



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

Thiago Vieira Fonseca

**AValiação DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM BAIXOS CONSUMOS
DE CIMENTO INCORPORANDO METACAULIM, POZOLANA DA CASCA DO
ARROZ, FÍLER CALCARÍO E ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA**

Natal

2016

Thiago Vieira Fonseca

**AVALIAÇÃO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM BAIXOS CONSUMOS
DE CIMENTO INCORPORANDO METACULIM, POZOLANA DA CASCA DO
ARROZ, FÍLER CALCARÍO E ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA**

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

2016

Catálogo na Fonte. UFRN/ Departamento de Odontologia
Biblioteca Setorial de Odontologia “Profº Alberto Moreira Campos”.

Fonseca, Thiago Vieira.

Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, filer calcário e adição de cal hidratada / Thiago Vieira Fonseca. – 2016.

119 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2016.

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

1. Concreto autoadensável - Dissertação. 2. Cal hidratada - Dissertação. 3. Adições minerais - Dissertação. 4. Carbonatação – Dissertação. 5. Indicativos de durabilidade – Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Título.

RN/UF/BSO

CDU 691.32

THIAGO VIEIRA FONSECA

AVALIAÇÃO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM BAIXOS CONSUMOS DE CIMENTO INCORPORANDO METACAULIM, POZOLANA DA CASCA DO ARROZ, FÍLER CALCÁRIO E ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA.

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 (UFRN)

Prof.^a Dr.^a MARIA DAS VITÓRIAS VIEIRA ALMEIDA DE SÁ – Examinadora Interna (UFRN)

Prof.^a Dr.^a ANA CECÍLIA VIEIRA DA NÓBREGA – Examinadora Externa à Instituição (UFPE)

Natal/RN, 15 de dezembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por me dar saúde e força para enfrentar os desafios nessa vida e buscar a realização dos meus sonhos.

Aos meus pais, Fábio e Sílvia Fonseca, e a meus irmãos Lucas e Filipe Fonseca, pelo amor, apoio incondicional e compreensão em todos os momentos.

A minha esposa Adriane Ferreira, companheira de todos os momentos, por todo o amor, carinho, compreensão e estímulo durante toda nossa história.

Ao amigo, professor e orientador Marcos Alyssandro, por toda paciência, dedicação e pela parceria firmada ao longo desse projeto. Que seja o início de muitas outras.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte e aos colegas de trabalho por entenderem a importância da qualificação profissional no serviço público, proporcionando minha licença remunerada para o desenvolvimento desse mestrado durante três importantes meses, além da disponibilidade da estrutura física necessária para realização do programa experimental.

Aos servidores técnicos administrativos e docentes do IFRN, e aos alunos bolsistas do IFRN campus Natal-Central Victor Nesi, Luana Alichelle, Anne Raquel, Maria Grazielle e Aline Santana pelo apoio durante o trabalho experimental.

Aos meus amigos e colegas de mestrado: Cléber Medeiros, Fernanda Karoline, Wesley Fêu, Cinthia Maia, Ítalo Vale, Lucy Kheyler, Ruan Landolfo e Danyel Paiva, pela parceria nas disciplinas e nas pesquisas laboratoriais, sobretudo pela amizade.

Por fim, aos professores do PEC, pelo apoio e transmissão de conhecimento.

A todos, o meu muito obrigado.

AVALIAÇÃO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM BAIXOS CONSUMOS DE CIMENTO INCORPORANDO METACAULIM, POZOLANA DA CASCA DO ARROZ, FÍLER CALCÁRIO E ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA

Thiago Vieira Fonseca

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) possui elevado teor de materiais finos e vem sendo bastante utilizado devido as suas características de alta fluidez e coesão. Os finos provindos de resíduos ou subprodutos industriais podem vir a ser usados em prol da sustentabilidade, minimizando consideravelmente o consumo de cimento associado à possibilidade de manter, ou melhorar, as propriedades mecânicas ou de durabilidade. Desta forma, o presente trabalho investigou a viabilidade do desenvolvimento de CAA's confeccionados com elevados teores de adições minerais e cal hidratada. Para isso, o cimento foi substituído por adições minerais (pozolana da casca do arroz, metacaulim e fíler calcário) no teor de 60%, com base no traço de referência com consumo de 451,1 kg/m³ de cimento, originando novos traços com consumos de cimento entre 167,7 kg/m³ e 173,3 kg/m³. A cal hidratada foi incorporada como adição em três traços no teor de 5% sobre a massa total dos materiais finos. Os CAA's foram caracterizados no estado fresco pelos ensaios de espalhamento, T500, anel-J, funil-V e caixa-L. Para avaliação do desempenho mecânico dos CAA's foram realizados ensaios de resistência à compressão, velocidade do pulso ultrassônico e módulo de elasticidade estático, bem como propriedades de transporte relacionadas à durabilidade: absorção por capilaridade, difusão de íons cloreto, resistividade elétrica e carbonatação. Os CAA's com adições minerais apresentaram desempenho mecânico satisfatório, embora inferiores ao do traço de referência. As resistências à compressão aos 28 dias dos concretos com adições minerais apresentaram redução de 15 a 60% em relação ao traço de referência, mas todos os resultados foram compatíveis com concretos estruturais de acordo com os requisitos da NBR 6118 (ABNT, 2014). Com relação a durabilidade, os concretos com adições minerais apresentaram redução do coeficiente de difusão

de íons cloreto que variaram entre 25,4% e 74,8%. As resistividades elétricas do concreto de referência foram bastante inferiores às dos concretos com adições minerais, mas todas as composições estudadas foram classificadas como provável taxa de corrosão desprezível. As resistividades elétricas sofreram grande redução quando analisadas em amostras carbonatadas. Já a análise da carbonatação acelerada mostrou que a substituição do cimento por adições minerais em elevados teores torna os CAA's bastante suscetíveis a carbonatação. Quanto a adição de cal hidratada, não foi verificada influência positiva no desempenho mecânico dos CAA's estudados, mas observou-se que sua utilização proporcionou redução da profundidade de carbonatação nos CAA's devido a reposição da reserva alcalina.

Palavras-chave: Concreto autoadensável; cal hidratada; adições minerais; carbonatação; indicadores de durabilidade.

EVALUATION OF SELF-COMPACTING CONCRETES WITH LOW CONTENT OF CEMENT INCORPORATING METAKAOLIN, POZZOLAN OF RICE HUSK, LIMESTONE FILLER, AND ADDITION OF HYDRATED LIME

