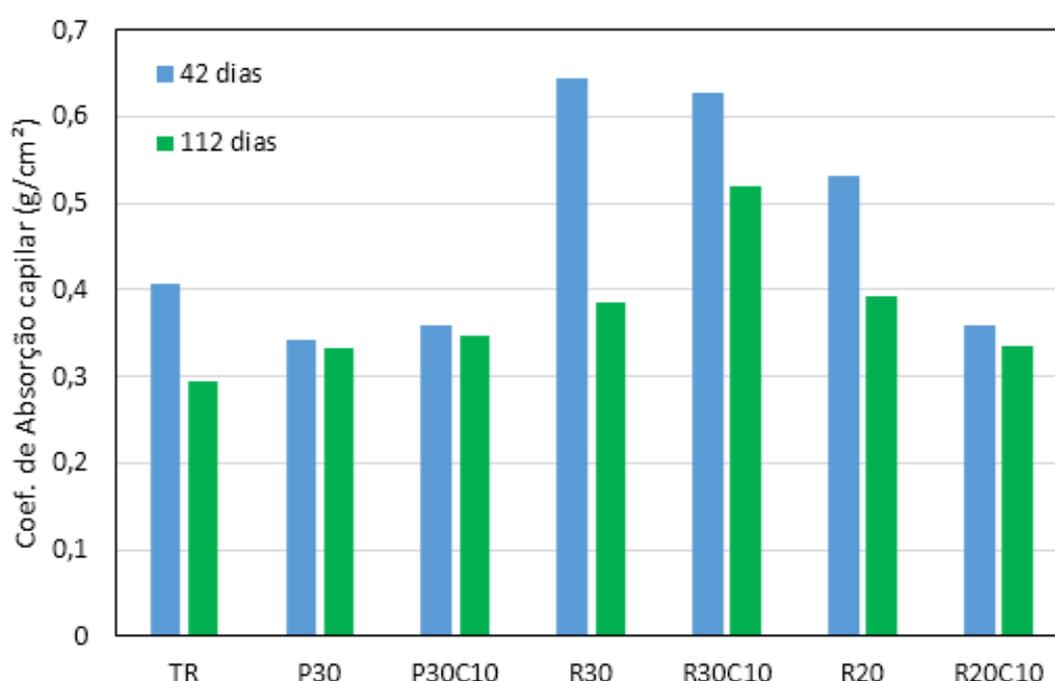


Figura 5.42 – Absorção capilar fora da câmara

Ao analisar os dados da figura pôde-se constatar que a absorção no concreto sem exposição ao gás carbônico reduz ao longo das idades. Contudo essa redução não foi proporcional entre os CAA's confeccionados.

O CAA referencia apresentou uma redução de 27%, enquanto que os traços com PCA apresentaram valores abaixo de 3%. Sandhu e Siddique (2017) também investigaram a absorção em concretos em PCA e observou uma redução de 35% da quantidade de água.

Já as misturas com RBC foram as que mais reduziram a absorção de água por capilaridade, tendo 40% de redução do R30. Thomas (2018) compila diversos artigos onde a presença do PCA tem comportamento semelhante, reduzindo a absorção capilar.

Para entender essas reduções foi realizada a análise estatística dos efeitos, onde foi averiguado que os 30% de RBC provocaram uma redução da absorção de 0,17 g/cm² em relação aos 30% de PCA. E, quando é elevado o teor de RBC de 20% para 30% a redução foi de 0,10 g/cm².

É importante ressaltar que esse efeito foi calculado pela diferença entre os coeficiente de absorção aos 42 e 112 dias fora da câmara, no intuito de averiguar a influência das variáveis ao longo do tempo. Porém, também é necessário averiguar o efeito em cada dia, como apresentado na Tabela 5.19 e Figuras 5.43 e 5.44.

Tabela 5.19 – Efeito estatístico da absorção

EFETOS ESTATÍSTICOS (g/cm²)			
Idade	Acréscimo de CAL	Acréscimo de RBC	Subst. RBC p/ PCA
42 dias	-0,05	0,19	-0,28
112 dias	-0,06	0,08	-0,11
Redução	-0,11	-0,10	0,17