Thiago Vieira Fonseca

Adviser: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) has a high content of fine materials and has been widely used due to its characteristics of high fluidity and cohesion. Fines from industrial waste or by-products may be used for the sake of sustainability, considerably reducing the consumption of cement associated with the possibility of maintaining or improving mechanical or durability properties. In this way, the present work investigated the feasibility of the development of SCC's made with high levels of mineral additions and hydrated lime. For this purpose, the cement was replaced by mineral additives (rice husk pozzolan, metakaolin and limestone filler) in the 60% content, based on the reference mixture with consumption of 451.1 kg / m³ of cement, giving rise to new mixtures with consumption of cement between 167.7 kg / m³ and 173.3 kg / m³. The hydrated lime was incorporated as an addition in three mixtures in the content of 5% on the total mass of the fine materials. The SCC's were characterized in the fresh state by the slump flow test, T500, J-ring, V-funnel and L-box. To evaluate the mechanical performance of the SCC's, tests of compressive strength, ultrasonic pulse velocity and static modulus of elasticity, as well as transport properties related to durability were performed: capillary absorption, chloride ion diffusion, electrical resistivity and carbonation. The SCC's with mineral additions presented satisfactory mechanical performance, although lower than the reference mixture. The compressive strength at 28 days of the concretes with mineral additions showed a reduction of 15 to 60% in relation to the reference mixture, but all the results were compatible with structural concretes according to the requirements of NBR 6118 (ABNT, 2014). Regarding the durability, the concrete with mineral additions presented reduction of the diffusion coefficient of chloride ions that varied between 25.4% and 74.8%. The electrical resistivities of the reference concrete were

much lower than those of the concretes with mineral additions, but all the studied compositions were classified as probable negligible corrosion rates. The electrical resistivities suffered great reduction when analyzed in carbonated samples. The analysis of the accelerated carbonation showed that the substitution of cement by mineral additions at high levels makes the SCC very susceptible to carbonation. As for the addition of hydrated lime, there was no positive influence on the mechanical performance of the SCC's studied, but it was observed that its use provided a reduction of the carbonation depth in the SCC's due to the alkaline reserve.

Keywords: self-compacting concrete; hydrated lime; mineral additions; carbonation; indicative of durability.

Lista de Figuras

Figura 4.1 - Fluxograma dos ensaios.....	49
Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos agregados miúdo (acima) e graúdo (abaixo).....	54
Figura 4.3 - Ensaio de difusão de íons cloreto. FONTE: Medeiros (2016).....	63
Figura 4.4 - Corpo-de-prova cúbico selado com parafina (à esquerda) e câmara de carbonatação (à direita).....	64
Figura 4.5 - Etapas de medição da profundidade de carbonatação: (a) rompimento da amostra com a projeção da linha de corte; (b) face após a separação; (c) aspersão da fenoftaleína para medição da profundidade carbonatada.....	64
Figura 4.6 - Fluxograma de carbonatação e resistividade elétrica.....	65
Figura 4.7 - Mecanismo do ensaio de resistividade elétrica. FONTE: Fabricante PROCEQ.....	66
Figura 4.8 - Ensaio de resistividade elétrica.....	67
Figura 5.1 - DRX do metacaulim e pozolana da casca do arroz.....	71
Figura 5.2 - DRX do fíler calcário e cal hidratada.....	72
Figura 5.3 - MEV do cimento.....	73
Figura 5.4 - MEV do metacaulim.....	73
Figura 5.5 - MEV da pozolana da casca do arroz.....	74
Figura 5.6 - MEV do fíler calcário.....	74
Figura 5.7 - MEV da cal hidratada.....	75
Figura 5.8 – Classificação dos CAA's pelo ensaio de espalhamento.....	78
Figura 5.9 - Classificação dos CAA's pelos ensaios de T500 e funil-V.....	81
Figura 5.10 - Classificação dos CAA's pelos ensaios da caixa-L e anel-J.....	83
Figura 5.11 - Curvas de crescimento das resistências à compressão dos CAA's.....	84
Figura 5.12 – Relação entre resistência à compressão (MPa) e consumo de cimento (Kg/m ³).....	87
Figura 5.13 - Velocidade do pulso ultrassônico dos CAA's.....	89
Figura 5.14 - Módulo de elasticidade estático dos CAA's aos 91 dias.....	91
Figura 5.15 - Absorção de água por capilaridade dos CAA's aos 28 dias.....	93

Figura 5.16 – Absorção de água por capilaridade dos CAA's aos 91 dias.....	95
Figura 5.17 - Coeficientes de absorção por capilaridade dos CAA's aos 28 e 91 dias.....	96
Figura 5.18 - Difusão de íons cloreto nos CAA's aos 28 dias.....	97
Figura 5.19 - Profundidades de carbonatação nos CAA's.....	99
Figura 5.20 - Verificação com fenoftaleína da profundidade de carbonatação das amostras de CAA após 70 dias de exposição na câmara.....	100
Figura 5.21 - Resistividade elétrica das amostras de CAA não carbonatadas.....	101
Figura 5.22 - Resistividade elétrica das amostras de CAA em carbonatação.....	103
Figura 5.23 - Comparativo de resistividade elétrica de amostras carbonatadas e não carbonatadas aos 70 dias.....	104
Figura 5.24 - Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "PCA30MK20F10".....	105
Figura 5.25 - Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "PCA30MK20F10+CaH".....	106
Figura 5.26 – Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "PCA30F30".....	106
Figura 5.27 – Sulfoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "PCA30F30+CaH".....	107
Figura 5.28 – Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "MK30F30".....	107
Figura 5.29 – Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "MK30F30+CaH".....	108
Figura 5.30 - Portlandita encontrada no traço "REFCAA".....	108

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Estimativa da provável taxa de corrosão em função da resistividade elétrica. FONTE: Adaptada de MEHTA e MONTEIRO (2014).....	47
Tabela 4.1 - Massas específicas dos materiais finos no estado anidro.....	53
Tabela 4.2 - Módulo de finura e diâmetro máximo dos agregados.....	53
Tabela 4.3 - Composição dos materiais finos dos CAA's (%).....	55
Tabela 4.4 - Consumo de materiais por metro cúbico das composições de CAA.....	56
Tabela 5.1 - Área superficial específica BET dos materiais finos no estado anidro...	69
Tabela 5.2 - Composição química dos materiais finos no estado anidro.....	70
Tabela 5.3 - Consumo de materiais por metro cúbico das composições de CAA.....	76
Tabela 5.4 - Caracterização dos CAA's no estado fresco.....	77
Tabela 5.5 - Classificação do concreto de acordo com a velocidade do pulso ultrassônico. FONTE: Adaptado de WHITEHURST (1951, apud MADANDOUST e MOUSAVI, 2012).....	88

Sumário

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO	13
1.1 – Objetivos	15
1.1.1 – Objetivo geral	15
1.1.2 – Objetivos específicos	15
CONCRETOS SUSTENTÁVEIS	17
2.1 – Utilização das adições minerais como substitutos parciais do cimento nos CAA's	22
2.1.1 – CAA com incorporação de metacaulim	22
2.1.2 – CAA com incorporação de fíler calcário	26
2.1.3 – CAA com incorporação de cinza da casca do arroz.....	32
2.2 – Concretos com adição de cal hidratada	38
INDICATIVOS DE DURABILIDADE RELACIONADOS AOS MECANISMOS DE TRANSPORTE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA	42
3.1 – Absorção de água por capilaridade	43
3.2 - Difusão de íons cloreto	44
3.3 - Carbonatação acelerada	45
3.4 - Resistividade elétrica	46
MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1 - Caracterização dos materiais	50
4.1.1 - Experimentos realizados.....	50
4.1.2 - Materiais utilizados	52
4.2 - Definição dos traços e procedimento de mistura	55
4.3 – Ensaio do CAA no estado fresco	58
4.3.1 – Espalhamento (Slump Flow Test) e tempo de escoamento (T500)	58
4.3.2 – Funil-V.....	58
4.3.3 – Caixa-L.....	58
4.3.4 – Anel-J.....	59