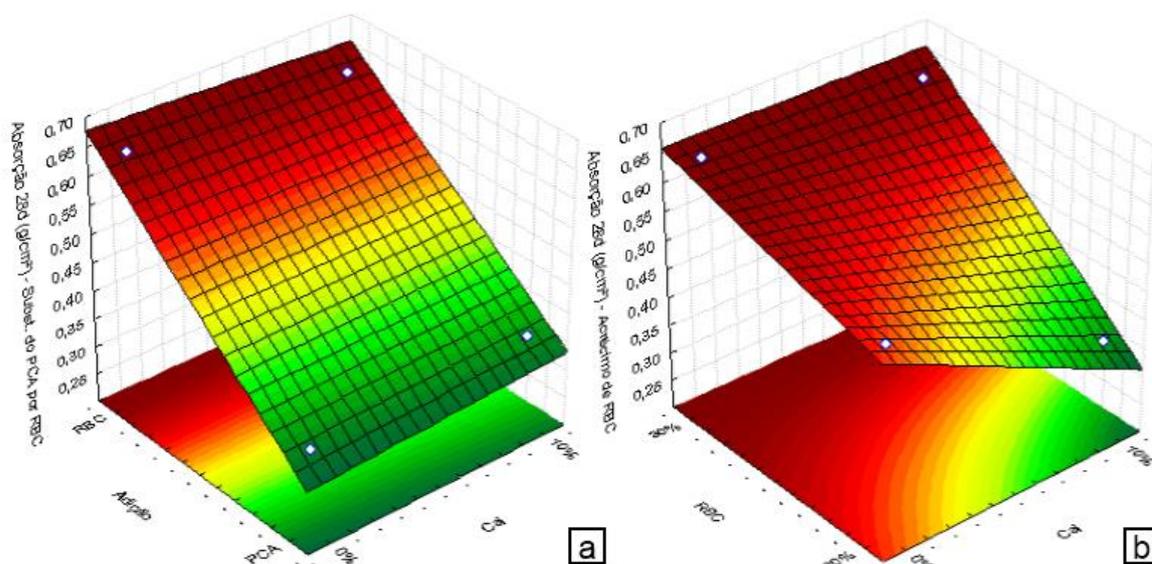


Figura 5.43 – Superfície de resposta absorção capilar aos 42 dias

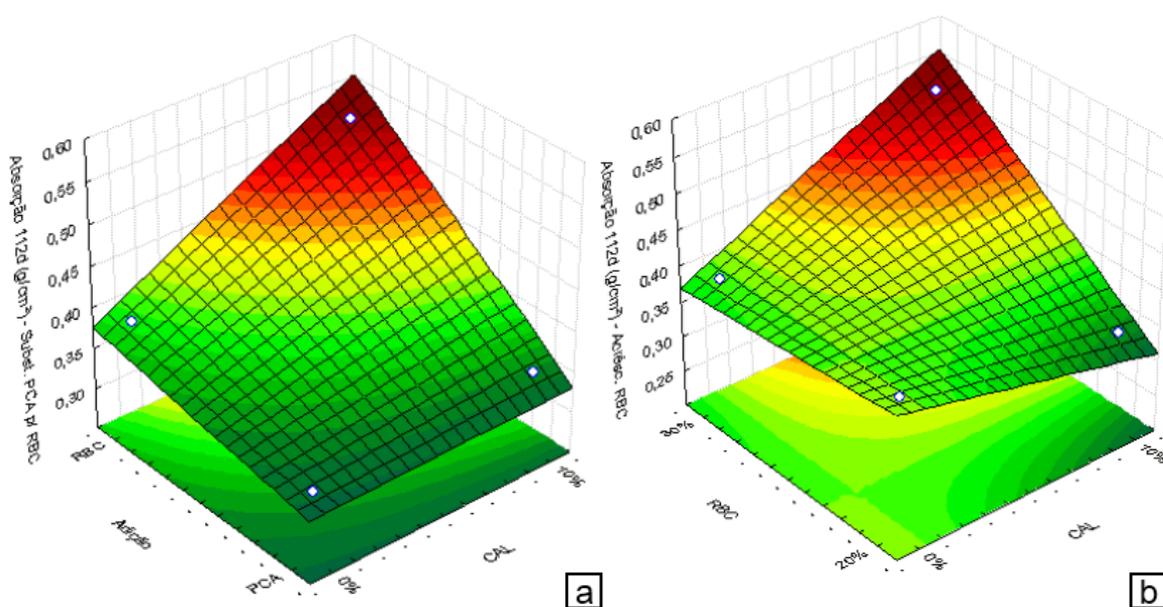


Figura 5.44 – Superfície de resposta absorção capilar aos 112 dias

Aos 28 e 112 dias o incremento ou substituição do RBC aumentou a absorção, piorando a qualidade do concreto, sendo a presença do PCA mais significativa para reduzir a absorção capilar dos CAA. O PCA apresentou efeito de 11 à 28%, coerente com os valores de 5 à 30% de redução, no trabalho de Sandhu e Siddique (2017).

É possível ver a influência do RBC no gráfico b, Figura 5.43, onde a parte vermelha, representando o aumento da quantidade de água absorvida é visualmente

mais significativa. Também no gráfico 5.44 b é visível a elevação da superfície de resposta. Joshaghani e Moeini (2017) observaram o mesmo fenômeno quando aumentou o RBC de 10% para 30%.

A cal influenciou sempre para reduzir a taxa de absorção e conseqüentemente, melhorou a qualidade do concreto. Isso é devido sua granulometria fina e melhor formação dos produtos hidratados, o que promove um melhor empacotamento e reduz a porosidade, contudo em pequeno efeito. Pantawee et al (2017) obtiveram resultados de absorção pouco melhores que o referência.

Entretanto, aos 112 dias, é possível observar que tanto os valores da absorção quanto à predominância das faixas vermelha e amarelas nos gráficos são menores que os de 28 dias. É possível que o processo de hidratação tenha se desenvolvido, reduzindo a quantidade de poros, mesmo o CAA sendo submetido à carbonatação.

Estes resultados de absorção são coerentes com os resultados dos ensaios já discutidos, onde a taxa ideal do RBC para substituir o cimento é de 20%. No entanto, o traço com 30% apresentou uma maior redução ao longo das idades, aproximando os valores aos 112 dias dos CAA's com RBC, uma ocorrência à ser estudada futuramente. A Figura 5.45 mostra o comportamento da absorção do concreto frente ao ataque do gás carbônico.

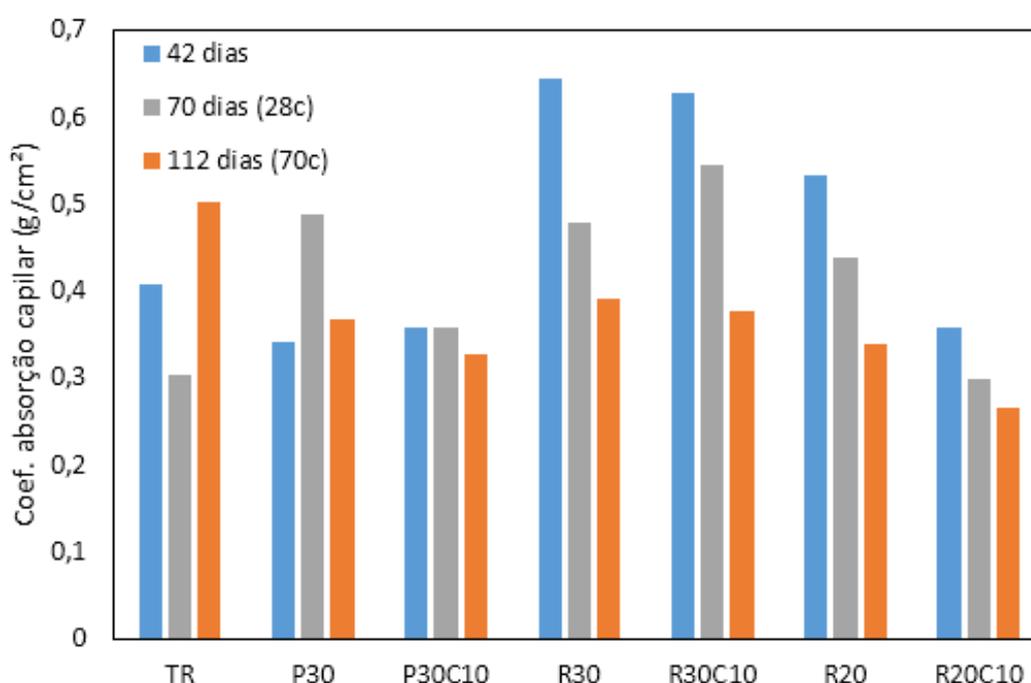


Figura 5.45 – Absorção capilar nas 3 idades dentro da câmara de carbonatação

Ao observar as colunas presentes na Figura 5.45, percebe-se que os traços TR e P30 não apresentaram um comportamento linear no decorrer das idades dentro da câmara de carbonatação. É possível que, em virtude da carbonatação ter demorado mais para ocorrer no TR, essa tendência de elevação é em virtude do processo de acidificação que dissolveu os compostos hidratados, porém, ainda não formou os carbonatos.

Como, nos CAA's com as adições minerais a carbonatação ocorre mais rapidamente, esse processo de decomposição dos compostos e a formação dos produtos carbonatados ocorre mais rapidamente, sendo a carbonatação uma variável que reduz a absorção capilar. Apesar desse comportamento ser coerente para a maioria dos traços, o P30 não apresentou resultados coerentes, sendo mais provável que seja decorrente de erro experimental.

Em decorrência do comportamento heterogêneo entre os dias observados e da grande quantidade de dados, optou-se por não avaliar estatisticamente cada dia individualmente a fim de observar o comportamento global sem interferências. Com isso pôde-se averiguar que, com exceção do RBC, as adições tiveram um comportamento próximo do TR, sendo isto mais um argumento para a utilização das cinzas.

A cal novamente apresentou um efeito de redução da absorção, em virtude da geometria da sua partícula, como supracitado, e também apresentou viabilidade de uso em concretos auto adensáveis, para este parâmetro.

Sendo assim, a frente de carbonatação reduziu a quantidade de água absorvida capilarmente nos concretos com maior profundidade de carbonatação. Isso indica que o processo de carbonatação ocorreu, sendo expansivo e, para estes traços, houve uma colmatação dos poros.

Uma análise final da absorção capilar foi feita comparando os resultados obtidos na última idade, 112 dias, das amostras que permaneceram dentro e fora da câmara de carbonatação, obtendo-se o gráfico apresentado da Figura 5.46.

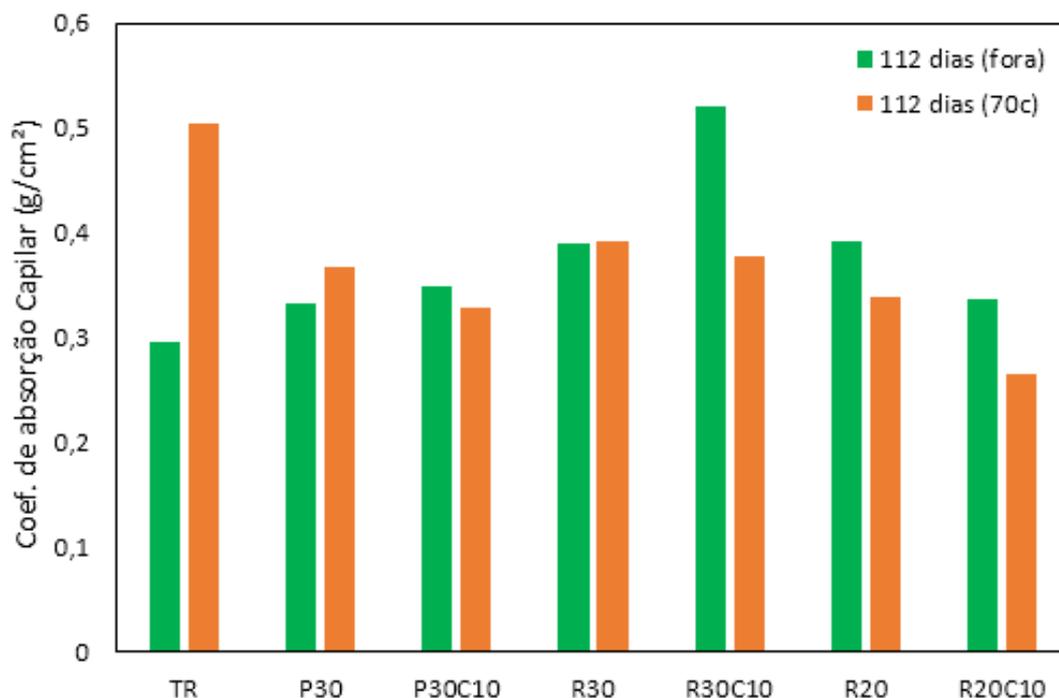


Figura 5.46 – Absorção capilar aos 112 dias: dentro x fora da câmara

Averigua-se que apenas os traços TR e P30 tem a sua absorção elevada quando submetidos a frente de carbonatação. O referências têm seu comportamento explicado pelo retardamento da penetração do gás carbonico, como supracitado. Contudo para a ocorrência do P30 não houve coerência novamente, como aos 112 dias fora foi creditando um erro experimental não foi possível analisar.

Os traços seguintes (P30C10 e os com RBC) apresentaram redução da absorção de água, contudo em valores de menor grandeza quando comparados aos resultados dos dias dentro da camara de carbonatação. Isso é interessante, pois indica que o raciocinio aplicado ao TR é verdadeiro.

Pois, com a acidificação o poros são elevados, em decorrência da decomposição das estruturas da matriz. No entanto, quando a carbonatação ocorre, há a formação dos produtos carbonáticos que são expansivos, reduzindo os poros novamente.

Para quantificar os efeitos comparando as duas condições ambientais com a substituição do PCA por RBC e também com o crescimento de RBC de 20% para 30% foi realizado o delineamento estatístico, conforme Tabela 5.20. Onde foi constatado

que apesar do R30 ter valores iguais para os dois ambientes, foi aferido que a presença do RBC aumenta a absorção capilar em relação ao PCA, nos dois ambientes e também quando há elevação do seu nas misturas.

Tabela 5.20 – Efeito estatístico da absorção capilar aos 112 dias em diferentes ambientes

EFEITOS ESTATÍSTICOS (g/cm²)		
Ambiente fora x dentro	Substituição PCA x RBC	Acrésc. RBC 20% x 30%
+0,025	+0,035	+0,020

Como a cal elevou a absorção apenas no traço com 30% de RBC nos concretos fora, não foi realizada a análise estatística. Pois, entendeu-se que em todos os outros casos ela provocou efeito de redução, comprovando seu efeito positivo para a qualidade do concreto.

5.4.2.4 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica foi aferida desde os 3 dias da confecção dos CAA's até o último dia da exposição das amostras à carbonatação, 112 dias, afim de verificar o comportamento do concreto em relação ao desenvolvimento da hidratação e também para averiguar a influência dos dois ambientes impostos na pesquisa.