4.4 – Ensaios do CAA no estado endurecido	59
4.4.1 – Comportamento mecânico	59
4.4.1.1 – Resistência à compressão	59
4.4.1.2 – Velocidade do pulso ultrassônico	60
4.4.1.3 – Módulo de elasticidade	60
4.4.2 – Avaliação dos indicativos de durabilidade	61
4.4.2.1 – Absorção de água por capilaridade	61
4.4.2.2 – Difusão de íons cloreto	62
4.4.2.3 – Carbonatação	63
4.4.2.4 – Resistividade elétrica	66
4.4.3 – Análise da microestrutura	68
RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1 - Caracterização dos materiais anidros	69
5.1.1 - Área superficial BET	69
5.1.2 - Composição química e mineralógica	70
5.1.3 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos materiais finos	72
5.2 - Avaliação do comportamento dos CAA's no estado fresco	75
5.3 - Avaliação do comportamento dos CAA's no estado endurecido	84
5.3.1 – Análise do comportamento mecânico	84
5.3.2 – Indicativos de durabilidade	92
5.4 – Análise da microestrutura dos CAA's	104
CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
6.1 - Conclusões	109
6.2 – Sugestões para trabalhos futuros	111
REFERÊNCIAS	113

CAPÍTULO 1

Introdução

A indústria do concreto é uma grande consumidora dos recursos naturais desde a extração de agregados (brita e areia) até a produção de cimento Portland quando se extrai grandes quantidades de calcário. Além da indústria do concreto consumir os recursos naturais, fundamentais para produção de seus insumos básicos, a indústria do cimento tem grande contribuição nas emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa (DAMINELI *et al.*, 2010; PERLOT *et al.*, 2013).

O concreto é o produto industrializado mais utilizado pela sociedade, e a sua mistura é composta em geral por 12% de cimento Portland, 8% de água, e 80% de agregados miúdos e graúdos (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Logo, a indústria do concreto pode causar impactos ambientais relevantes, positivos ou negativos. Os impactos negativos estão relacionados ao consumo dos recursos naturais e à emissão de gases poluentes. Já os impactos positivos estão relacionados com a possibilidade de aproveitar resíduos de outras indústrias como componentes das misturas, eliminando um possível passivo ambiental e reduzindo o consumo de cimento Portland nos concretos.

Nesse contexto tem-se o concreto autoadensável que foi desenvolvido no Japão, tendo como principal motivação a melhoria da compactação do concreto para obtenção de estruturas mais duráveis. Então, para obter uma melhor compactação, independentemente do nível de qualificação dos trabalhadores, desenvolveu-se o concreto autoadensável que é capaz de se espalhar pelos cantos da forma através da ação exclusiva do seu peso próprio (OKAMURA e OUCHI, 2003).

O concreto autoadensável (CAA) vem ganhando cada vez mais espaço no mercado, pois é um concreto de alta fluidez que pode ser aplicado e adensado sem qualquer tipo de vibração, tendo como principais propriedades do estado fresco a capacidade de preenchimento, a habilidade passante e a resistência à segregação. Para garantir essas propriedades, deve-se utilizar aditivo redutor de água de alta

performance ou superplastificante, e uma grande quantidade de materiais finos ou modificadores de viscosidade (MADANDOUST e MOUSAVI, 2012).

Esses materiais finos, são definidos pela SCCEPG (2005) como materiais de tamanhos de partícula menores que 0,125 mm, que inclui frações de agregados, adições e cimento. Logo, é comum que nos concretos autoadensáveis se tenha grandes consumos de cimento Portland para atender aos requisitos de desempenho do estado fresco e endurecido. Por outro lado, os materiais cimentícios suplementares, as adições minerais pozolânicas ou inertes, podem ser utilizadas como parte desses materiais finos reduzindo o consumo de cimento Portland.

As adições minerais quimicamente ativas são chamadas de materiais pozolânicos. Elas podem ser definidas como materiais silicosos, ou silicoaluminosos, que sozinhos possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas, quando finamente moídos e na presença de água, podem reagir quimicamente com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades ligantes, como o silicato de cálcio hidratado (ABNT NBR 12653, 2014; KAVITHA *et al.*, 2015).

A utilização de materiais pozolânicos reduz a demanda por cimento e pode reduzir o tamanho dos poros, permeabilidade, retração e fluência, além de ser também uma solução econômica, uma vez que o cimento é o componente mais caro do concreto. Além disso, os materiais pozolânicos podem melhorar as propriedades de resistência à compressão, à tração e à flexão, e o módulo de elasticidade do concreto autoadensável (KAVITHA *et al.*, 2015).

As adições minerais proporcionam maior coesão às misturas de CAA, melhorando o empacotamento das partículas (ação física). Além disso, a alta atividade pozolânica conduz a uma embalagem de partícula mais refinada, que é obtida pelos produtos pozolânicos (ação química) e complementam a ação física (SFIKAS *et al.*, 2014). Assim, obtém-se uma diminuição da permeabilidade e, por consequência, melhoria da durabilidade do concreto (UYSAL e YILMAZ, 2011).

Iniciativas que busquem reduzir o consumo de recursos naturais e cimento nos concretos são importantes para a sustentabilidade das construções. Desta forma, os concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais

surtem como uma alternativa para minimizar consideravelmente o consumo de cimento sem prejuízos às suas propriedades.

Contudo, estudos relativos a esse tipo de concreto são recentes e necessitam de mais informações acerca de suas resistências a baixas idades e durabilidade, principalmente quando esses teores ultrapassam 50% do total de cimento, ou o consumo fica abaixo de 260 kg/m³, que é o limite da NBR 12655 (ABNT, 2015).

Esses concretos com reduzidos consumos de cimento, e elevados teores de adições minerais, podem ter grandes problemas com a carbonatação devido a baixa quantidade de hidróxido de cálcio disponível no sistema. Desta forma, a incorporação de cal hidratada pode contribuir com as reações pozolânicas e no controle da carbonatação através da reposição de reserva alcalina.

Portanto, neste trabalho serão realizados estudos sobre concretos autoadensáveis denominados verdes, ou eco eficientes, que utilizam elevados teores de adições minerais na sua composição com o intuito de aproveitar os resíduos de outras indústrias, reduzindo o consumo de cimento Portland e minimizando a energia de lançamento e adensamento do concreto.

1.1 – Objetivos

1.1.1 – Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar, através das propriedades no estado fresco e endurecido, concretos autoadensáveis confeccionados com elevados teores de adições minerais e adição de cal hidratada, analisando comportamento mecânico e indicativos de durabilidade.

1.1.2 – Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento no estado fresco dos CAA's com baixos consumos de cimento, identificando a influência de cada adição mineral.

- Avaliar o comportamento mecânico dos CAA's com baixos consumos de cimento, analisando a influência de cada adição mineral.
- Avaliar as propriedades de transporte indicativas de durabilidade dos CAA's com baixos consumos de cimento frente a carbonatação e difusão de íons cloreto.
- Avaliar a relação da resistividade elétrica dos CAA's com a carbonatação e a difusão de íons cloreto.
- Avaliar a influência da cal hidratada nas propriedades dos CAA's, sobretudo na carbonatação.