Observando os resultados da resistividade elétrica das amostras que não foram submetidas à carbonatação, Figura 5.47, verificou-se que os CAA's com a presença das adições minerais tiveram a resistividade consideravelmente elevada a em relação ao CAA referência. Isso ocorre devido a menor quantidade de CH na matriz, segundo Ghoddousi e Saadabadi (2017). Já Singh e Singh (2016) cita que a resistividade aumenta pela presença de pozolanas que tornam a mistura mais densa.

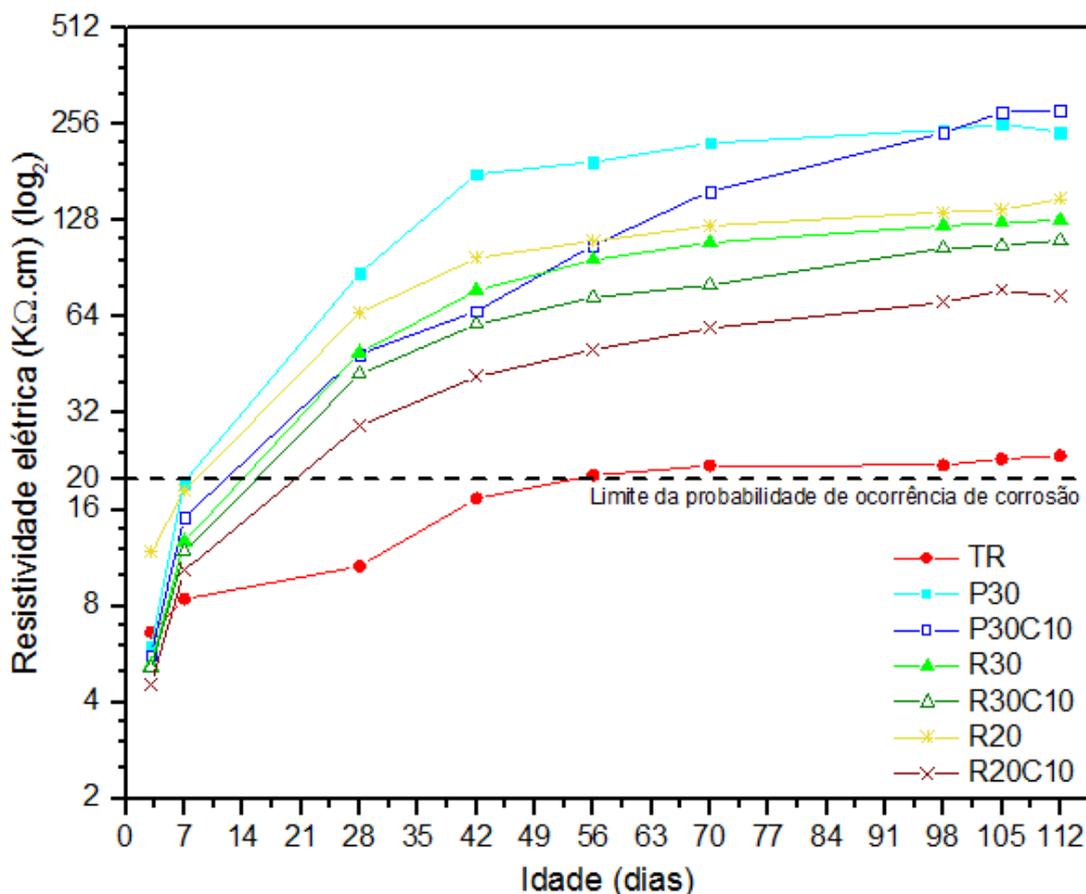


Figura 5.47 – Resistividade elétrica ao longo das idades

Após os 28 dias todos os CAA's com adições minerais ultrapassaram a marca de 20 $K\Omega.cm$, o que aduz a uma matriz com o risco de corrosão desprezível. Isso atribui uma qualidade aos concretos com adições minerais, pois mesmo tendo maior tendência de carbonatação a passagem de elétrons é limitada e a formação da pilha de corrosão terá dificuldade de se formar, tendo como consequência concretos mais duráveis.

Figueiredo e Meira (2013) contribuem para tal discussão, afirmando que a resistividade é uma das variáveis determinantes para a corrosão e acrescenta que a corrosão é facilitada com a saturação dos poros, pois, com isso averá uma menor resistividade do sistema. Como os ensaios foram realizados com amostras saturadas e mesmo assim apresentaram elevadas resistividades isso, ratifica que a presença das adições torna a possibilidade de corrosão desprezível.

Avaliando o comportamento de cada adição é possível notar que o PCA tem uma capacidade bem maior, quando comparado ao RBC, de elevar a resistividade da matriz do concreto. Isso ocorre devido a amorficidade elevada, que provoca uma maior dificuldade de passagem à corrente elétrica, e também ao alto teor de sílica, que devido a ligação covalente ocorrer na camada de valência, são bons isolantes. Sandhu e Siddique (2017) acharam em argamassas resultados de 121,2 K Ω .cm com o PCA.

Já o RBC parece precisar estar em conjunto com o metacaulim para atingir bons valores de resistividade elétrica. Visto que, ao observar os traços R20 e R30 há uma redução do valor. Ou seja, o que garante a elevação da resistividade é a presença do metacaulim no traço.

Contudo não se pode saber se o RBC tem comportamento superior ao TR se estivesse sozinho. Pois sendo uma adição proveniente de uma cinza industrial, ele têm a resistividade elevada em decorrência de ter a composição química próxima ao PCA.

No entanto, o RBC aumentou em 173% a resistividade nas argamassas de Joshaghani e Moeini (2017), indicando que as boas resistividades dos CAA's com RBC são decorrentes das duas adições minerais presentes, o RBC e o metacaulim. Ghoddousi e Saadabadi (2017) obtiveram resultados bem superiores ao referencial em CAA's com metacaulim.

Avaliando estatisticamente cada adição, aos 112 dias, mediante a comparação entre o PCA e RBC, ambos com 30% e também pelo acréscimo de 10% de RBC entre os traços R20 e R30, observa-se os efeitos das adições na Tabela 5.21. Os efeitos são equivalentes as proposições acima dissertadas.

Tabela 5.21 – Efeitos estatísticos da resistividade elétrica

EFEITOS ESTATÍSTICOS (KΩ.cm)			
Idade	Acréscimo de CAL	Acréscimo de RBC	Subst. RBC p/ PCA
28 dias	-20,98	-2,50	19,38
112 dias	-86,70	2,01	171,23

A análise dos efeitos permitiu afirmar a grande capacidade do PCA de elevar a resistividade elétrica, no entanto mostrou também que há uma influência negativa muito forte da Cal na resistividade elétrica. Isso ocorre devido ao hidróxido de cálcio ser pouco estável, e estando decomposto, o Cálcio presente nele é um metal alcalino que favorece a passagem dos elétrons.