CAPÍTULO 2

Concretos sustentáveis

O concreto é provavelmente o material de construção mais utilizado no mundo e a maioria dos concretos utiliza cimento Portland, que na sua fabricação possui um processo energético intenso. Além disso, produz uma grande quantidade de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa, principalmente CO₂, provenientes do calcário no processamento do clínquer. Além de tudo, a indústria do concreto é um dos grandes consumidores dos recursos naturais. Então, a fim de reduzir o consumo de energia e emissão de CO₂, as fábricas de cimento produzem misturas de cimentos compostas com alguns materiais cimentantes suplementares tais como metacaulim, sílica ativa, pozolana natural, cinzas e pedra calcária (RAMEZANIANPOUR e JOVEIN, 2012).

Num futuro próximo, sem a introdução de inovações tecnológicas, as demandas sempre crescentes de materiais a base de cimento nos países em desenvolvimento provocarão um significativo aumento do percentual de participação da indústria do cimento nas emissões de CO₂ no mundo. Então uma estratégia para reduzir as emissões de CO₂ é melhorar a eficiência do uso do cimento. Para isso, tem-se como possibilidades, por exemplo: a utilização de materiais pozolânicos em substituição ao cimento, o uso de aditivos superplastificantes, e maior eficiência do empacotamento das partículas de concreto (DAMINELI *et al.*, 2010).

Para medir a eco eficiência do uso do cimento, Damineli *et al.* (2010) propuseram dois indicadores que têm o desempenho como unidade funcional: a intensidade de ligantes (bi) e a intensidade de CO₂ (ci). Esse desempenho pode ser o mecânico, por exemplo, mas também pode ser outros, possibilitando o desenvolvimento de novos indicadores. Assim, os indicadores propostos por Damineli *et al.* (2010) “bi” e “ci” podem representar, respectivamente, as quantidades de ligantes e de CO₂ necessárias para entregar uma unidade de tensão resistente, tendo como unidade “kg.m⁻³.MPa⁻¹”.

Damineli *et al.* (2010) analisaram 156 trabalhos entre nacionais e internacionais publicados entre 1988 e 2009, e a resistência à compressão aos 28 dias foi utilizada como indicador de desempenho. Com isso, verificou-se que é possível a produção de concretos que, simultaneamente, tenham baixos valores de “bi” e “ci”. Em condições laboratoriais, concretos com “bi” aproximado de $4 \text{ kg.m}^{-3} \cdot \text{Mpa}^{-1}$ e “ci” em torno de $2 \text{ Kg.m}^{-3} \cdot \text{Mpa}^{-1}$ podem ser produzidos.

Do mesmo modo que ocorre com o cimento, sabe-se que nos processos de fabricação de materiais boa parte das emissões de dióxido de carbono, que são a principal responsável para o aquecimento do efeito estufa, são fornecidos pela a fase de tratamento térmico. A temperatura muito elevada da produção do cimento (até 1450°C) compromete a sua sustentabilidade. Além disso, para formar o clínquer volumes importantes de CO_2 são liberados através da descarbonatação da matéria-prima do cimento. Assim, a produção de 1 kg de cimento Portland gera 1 kg de CO_2 (PERLOT *et al.*, 2013).

Já a decomposição do caulim para elaborar a metacaulinita emite baixas quantidades de CO_2 , pois a argila caulinita é queimada em uma faixa de temperatura mais baixa ($650\text{-}750^{\circ}\text{C}$) e, como a matéria-prima é um alumino silicato, não há descarbonatação durante o processo de queima. Então, a pegada de CO_2 de metacaulim é reduzida, aproximadamente 96 kg de CO_2 por tonelada, e poderia atingir valores bastante próximos a zero se a calcinação fosse realizada com biogás, por exemplo. Além disso, menores quantidades de matérias-primas são necessárias para produzir metacaulinita, e melhorias das propriedades do concreto podem ser obtidas, o que torna esse material sustentável (PERLOT *et al.*, 2013).

Uma forma de mitigar o impacto ambiental causado pela produção do cimento é reduzir o seu consumo nos concretos. Essa redução pode ser feita principalmente através da utilização de adições minerais em substituição ao cimento, sendo essas adições resíduos de outras indústrias ou pozolanas naturais que não causem grandes impactos para o meio ambiente relacionados a sua produção, e sejam sustentáveis como a sílica ativa, a cinza volante e o metacaulim, por exemplo (WONGKEO *et al.*, 2014; BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

Nesse contexto da redução do consumo de cimento o CAA pode parecer caminhar para o lado contrário uma vez que ele necessita de elevados teores de

materiais finos para atender aos requisitos do estado fresco, o que poderia levar a altos consumos de cimento. No entanto, isso não é verdade, pois vários trabalhos mostram que é possível produzir CAA com reduzidos consumos de cimento através da utilização de materiais cimentantes complementares e aditivos químicos superplastificantes (ANJOS *et al.*, 2015; WONGKEO *et al.*, 2014).

Todos os tipos de adições minerais, ou seja, inertes ou pozolânicas, podem ser utilizadas. Mas, cada tipo de adição tem efeitos diferentes nas propriedades do concreto fresco, endurecido e durabilidade, com suas vantagens e desvantagens. Suas vantagens podem ser exploradas através da combinação de várias adições minerais, incrementando assim o nível de substituição de cimento (LE e LUDWIG, 2016).

Contudo, não há uma norma brasileira que defina o consumo mínimo de cimento especificamente para o CAA. A NBR 12655 (ABNT, 2015) define para concretos convencionais que o consumo mínimo de cimento referente a classe de agressividade I, classificada como fraca pela NBR 6118 (ABNT, 2014), é de 260 kg/m³. Além disso, para essa classificação o concreto deve obter resistência mínima de 20 MPa para elementos estruturais de concreto armado e 25 MPa para elementos de concreto protendido.

Por outro lado, alguns trabalhos estudaram concretos com consumos inferiores ao previsto na norma, avaliando seu desempenho mecânico e de durabilidade. Em composições com utilização de adições minerais foram observadas resistências à compressão aos 28 dias da ordem de 32 MPa, 61 MPa e 71 MPa para consumos de 150 kg/m³, 180 kg/m³ e 220 kg/m³, respectivamente (UYSAL *et al.*, 2012; WONGKEO *et al.*, 2014, ANJOS *et al.*, 2015). Esses consumos são menores que 260 kg/m³, no entanto proporcionaram valores de resistência à compressão superiores ao exigido pela NBR 12655 (ABNT, 2015).

Desta forma, verifica-se que é possível utilizar baixos consumos de cimento nos concretos convencionais (normalmente vibrados) e autoadensáveis. Entretanto, devido à alta demanda de materiais finos dos CAA's, trabalhos com baixos consumos de cimento são mais raros nesse tipo de concreto. A maior parte dos estudos sobre CAA's com adições minerais utiliza consumos de ligantes que variam entre 420 a 580 kg/m³, e de cimento entre 295 e 425 kg/m³ (SAFIUDDIN *et al.*, 2010;

UYSSAL e YILMAZ, 2011; KAVITHA *et al.*, 2015; MOHAMMED *et al.*, 2014a; LE e LUDWIG, 2016), consumos esses maiores que o mínimo previsto na NBR 12655 (ABNT, 2015).

Rebmann (2011) estudou concretos convencionais com elevadas resistências e consumos de cimento que variaram de 200 kg/m³ a 280 kg/m³, sílica ativa entre 12 e 17 kg/m³, além de 6 kg/m³ de metacaulim, aproximadamente 50 kg/m³ de filer, e aditivo superplastificante. As composições estudadas por Rebmann (2011) apresentaram abatimentos acima de 170 mm, com resistência à compressão aos 28 dias entre 30 e 68 MPa, e entre 32 e 83 MPa aos 93 dias, provando ser possível obter resultados satisfatórios de resistência à compressão mesmo com reduzidos consumos de cimento.

Para as mesmas misturas citadas anteriormente, em que Rebmann (2011) avaliou a resistência à compressão, foram realizados também ensaio de carbonatação acelerada em câmara com concentração de CO₂ de 5%, e a frente de carbonatação das amostras foi verificada após 6, 14, 28, 56 e 96 dias na câmara. Assim, os resultados desse ensaio mostraram que há uma influência do tipo de cimento utilizado, pois as misturas com cimento CP V-ARI apresentaram profundidades de carbonatação mais baixas que as misturas com cimento CP III.

Anjos *et al.* (2015) estudaram concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais, em que os traços estudados utilizaram consumo de ligantes igual a 500 kg/m³, e o consumo de cimento entre 150 a 200 kg/m³, sendo avaliada ainda uma mistura de referência com consumo de 500 kg/m³ de cimento. Na dosagem dos traços com baixos consumo de cimento foram substituídos 60 e 70% do cimento do traço de referência por cinzas volantes e metacaulim. Além disso, a cal hidratada foi utilizada como adição, e não substituição, no percentual de 5% do total de ligantes (25 kg/m³) para ajudar na ativação do material pozzolânico por hidróxido de cálcio.

Desta forma, Anjos *et al.* (2015) verificaram ser possível o desenvolvimento de CAA's com baixos consumos de cimento uma vez que as misturas estudadas atenderam aos requisitos do estado fresco propostos pela SCCEPG (2005), além de apresentarem resultados de resistência à compressão que variaram entre 25 e 40 MPa aos 28 dias, e entre 35 e 58 MPa aos 91 dias. Sobre a durabilidade desses

concretos, percebeu-se que todas as misturas apresentaram menores coeficientes de difusão (entre 3,84 e 6,61) que a mistura de referência (14,52), e que a mistura com metacaulim apresentou o melhor resultado.

O bom desempenho das misturas com metacaulim se deve ao fato do coeficiente de difusão ser dependente da estrutura de poros do concreto, da interação dos cloretos com a fase aluminato do cimento hidratado e com o efeito físico dos poros que tende a fixar esses cloretos nas paredes (ANJOS *et al.*, 2015).

Foi verificado também por Anjos *et al.* (2015) que todos os traços com adições minerais apresentaram maiores resistividades que o traço de referência, sendo o maior resultado do traço com metacaulim. Percebeu-se também que os traços com adições minerais apresentaram profundidades de carbonatação maiores que o traço de referência e que a adição de cal hidratada conseguiu minimizar o efeito da carbonatação nos traços com adições minerais.

Wongkeo *et al.* (2014) analisaram a influência da cinza volante de alto cálcio e sílica ativa para misturas binárias e ternárias na resistência à compressão e na difusão de íons cloreto em concretos autoadensáveis. Essas adições foram utilizadas para substituir o cimento nos percentuais de 50, 60 e 70%. O menor consumo de cimento estudado foi de 135 kg/m³ para um total de 450 kg/m³ de ligantes composto por cimento, cinza volante e sílica ativa.

Desta forma, para os traços com 70% de substituição de cimento por cinza volante e sílica ativa, e consumo de cimento de 135 kg/m³, Wongkeo *et al.* (2014) obtiveram resultados de resistência à compressão aos 28 dias que variaram entre 28,2 e 33,1 MPa. E, analisando a resistência a penetração de íons cloreto foi verificado que a utilização de adições minerais pode melhorar os resultados em até 90% aproximadamente. Isso ocorre devido ao refinamento da estrutura porosa do concreto ocasionado pelas reações pozolânicas das adições minerais que produzem C-S-H adicional.

2.1 – Utilização das adições minerais como substitutos parciais do cimento nos CAA's

2.1.1 – CAA com incorporação de metacaulim

O metacaulim é uma adição mineral produzida a partir da argila caulinítica calcinada entre as temperaturas de 650-800°C para proporcionar aumento de sua atividade pozolânica, e sua principal característica é a elevada reatividade com hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , e a capacidade de acelerar a hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014; BADOGIANNIS *et al.*, 2015; KAVITHA *et al.*, 2015).

Essa pozolana natural é um material alumino-silicato, composta basicamente por SiO_2 e Al_2O_3 , ativado termicamente e sem produção de CO_2 (MADANDOUST e MOUSAVI, 2012; VEJMEJKOVA *et al.*, 2011). Em comparação com outras adições minerais, como a sílica ativa e a cinza volante, se espera que a ação pozolânica do metacaulim seja mais significativa devido a sua elevada concentração de sílica e alumina (BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

O processamento do metacaulim envolve temperaturas mais baixas do que o cimento Portland, o que pode proporcionar menor custo de produção. Mas, devido a sua baixa demanda, e a questões de mercado, o seu preço é elevado. Desta forma, a principal motivação da utilização do metacaulim em CAA's está mais relacionada aos benefícios ambientais e tecnológicos, do que econômicos (MADANDOUST e MOUSAVI, 2012; VEJMEJKOVA *et al.*, 2011; SFIKAS *et al.*, 2014; BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

- Propriedades no estado fresco

A utilização de metacaulim como substituto parcial do cimento em CAA's causa diminuição da capacidade de preenchimento. Esse fato pode ser observado com a diminuição do diâmetro de espalhamento no ensaio de slump flow test na medida em que o teor de substituição de cimento por metacaulim é aumentado e a relação água/finos e o teor de aditivo superplastificante são mantidos constantes. Ou, também pode ser percebido com aumento da demanda de aditivo

superplastificante em misturas com maior percentual de metacaulim para manter um mesmo padrão de espalhamento (VEJMELOVÁ *et al.*, 2011; KANNAN e GANESAN, 2014; MADANDOUST e MOUSAVI, 2012; KAVITHA *et al.*, 2015; SFIKAS *et al.*, 2014).

Kannan e Ganesan (2014) e Vejmelková *et al.* (2011) afirmam que a diminuição da capacidade de preenchimento é devido a alta reatividade e maior área superficial do metacaulim comparado ao cimento. Já Sfikas *et al.* (2014) acrescenta que o formato irregular das partículas do metacaulim também contribui para a diminuição da capacidade de preenchimento. Assim, a ação do aditivo redutor de água de alta performance, ou superplastificante, é de grande relevância.

Segundo Madandoust e Mousavi (2012) esses aditivos aumentam a fluidez pela redução da tensão de escoamento e viscosidade plástica. Além disso, eles podem proporcionar maior espalhamento através da sua dispersão diminuindo o grau de aprisionamento de água entre as partículas.

A perda da capacidade de preenchimento ocasionada pelo aumento do teor de substituição do metacaulim também pode ser verificada com o aumento dos tempos de funil-V e T500, o que mostra que a adição de metacaulim torna o CAA mais viscoso. Além disso, com o aumento do teor de metacaulim como substituto parcial do cimento, ocorre também uma perda da habilidade passante que pode ser observada pela diminuição da razão de bloqueio no ensaio da caixa-L (MADANDOUST e MOUSAVI, 2012; KANNAN e GANESAN, 2014; SFIKAS *et al.*, 2014).