Um resultado de efeito surpreendente foi o do acréscimo de RBC, que não apresentou valores significativos em nenhuma das idades, com valores de -2,5 e 2,01 $K\Omega.cm$. Isso demonstra que ele não tem influência da passagem ou obstrução da corrente elétrica. E sendo utilizado com o metacaulim atinge resultados ótimos para redução da probabilidade de corrosão, validando mais uma vez o traço.

Ao analisar a influência da frente de carbonatação acelerada na resistividade elétrica, Figura 5.48, constatou-se que este ambiente pouco influenciou na obstrução à passagem de elétrons. O gráfico foi dividido em 4 partes para melhor visualização.

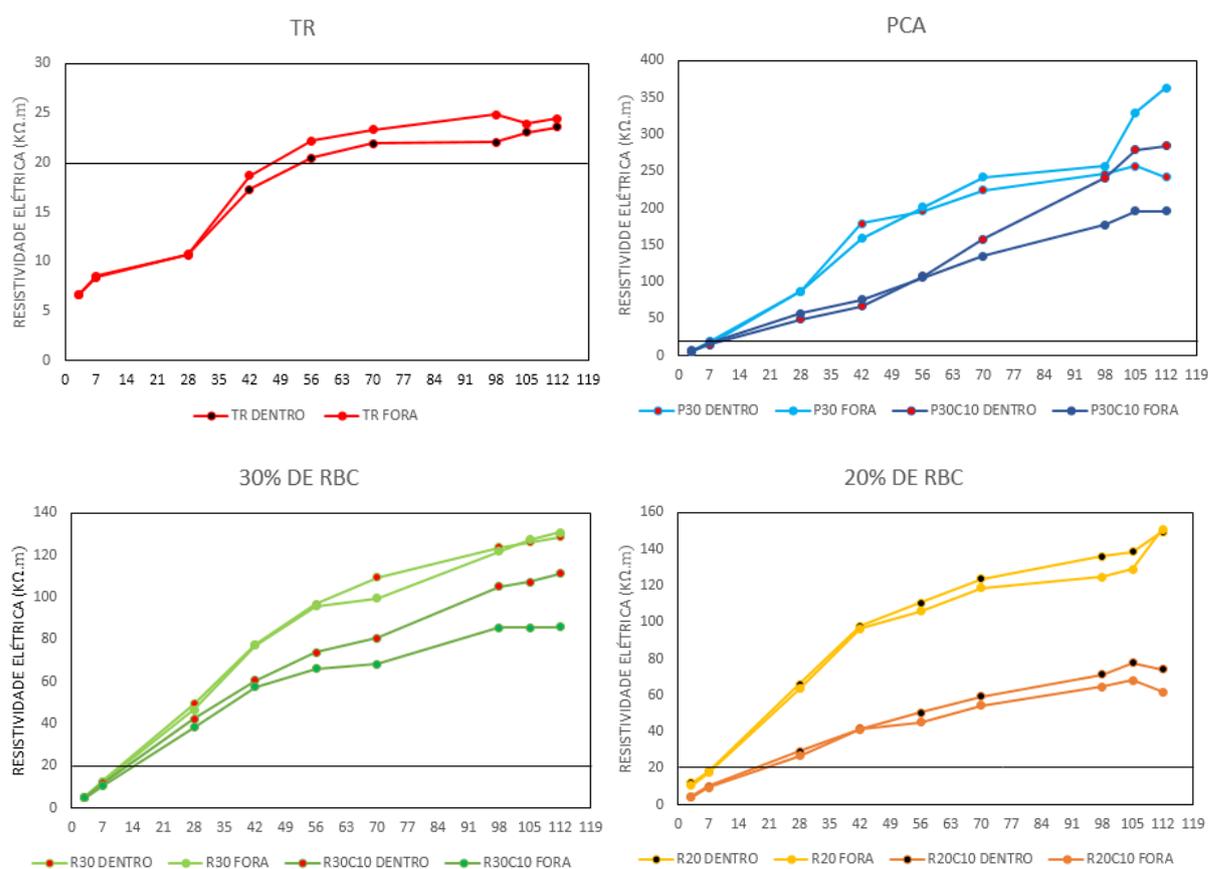


Figura 5.48 – Resistividade elétrica por série ao longo das idades

Em todos os CAA's o comportamento foi equivalente para os dois ambientes, contudo com uma pequena tendência da carbonatação elevar a resistividade elétrica, porém com valor pouco significativo. As variações são decorrentes apenas de heterogeneidade das amostras ensaiadas.

Essa equivalência entre os ambientes foi provavelmente causada pelo processo escolhido para executar o ensaio. Como as amostras sempre tinham que estar saturadas retirava-se 24 horas antes da câmara. Contudo a secagem com o secador após o ensaio deve ter sido insuficiente para secar a amostra, pois, Samimi *et al* (2018) registraram aumento após a carbonatação, devido à colmatação dos poros levando a uma diminuição da porosidade.

Devido à carbonatação ser muito lenta em poros saturados, em virtude do processo ocorrer por migração, com a amostra úmida, mesmo dentro da câmara elas não carbonataram. Os estudos de Fonseca (2016) apresentaram diferença entre os ambientes, contudo ele fez o ensaio com as amostras secas, não representando a condição mais desfavorável.

CAPÍTULO 06

Considerações Finais

Diante do estudo experimental e das análises apresentadas pôde-se averiguar o comportamento dos concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento e elevados teores de adições nas propriedades mecânicas e índices de durabilidade, bem como a comparação entre o RBC e PCA, podendo-se concluir que:

- No estado fresco o RBC e o PCA elevaram a viscosidade do concreto e demandaram mais aditivo superplastificante, em especial o RBC, contudo atingiram resultados de slump flow com classificação SF3 com uma ótima coesão e resistências a segregação e exsudação. O concreto autoadensável referência teve maior velocidade de espalhamento, porém apresentou segregação e baixa coesão.
- Na resistência à compressão os traços com 20% de RBC (R20 e R20C10) e 30% de PCA (P30 e P30C10) apresentaram resultados acima do TR em idades avançadas, com resistências próximas entre 55 e 63 MPa, mostrando o potencial positivo do uso das adições na principal propriedade do concreto. Os traços com 30% de RBC (R30 e R30C10) apresentaram que esse teor é elevado e começa a prejudicar o concreto, porém houve uma boa resistência, de 48 MPa. A relação entre resistência e consumo de cimento, onde os CAA's com adições foram de 2 a 3 vezes mais elevados que o referência, ratificando a eficiência dos CAA's.
- Na velocidade do pulso ultrassônico constatou-se que houve um retardamento da hidratação nas primeiras idades no CAA com adições. Entretanto, com o avanço dos dias, principalmente aos 28 dias, houve um crescimento elevado, indicando a ocorrência da reação pozolânica. Os traços P30C10 e R20C10 foram destaques por apresentar uma curva superior ao CAA referência, o que comprovou a capacidade da cal de otimização da reação pozolânica pelo aumento do teor de hidróxido de cálcio.