Diante disso, pode-se dizer que o metacaulim contribui para o aumento da viscosidade do CAA, e impede a segregação. Em virtude disso, uma maior quantidade de aditivo superplastificante pode ser necessária para manter a trabalhabilidade dos CAA's com metacaulim (PERLOT *et al.*, 2013).

- Propriedades no estado endurecido

Segundo Kannan e Ganesan (2014), a substituição de cimento por metacaulim em teores de até 30% proporciona resistências à compressão maiores

que as composições de referência (apenas com cimento). Entretanto, foi observado que as resistências evoluem com o aumento do teor de substituição até o limite de 20%, e, decrescem com o aumento do teor de substituição de cimento por metacaulim entre 20% e 30%.

Além disso, Kannan e Ganesan (2014) também verificaram que para teores de substituição de cimento por metacaulim até 30% obtém-se menores absorções por capilaridade e maior resistência à migração de íons cloreto, sendo a menor absorção observada para substituição de 5% de metacaulim e a maior resistência à cloretos para a substituição de 30%.

Segundo Perlot *et al.* (2013), além de ter elevada atividade pozolânica, o metacaulim favorece a hidratação do cimento através de um efeito físico, devido à sua elevada área superficial e acelera a hidratação do cimento através da sua composição química e da modificação da composição iônica da solução dos poros. No curto prazo, esta ativação de cimento anidro na presença de metacaulim acelera o endurecimento dos materiais cimentantes.

De acordo com Madandoust e Mousavi (2012), substituições de 5% a 20% de cimento por metacaulim proporcionam aumento de resistência com relação a um traço de referência, sendo o percentual ideal de substituição entre 10% e 15%. Uma tendência semelhante pôde ser observada nos resultados da velocidade do pulso ultrassônico. O aumento da resistência à compressão nas misturas com metacaulim foi atribuído a: efeito fíler das partículas de metacaulim; aceleração da hidratação do cimento; e reação pozolânica do metacaulim com hidróxido de cálcio.

Madandoust e Mousavi (2012) também relatam que a incorporação de metacaulim proporciona aumento de resistência à compressão aos CAA's tanto em idades precoces (3 – 14 dias), como a longo prazo (28 – 56 dias), e, que o aumento nas primeiras idades é devido a rápida reação pozolânica do metacaulim.

Já para Sfikas *et al.* (2014) o metacaulim pode substituir o cimento ou o fíler calcário em teores de até 20%, obtendo-se os melhores resultados de resistência à compressão para o maior percentual de substituição. Verificou-se também que independente do material substituído, maiores teores de metacaulim levam a maiores valores de resistência à compressão em função de sua atividade pozolânica.

Além disso, Sfikas *et al.* (2014) também observaram que ação pozolânica do metacaulim parece completa até os 28 dias, obtendo um acréscimo de resistência aproximado de 10% entre as idades de 28 e 360 dias para o traço com 20% de substituição. Por sua vez, Vejmelková *et al.* (2011) afirma que a incorporação de metacaulim substituindo o cimento em misturas de CAA proporcionam maiores resistências principalmente nas primeiras idades. Diante disso, pode-se dizer que a reação pozolânica do metacaulim é considerada rápida (SFIKAS *et al.* 2014; KAVIHTA *et al.*, 2015).

- Durabilidade

Na perspectiva de Madandoust e Mousavi (2012), a incorporação de metacaulim em misturas de CAA contribui para diminuição da absorção de água devido ao efeito fíler e às reações pozolânicas. Foi relatado também, que um outro ganho da incorporação de metacaulim é quanto a resistividade elétrica, pois o aumento do teor de metacaulim incorporado ao CAA eleva a sua resistividade.

Outros resultados experimentais mostram que o uso de metacaulim aumenta drasticamente a resistividade elétrica do concreto convencional, sendo cerca de 2 a 4 vezes superior para o traço com 15% de substituição de cimento por metacaulim em relação a um traço de referência sem adição mineral (RAMEZANIANPOUR e JOVEIN, 2012).

Para Badogiannis *et al.* (2015) a substituição de cimento por metacaulim no CAA em percentuais de até 20% proporcionam diminuição da absorção por capilaridade de maneira quase linear, atingindo-se até 41% de redução em comparação com um traço de referência. Além disso, foi observado que esses níveis de substituição de cimento por metacaulim também proporcionam redução de permeabilidade a gás de até 34%, e redução do coeficiente de migração de íons cloreto de até 96%.

Anjos *et al.* (2015) também obtiveram grandes percentuais de redução de difusão de íons cloreto em composições de CAA com metacaulim, entre 67 e 74% com relação ao traço de referência. O metacaulim é rico em alumina, e segundo

Uysal *et al.* (2012) e Wongkeo *et al.* (2014) a alumina colabora para o aumento da resistência a difusão de ions cloreto.

Perlot *et al.* (2013) explicam que o metacaulim atua em diferentes escalas da porosidade da matriz cimentícia refinando a microestrutura, ou seja, diminuindo o diâmetro médio dos poros. Desta forma, a performance de durabilidade é melhorada, pois é governada pela estrutura de poros fina e pelas suas conectividades.

Por outro lado, a utilização de metacaulim em substituição ao cimento no CAA favorece a carbonatação, pois as misturas ficam com quantidade reduzida de portlandita livre, uma vez que esta foi consumida nas reações pozolânicas. Mas, o efeito da carbonatação também é regido pela relação água/finos, então, mesmo utilizando metacaulim e reduzindo a quantidade de portlandita livre, um baixo fator água/finos pode minimizar satisfatoriamente a carbonatação do CAA (PERLOT *et al.*, 2013).

2.1.2 – CAA com incorporação de fíler calcário

O fíler calcário é obtido em pedreiras de rocha calcária e produzido como subproduto dos trituradores de pedra. Esse material consiste de calcário pulverizado cujo principal componente é o carbonato de cálcio (CaCO_3) ou calcita. O emprego desse material em CAA's vem sendo bastante estudado principalmente devido ao melhoramento da matriz cimentícia pela sua função de preenchimento, que proporciona melhorias das propriedades do CAA e redução do consumo de cimento (UYSAL *et al.*, 2012; MOHAMMED *et al.*, 2014a; SILVA e BRITO, 2015; MOHAMMED *et al.*, 2014b; GESOGLU *et al.*, 2012).

A finalidade da utilização de agentes de enchimento em materiais multifásicos é para melhorar a distribuição de partículas do esqueleto granular das misturas, reduzindo assim a fricção interpartículas e assegurando um melhor empacotamento das partículas do sistema (SUA-IAM *et al.*, 2016).

- Propriedades no estado fresco

A utilização de fíler calcário como substituto do cimento em percentuais de até 30% proporciona maior capacidade de preenchimento dos CAA's, que pode ser observada através do aumento do diâmetro de espalhamento no ensaio de slump flow. Isso se explica pela menor área superficial específica das partículas de fíler em comparação com as de cimento, o que reduz a demanda de água da mistura (UYSAL e YILMAZ, 2011; UYSAL *et al.*, 2012). Entretanto, isso não ocorre sempre, pois em alguns casos as partículas de fíler podem apresentar área superficial específica maior que o cimento.