- Na profundidade de carbonatação o TR apresentou os melhores resultados, tendo apenas 1,8 mm aos 70 dias dentro da câmara. Dessa forma, concluiu-se que o fator preponderante para a resistência a carbonatação é o teor de hidróxido de cálcio.
- Na carbonatação dos CAA com adições, os que apresentaram melhores resultados foram os que tinham cal em sua composição. O traço R20 se destacou dentre os traços sem cal, devido ao seu maior teor de cimento.
- Apesar da maior carbonatação nos CAA's com adições, de 2,5 a 11 mm, constatou-se que esses valores estão abaixo da espessura mínima da norma, potencializando o seu uso.
- Na comparação entre PCA e RBC, os coeficientes de carbonatação apresentaram uma tendência de maior carbonatação nos CAA's com PCA apesar dos resultados serem inicialmente menores, explicado pelo maior consumo de CH, em decorrência da maior reatividade do PCA.
- Foi possível constatar também que a carbonatação ocorrendo na matriz do TR, com elevado teor de CH não provoca acréscimo do diâmetro dos poros na PIM, contudo na matriz das adições há indicação de que o C-S-H está sendo carbonatado, pois o diâmetro dos poros é aumentado, mesmo com a redução da porosidade.
- Na porosimetria por intrusão de mercúrio o diâmetro do poro foi o fator preponderante para ocorrência da carbonatação, mesmo em CAA's com porosidade maior.
- Os resultados da porosimetria também mostraram que o PCA possui um melhor preenchimento dos finos em comparação ao RBC, contudo provoca um maior volume de vazios que reflete em uma maior porosidade.
- Na absorção capilar, o RBC apresentou maior influência para o aumento da absorção de água, porém ele sofreu uma influência do avanço da idade, tendo uma

queda maior que a do PCA. Isso mostrou que, apesar de tardia, ocorreu a hidratação dos seus produtos otimizando a matriz.

- Ao analisar a influência da carbonatação na absorção capilar, este ataque ácido ocorreu mais rapidamente nos CAA's com adições. Com o pH mais baixo os produtos carbonáticos se formaram com maior agilidade reduzindo a quantidade de água absorvida ao longo das idades analisadas. O TR teve o processo mais lento, onde, só houve a decomposição na última idade aumentando a permeabilidade. Isso comprovou que a maior quantidade de CH retarda o processo de carbonatação.

- Na resistência à passagem de corrente elétrica, os resultados foram os mais satisfatórios, nos quais todos os CAA's com adição obtiveram um bom distanciamento da zona de probabilidade de corrosão. O TR ficou muito próximo, indicando que apesar de ter um teor de CH maior a passagem de corrente se deu mais facilmente pela presença do Cálcio, que é um metal alcalino.

- Os resultados de resistividade elétrica comprovaram a eficácia dos CAA's com adições, pois a capacidade de passagem elétrica é mais baixa do que a necessária para ocorrer a corrosão, sendo um bom indicativo de durabilidade que permite a utilização do CAA com as adições do PCA e RBC.

- O PCA obteve resultados expressivos, com resistividade acima de 200 K Ω .cm, contudo a presença do RBC não apresentou efeito estatístico para elevação da resistividade. A cal teve um desempenho negativo, reduzindo a resistência devido ao cálcio de sua composição que facilita a passagem dos elétrons.

- Na comparação entre as adições PCA e RBC, o PCA obteve desempenho final superior, contudo, no teor de 20% o RBC apresentou resultados consistentes, viabilizando o uso dessa adição.

- A Cal tem influência positiva na realcalinação da matriz, reduzindo a carbonatação e também tendo um comportamento de melhora das outras propriedades avaliadas, apenas com exceção da resistividade elétrica.

Para todos os fins, os objetivos almejados foram concluídos com êxito, tendo a pesquisa apresentado resultados satisfatórios e estatisticamente comprovados da influência da carbonatação nas propriedades de CAA's com a adição de PCA e RBC.

As misturas estudadas se apresentavam aplicáveis, pois obtiveram resistências à compressão elevadas, com resistividades elétricas que compensam a maior fragilidade à frente de carbonatação. Por fim, os concretos autoadensáveis que apresentaram melhores desempenhos, considerando todos os resultados avaliados foram as misturas R20C10 e P30C10.

Referências Bibliográficas

ACHARYA, Prasanna K.; PATRO, Sanjaya K.. Acid resistance, sulphate resistance and strength properties of concrete containing ferrochrome ash (FA) and lime. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 120, p.241-250, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.099>.

AHARI, Reza Saleh; ERDEM, Tahir Kemal; RAMYAR, Kambiz. Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 75, p.89-98, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.014>.

AHMAD, Shamsad et al. Effects of carbonation pressure and duration on strength evolution of concrete subjected to accelerated carbon curing. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 136, p.565-573, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.069>.

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.

ALGHAZALI, Hayder H.; MYERS, John J.. Shear behavior of full-scale high volume fly ash-self consolidating concrete (HVFA-SCC) beams. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 157, p.161-171, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.061>.

ALMEIDA, Fernando C.r. et al. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 82, p.31-38, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039>.

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

ANSTICE, D.j.; PAGE, C.I.; PAGE, M.m.. The pore solution phase of carbonated cement pastes. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 35, n. 2, p.377-383, fev. 2005. Elsevier BV.

ARANDIGOYEN, M. et al. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. **Applied Surface Science**, [s.l.], v. 252, n. 20, p.7562-7571, ago. 2006. Elsevier BV.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

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

_____. NBR 8802: **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12.653: **Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 15.823: **Concreto autoadensável**. Rio de Janeiro, 2017 (Parte 1 à 5).

_____. NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

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

_____. NBR NM 26: **Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 47: **Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico**. Rio de Janeiro, 2002.