Nos casos em que o fíler apresenta área superficial específica menor que o cimento também são percebidas melhoras na habilidade passante desses traços. Uysal e Yilmaz (2011) e Uysal *et al.* (2012) verificaram através do ensaio de caixa-L que todas as composições de CAA com substituição de cimento por fíler em teores de até 30% apresentaram resultados de razão de bloqueio maiores que o traço de referência.

No trabalho de Silva e Brito (2015) foi utilizado um filer calcário com área superficial específica (Blaine) maior que a do cimento. Esse filer substituiu 30% do cimento em relação a uma composição de CAA de referência com 707 kg/m³ de cimento. Então, mantendo-se o teor de aditivo em aproximadamente 1%, observou-se aumento da viscosidade do CAA através da diminuição do diâmetro de espalhamento no slump flow e do aumento do tempo no funil-V.

Silva e Brito (2015) ainda verificaram perda de habilidade passante do CAA pela diminuição da razão de bloqueio no ensaio da caixa-L. Contudo, os resultados apresentados pelas composições de CAA com fíler calcário foram compatíveis com os parâmetros desejados para o estado fresco.

Gesoglu *et al.* (2012) também utilizaram um fíler calcário com área superficial específica (Blaine) maior que a do cimento e verificaram comportamento do CAA semelhante ao observado por Silva e Brito (2015). Deste modo, foram realizadas substituições de cimento por fíler calcário nos percentuais de 5 a 20% em CAA's e

aumentou-se o teor de aditivo superplastificante para obtenção de diâmetros de espalhamento na mesma classe do traço de referência.

Já o ensaio de T500 revelou tempos menores para os traços com fíler calcário em relação ao traço de referência, enquanto o funil-V mostrou resultados maiores. Contudo, as análises de T500 e funil-V classificaram as amostras de CAA estudadas por Gesoglu *et al.* (2012) na mesma classe de viscosidade. Ainda assim foi realizada análise dessas misturas com reômetro e confirmou-se que o aumento do teor de substituição de cimento por fíler calcário torna realmente as misturas mais viscosas.

Sua-iam *et al.* (2016) estudaram composições de CAA com substituição de cimento por fíler calcário e cinza da casca do arroz em teores totais de até 20%, sendo 10% de cada. As composições apresentaram as mesmas relações água/finos e teores de aditivo. Além disso, o fíler calcário e a cinza da casca do arroz utilizados apresentaram áreas superficiais específicas maiores que a do cimento.

Assim, verificaram que o espalhamento das misturas contendo adições minerais era ligeiramente menor do que a da mistura sem adições, o que corrobora Gesoglu *et al.* (2012) e Silva e Brito (2015). Com relação a caixa-L, os CAA's com adições minerais apresentaram menores razões de bloqueio do que o traço de referência. Já no funil-V os CAA's com adições minerais apresentaram maiores tempos de escoamento.

Esses resultados obtidos por Sua-iam *et al.* (2016) se justificam pelo aumento da demanda de água devido a maior área de superfície das partículas de cinza da casca do arroz e do fíler calcário nas misturas contendo adições minerais. Tanto a área de superfície como a forma das partículas nas misturas de CAA são importantes na determinação de características de fluxo de espalhamento (SUA-IAM *et al.*, 2016).

Sua-iam *et al.* (2016) também verificaram que a substituição de 20% de cimento por fíler calcário apresentou menor tempo de escoamento no slump flow em relação ao traço de referência. Esse comportamento foi relacionado com uma falta de coesão da mistura com fíler. Por outro lado, essa mesma composição apresentou maior tempo de funil-V, o que indica viscosidade mais alta. Assim, eles definem que a incorporação de fíler calcário geralmente torna o CAA mais viscoso, aumentando a densidade do empacotamento e reduzindo a resistência ao escoamento.

- Propriedades no estado endurecido

O fíler calcário não tem atividade pozolânica, por isso esse material atua como uma carga inerte, ou seja, tem apenas efeito de enchimento. Assim, ao substituir o cimento ele ocasiona diminuição da resistência à compressão. Em substituições de 10 a 30% do cimento em composições de CAA pode-se ter redução de resistência de 8 a 20%, aproximadamente (UYSAL *et al.*, 2012).

Além disso, o aumento do percentual de substituição de fíler calcário por cimento, entre 10 e 30%, causa aos 28 dias uma pequena redução na velocidade do pulso ultrassônico (entre 3 e 9%, aproximadamente) e uma significativa redução nos módulos de elasticidade estático (entre 7 e 16%, aproximadamente) e dinâmico (entre 4 e 12%, aproximadamente) (UYSAL *et al.*, 2012).

Silva e Brito (2015) observaram que o aumento do teor de substituição de cimento por fíler calcário em CAA's reduz a resistência à compressão. Ao substituírem 30% de cimento por fíler calcário numa composição de referência com 707 kg/m³ de cimento eles verificaram uma redução aproximada de 16% na resistência à compressão. Ao substituir o cimento por 10% de fíler calcário e 20% de cinza volante a redução foi de aproximadamente 15%.

Sua-iam *et al.* (2016) utilizaram composições de CAA com substituições de cimento por fíler calcário e cinzas da casca do arroz em teores até 20%, sendo 10% de cada. Assim, verificaram que a velocidade do pulso ultrassônico aumenta com a evolução da resistência à compressão das composições de CAA. Além disso, verificou-se que a composição com 20% de fíler calcário apresentou os maiores resultados de velocidade do pulso ultrassônico e resistência à compressão, até quando comparada a composição com 20% de cinza da casca do arroz.

As propriedades de resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico são afetadas pela redução da porosidade e refinamento dos poros. Então, os resultados obtidos por Sua-iam *et al.* (2016) se justificam pela maior finura apresentada pelo fíler calcário em relação a cinza da casca do arroz e o cimento, o que lhes permitiu preencher micro espaços vazios na mistura de cimento.

Nessa perspectiva, pode-se dizer que a melhoria na resistência à compressão essencialmente surge a partir de um "efeito de enchimento ou efeito fíler", pelo qual, o material proporciona um aumento da compacidade, melhoria mecânica da microestrutura da matriz e da zona de transição que conduzem a um aumento da resistência à compressão (SUA-IAM *et al.*, 2016).

- Durabilidade

Silva e Brito (2015) compararam a absorção por capilaridade de misturas binárias e ternárias de CAA utilizando fíler calcário e cinza volante. Com isso, verificaram que nas misturas binárias o coeficiente de absorção capilar aumenta com o incremento do teor de adição mineral substituindo o cimento, seja fíler calcário ou cinza volante.

Por outro lado, Silva e Brito (2015) também observaram que as composições binárias de fíler calcário apresentaram maiores coeficientes de absorção por capilaridade do que as composições com cinza volante. Isso ocorre em função das misturas com fíler calcário apresentarem tamanhos de poros maiores que as misturas de cinza volante, embora tenham menor porosidade total.

Já na análise das misturas ternárias, Silva e Brito (2015) observaram os melhores resultados, confirmando o efeito positivo da sinergia entre o fíler calcário e a cinza volante na redução da absorção por capilaridade, principalmente nas composições com 10% de fíler e 20% de cinza volante, e na composição de 20% de fíler e 10% de cinza volante.

Assim, esse efeito positivo da sinergia entre o fíler calcário e a cinza volante é explicado por Silva e Brito (2015) como sendo devido a aceleração da hidratação do cimento ocasionada pela presença do fíler calcário através de um efeito local de nucleação. Mounanga *et al.* (2011) complementa que esta hidratação acelerada envolve uma produção mais rápida de Ca(OH)_2 e, assim, um aumento na taxa de reação pozolânica.