_____. NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53: **Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

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.

BAHURUDEEN, A. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 59, p.77-88, maio 2015. Elsevier BV.

BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, Manu. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 56, p.32-45, fev. 2015. Elsevier BV.

BORGES, Paulo H.r. et al. Carbonation of CH and C–S–H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 40, n. 2, p.284-292, fev. 2010. Elsevier BV.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). **Fator médio de emissão de CO₂: Inventários corporativos**. 2018. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em: 06 fev. 2018.

CACHIM, Paulo; VELOSA, Ana Luísa; ROCHA, Fernando. Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.71-78, jan. 2010. Elsevier BV.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de revestimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. Dissertação de mestrado, 150 p. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

CALVO, J.L. García et al. Durability performance of sustainable self compacting concretes in precast products due to heat curing. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 111, p.379-385, maio 2016. Elsevier BV.

CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo. Ações de carbonatação no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **CONCRETO: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 849-885.

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.

CEN/TS EN 12390-12:2010. **Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method**. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.

CHAO-LUNG, Hwang; ANH-TUAN, Bui Le; CHUN-TSUN, Chen. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 9, p.3768-3772, set. 2011. Elsevier BV.

CHEMROUK, Mohamed. The Deteriorations of Reinforced Concrete and the Option of High Performances Reinforced Concrete. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 125, p.713-724, 2015. Elsevier BV.

CHENG, Shukai et al. Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 141, p.111-117, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.026>.

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.

CONCIATORI, David; SADOUKI, Hamid; BRÜHWILER, Eugen. Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 38, n. 12, p.1401-1408, dez. 2008. Elsevier BV.

COOK, Raymond A.; HOVER, Kenneth C.. Mercury porosimetry of hardened cement pastes. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 29, n. 6, p.933-943, jun. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00083-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00083-6).

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.

CORDEIRO, Guilherme C.; KURTIS, Kimberly E.. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 97, p.41-49, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>.

CORDEIRO, Guilherme Chagas et al. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 39, n. 2, p.110-115, fev. 2009. Elsevier BV.

DADSETAN, Sina; BAI, Jiping. Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 146, p.658-667, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.158>.

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>.

DOSSCHE, Charlotte et al. A plant based LCA of high-strength prestressed concrete elements and the assessment of a practical ecological variant. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 73, p.192-202, out. 2016. Elsevier BV.

DUAN, Ping et al. Efficiency of mineral admixtures in concrete: Microstructure, compressive strength and stability of hydrate phases. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 83-84, p.115-121, out. 2013.

DURGUN, Muhammed Yasin; ATAHAN, Hakan Nuri. Strength, elastic and microstructural properties of SCCs' with colloidal nano silica addition. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 158, p.295-307, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.041>.

FAIRBAIRN, Eduardo M.r. et al. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 91, n. 9, p.1864-1871, set. 2010. Elsevier BV.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; MEIRA, Gibson. **Boletín Técnico 6 INTERNACIONAL: Corrosión de armadura de estructuras de hormigón**. Mérida: Alconpat Internacional, 2013.

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.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K.. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 29, n. 6, p.515-524, jul. 2007. Elsevier BV.

GAR, Parisa Setayesh; SURESH, Narayana; BINDIGANAVILE, Vivek. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 153, p.929-936, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.107>.

GARTNER, Ellis; MARUYAMA, Ippei; CHEN, Jeffrey. A new model for the C-S-H phase formed during the hydration of Portland cements. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 97, p.95-106, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.001>.

GASTALDINI, A.I.g. et al. Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 29, n. 3, p.176-180, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.010>.

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>.

GIESCHE, Herbert. Mercury Porosimetry: A General (Practical) Overview. **Particle & Particle Systems Characterization**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.9-19, jun. 2006. Wiley-Blackwell.

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>.

GONG, Chenchen et al. Effects of limestone powders on pore structure and physiological characteristics of planting concrete with sulfoaluminate cement. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 162, p.314-320, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.012>.

HELENE, Paulo. et al. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **CONCRETO: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 773-808.

JEBLI, M. et al. Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 161, p.16-25, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.100>.

JEBLI, M. et al. Leaching effect on mechanical properties of cement-aggregate interface. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 87, p.10-19, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.018>.

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>.

KANELLOPOULOS, Antonios; PETROU, Michael F.; IOANNOU, Ioannis. Durability performance of self-compacting concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 37, p.320-325, dez. 2012. Elsevier BV.

KANNAN, V. Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 160, p.169-179, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.043>.

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.

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.

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.

KAVITHA, O.R. et al. Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 124-125, p.143-149, maio 2016. Elsevier BV.

KAZMI, Syed M.S. et al. Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 120, p.29-41, set. 2016. Elsevier BV.

KEULEN, A. et al. Effect of admixture on the pore structure refinement and enhanced performance of alkali-activated fly ash-slag concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 162, p.27-36, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.136>.

KONG, Deyu et al. Whether do nano-particles act as nucleation sites for C-S-H gel growth during cement hydration? **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 87, p.98-109, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.007>.

LAVIJA, Branko; LUKOVIĆ, Mladena. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 117, p.285-301, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138>.

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.

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.

LI, Zhuguo; LI, Sha. Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 163, p.668-680, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.127>.

LIEW, K.m.; SOJOBI, A.o.; ZHANG, L.w.. Green concrete: Prospects and challenges. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 156, p.1063-1095, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008>.

LIMA, José Antonio Ribeiro de. **AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS DA PRODUÇÃO DE CONCRETO NO BRASIL PARA AS MUDANÇAS**

CLIMÁTICAS. 2010. 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LIU, Jun et al. Understanding the effect of curing age on the chloride resistance of fly ash blended concrete by rapid chloride migration test. **Materials Chemistry And Physics**, [s.l.], v. 196, p.315-323, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.05.011>.

LIU, Jianhui et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 146, p.702-712, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.154>.

LORCA, P. et al. Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition. **Materials & Design**, [s.l.], v. 64, p.535-541, dez. 2014. Elsevier BV.

LUDOVICO-MARQUES, Marco; CHASTRE, Carlos; VASCONCELOS, Graça. Modelling the compressive mechanical behaviour of granite and sandstone historical building stones. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.372-381, mar. 2012. Elsevier BV.

MADANDOUST, Rahmat et al. Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 110, n. 2, p.144-152, out. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.009>

MADANDOUST, R.; MOUSAVI, S. Y. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. **Construction and Buildings Materials**, v. 35, p. 752-760, 2012.

MAKUL, Natt; SUA-IAM, Gritsada. Effect of granular urea on the properties of self-consolidating concrete incorporating untreated rice husk ash: Flowability, compressive strength and temperature rise. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 162, p.489-502, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.023>.

MEDEIROS, F. K. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. Dissertação de Mestrado, 134 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

MEHTA, P. K., e P. J. M. MONTEIRO. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIRA, P; PAPADAKIS, V.g; TSIMAS, S. Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 32, n. 5, p.683-689, maio 2002. Elsevier BV.

MODANI, Prashant O.; VYAWAHARE, M.r.. Utilization of Bagasse Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 51, p.25-29, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.007>.

MOHAMMED, Mahmoud Khashaa; DAWSON, Andrew Robert; THOM, Nicholas Howard. Carbonation of filler typed self-compacting concrete and its impact on the microstructure by utilization of 100% CO₂ accelerating techniques. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 50, p.508-516, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.052>.

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

NAJIMI, Meysam et al. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 35, p.1023-1033, out. 2012. Elsevier BV.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. Ed. São Paulo: BOOKMAN, 2016.
NIE, Shuai et al. Pozzolanic reaction of lightweight fine aggregate and its influence on the hydration of cement. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 153, p.165-173, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.111>.

NOORT, R. V.; HUNGER, M.; SPIESZ, P.. Long-term chloride migration coefficient in slag cement-based concrete and resistivity as an alternative test method. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 115, p.746-759, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.054>.

NOUSHINI, Amin; CASTEL, Arnaud. The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 112, p.464-477, jun. 2016. Elsevier BV.

OLLIVIER, Jean Pierre; VICHOT, Angélique. Durabilidade do concreto: Bases cimentícias para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: Ibracon, 2014. 615 p.

Okamura, H. & Ouchi M. (2003): Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15.

PANTAWEE, Saksith et al. Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate $[Al_2(SO_4)_3]$ and hydrated lime $[Ca(OH)_2]$ treatment. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 156, p.435-442, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.181>.

PAULON, Vladimir; KIRCHEIM, Ana Paula. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **CONCRETO: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 585-614.

PEREIRA, Adriana et al. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceramics International**, [s.l.], v. 41, n. 10, p.13012-13024, dez. 2015. Elsevier BV.

PIEKARCZYK, Beata. L. The influence of chemical admixtures on cement hydration and mixture properties of very high performance self-compacting concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 49, p.643-662, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.072>.

PLAGUÉ, T.; DESMETTRE, C.; CHARRON, J.-p.. Influence of fiber type and fiber orientation on cracking and permeability of reinforced concrete under tensile loading. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 94, p.59-70, abr. 2017. Elsevier BV.

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.

PRUSTY, Jnyanendra Kumar; PATRO, Sanjaya Kumar; BASARKAR, S.s.. Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. **International Journal Of Sustainable Built Environment**, [s.l.], v. 5, n. 2, p.312-333, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.06.003>.

RAJHANS, Puja; PANDA, Sarat Kumar; NAYAK, Sanket. Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete

ITZ. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 163, p.557-570, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.132>.

SABET, Fereshteh Alsadat; LIBRE, Nicolas Ali; SHEKARCHI, Mohammad. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 44, p.175-184, jul. 2013. Elsevier BV.

SAFIUDDIN, Md.; WEST, J.s.; SOUDKI, K.a.. Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 30, p.833-842, maio 2012. Elsevier BV.

SAMIMI, Kianoosh; KAMALI-BERNARD, Siham; MAGHSOUDI, Ali Akbar. Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 165, p.247-263, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.235>.

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>.

SENSALE, Gemma Rodríguez de. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 32, n. 9, p.718-725, out. 2010. Elsevier BV.

SERRES, Nicolas; BRAYMAND, Sandrine; FEUGEAS, Françoise. Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *Journal Of Building Engineering*, [s.l.], v. 5, p.24-33, mar. 2016. Elsevier BV.

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.

SHAFIGH, Payam et al. Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash. *Materials & Design*, [s.l.], v. 49, p.613-621, ago. 2013. Elsevier BV.

SHEKARCHI, M. et al. Transport properties in metakaolin blended concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 11, p.2217-2223, nov. 2010. Elsevier BV.

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>.

SILVA, P.r. da; BRITO, J. de. Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 86, p.101-112, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.110>.

SINGH, Navdeep; SINGH, S.p.. Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 121, p.400-409, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.009>.

SINGH, Navdeep; SINGH, S.p.. Carbonation and electrical resistance of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 121, p.400-409, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.009>.

SUA-IAM, Gritsada; MAKUL, Natt. Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of self-compacting concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 130, p.32-40, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.033>.

SUA-IAM, Gritsada; MAKUL, Natt. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 57, p.308-319, out. 2013. Elsevier BV.

TAYLOR, H.F.W.; **Cement chemistry**. 2. ed. New York: Thomastelford, 1997. 469 p.

THIERY, M. et al. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 37, n. 7, p.1047-1058, jul. 2007. Elsevier BV.

THOMAS, Blessen Skariah. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 82, p.3913-3923, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>.

TORGAL, F. Pacheco et al. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.141-150, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.066>.

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.

VAN TUAN, Nguyen et al. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 11, p.1104-1111, nov. 2011. Elsevier BV.

VIVEK, S.s.; NARAYANAN, R. Surya; DHINAKARAN, G.. Comparative study on flexural behaviour of RCC beam and SCC ternary beams with mineral admixtures. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 152, p.57-64, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.160>.

WONG, H.s. et al. Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 41, n. 10, p.1067-1077, out. 2011. Elsevier BV.

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.

XIAO, Feng; YIN, Xiaolong. Geometry models of porous media based on Voronoi tessellations and their porosity–permeability relations. **Computers & Mathematics With Applications**, [s.l.], v. 72, n. 2, p.328-348, jul. 2016. Elsevier BV.

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, Guang. Percolation of capillary pores in hardening cement pastes. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.167-176, jan. 2005. Elsevier BV.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H.j.h.. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 55, p.383-394, jan. 2015. Elsevier BV.

YUAN, Qiang et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.1-13, jan. 2009. Elsevier BV.

ZHANG, Z.; WANG, H.. Analysing the relation between pore structure and permeability of alkali-activated concrete binders. **Handbook Of Alkali-activated Cements, Mortars And Concretes**, [s.l.], p.235-264, 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1533/9781782422884.2.235>.

ZINGG, Ludovic et al. Influence of cement matrix porosity on the triaxial behaviour of concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 80, p.52-59, fev. 2016. Elsevier BV.