De acordo com Hoppe Filho (2008), o material inerte propicia aceleração das reações de hidratação devido à maior dispersão das partículas do cimento e à maior

disponibilidade de pontos para a precipitação dos hidratos. Além disso, esse material inerte pode ter influência na redução do volume de vazios da pasta hidratada.

Segundo Uysal *et al.* (2012), para CAA's com 550 kg/m³ de cimento, a utilização de percentuais de substituição do cimento por fíler calcário de 10 e 20% diminuem a permeabilidade a íons cloreto com relação ao traço de referência. Entretanto, o melhor resultado foi para a substituição de 10% que apresentou aproximadamente 20% de redução. Já com relação a permeabilidade à água, todos os traços apresentaram resultados superiores ao traço de referência e foi percebido o aumento progressivo com o incremento do percentual de substituição.

Mohammed *et al.* (2014b) analisaram a penetração de íons cloreto em composições de CAA com 450 kg/m³ de materiais finos e para isso produziram um traço de referência e outros com percentuais de substituição de 33,3% de cimento por adições minerais de fíler calcário, cinza volante e sílica ativa. Com isso, percebeu-se que a utilização de fíler calcário aumentou a velocidade de penetração de cloretos em relação aos outros traços estudados.

A penetração de íons cloreto pode ser bastante influenciada pela percolação nos poros da zona de transição interfacial pasta-agregado. Então, como a composição com fíler calcário apresentou a maior espessura de zona de transição interfacial entre pasta e agregado, e o maior grau de interligação entre os poros da zona de transição, esse deve ter sido o principal fator para justificar a sua menor resistência à penetração de íons cloreto (MOHAMMED *et al.*, 2014b).

A aglomeração de fíler calcário mais grosso, e não reativo, próximo a zona de transição pode ter contribuído para o aumento da espessura dessa região. A presença de quantidades elevadas de portlandita ou fíler calcário não reativo e a falta de géis de CSH também foi observada nesta região. Além disso, a interligação dos poros é mais influente na migração dos íons cloreto do que a própria porosidade isolada (MOHAMMED *et al.*, 2014b).

Em outro estudo, Mohammed *et al.* (2014a) analisaram a carbonatação em composições de CAA com 450 kg/m³ de finos, sendo 150 kg/m³ de fíler calcário em uma delas e nas outras 150kg/m³ de outros materiais pozolânicos (cinza volante e sílica ativa). Com isso, observou-se que as misturas com fíler calcário apresentaram maiores profundidades de carbonatação em todas as idades.

Ainda que as misturas com fíler calcário tenham apresentado maiores percentuais de hidróxido de cálcio livre (CH), a estrutura porosa apresentou um maior percentual de macroporos, demonstrando que para esse caso os fatores físicos foram mais relevantes que os químicos (MOHAMMED *et al.*, 2014a).

2.1.3 – CAA com incorporação de cinza da casca do arroz

Cascas de arroz ou palhas de arroz, são as carapaças produzidas durante a operação de beneficiamento do arroz colhido. Cada tonelada de arroz colhido produz cerca de 200 kg de casca que, na combustão, produz aproximadamente 40 kg de cinza (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Normalmente, esse resíduo é descartado diretamente no meio ambiente, despejado ou queimado em pilhas sobre os campos abertos, resultando em grave poluição ambiental (LE e LUDWIG, 2016).

A cinza da casca do arroz pode ser altamente pozolânica se produzida por combustão controlada em temperaturas de 600 a 800°C, onde a sílica se mantém na forma não-cristalina em uma microestrutura celular com área superficial elevada. Além disso, é composta de aproximadamente 90% de sílica e quando finamente moída possui alta reatividade, sendo utilizada em compostos cimentícios para reduzir a porosidade e a largura da zona de transição interfacial pasta-agregado. (KANNAN e GANESAN, 2014; SAFIUDDIN *et al.*, 2012; CHOPRA *et al.*, 2015).

Então, como a casca do arroz constitui um percentual considerável da produção total do arroz, ela acaba por representar um grande passivo ambiental que pode ser reduzido com a utilização das cinzas em CAA's. Além disso, a utilização dessa cinza pode ajudar a reduzir o consumo de cimento dos CAA's tornando-os mais sustentáveis e contribuindo para reduzir a emissão de gases poluentes da atmosfera oriundos da indústria do cimento, que são causadores do efeito estufa (SAFIUDDIN *et al.*, 2010; LE e LUDWIG, 2016).

- Propriedades no estado fresco

A elevada área superficial específica da cinza da casca do arroz aumenta a capacidade de retenção de água e a viscosidade da mistura de CAA que são necessárias para evitar a segregação. No entanto, a área superficial específica extremamente elevada dessa cinza pode causar problemas de perda da capacidade de enchimento e habilidade passante do CAA, mas isso pode ser superado utilizando um aditivo superplastificante eficiente (SAFIUDDIN *et al.*, 2012).

A capacidade de preenchimento de um CAA de alto desempenho é propensa a diminuir com a menor relação água/finos e maior teor de cinza da casca do arroz, principalmente devido à maior área de superfície da casca do arroz. Para um dado diâmetro de espalhamento, a demanda de água aumenta com uma maior área superficial dos ligantes e, portanto, uma dosagem mais elevada de aditivo superplastificante é necessária para alcançar o espalhamento almejado (SAFIUDDIN *et al.*, 2010).

Kannan e Ganesan (2014) observaram que o aumento do teor de substituição de cimento por cinza da casca do arroz diminui o diâmetro de espalhamento no slump flow, considerando o fator água/finos e o teor de aditivo superplastificante constantes. Isso significa uma diminuição da capacidade de preenchimento, influência semelhante à do metacaulim, pois a cinza da casca do arroz também apresenta alta reatividade e maior área superficial específica que o cimento.

A comprovação da perda de capacidade de preenchimento do CAA com substituição do cimento por cinza da casca do arroz também pode ser verificada com o aumento dos tempos no ensaio do funil-V. Além disso, observa-se uma perda de habilidade passante do CAA através da diminuição da razão de bloqueio no ensaio da caixa-L com o aumento do teor de substituição de cimento por cinza da casca do arroz (KANNAN e GANESAN, 2014).

Le e Ludwig (2016) utilizaram cinza da casca do arroz como substituto parcial do cimento em teores de até 20%, combinada a outros 20% de substituição de cinza volante, em relação a um traço de referência com 625 kg/m³ de cimento. A cinza da casca do arroz utilizada apresentou a maior área superficial entre todos os materiais

finos. Além disso, todas as composições apresentaram o mesmo fator água/finos e o mesmo teor de aditivo superplastificante.

Assim, as investigações no estado fresco de Le e Ludwig (2016) corroboram Kannan e Ganesan (2014), pois mostraram que o aumento do teor de cinza da casca do arroz ocasionou diminuição da capacidade de enchimento e de habilidade passante, observadas pela diminuição do diâmetro de espalhamento no slump flow, aumento do tempo no funil-V e aumento do desnível no anel-J.

Segundo Le e Ludwig (2016), esse comportamento ocasionado pela utilização da cinza da casca do arroz demonstra a sua capacidade de tornar o CAA mais viscoso, pois a cinza da casca do arroz é um material com uma elevada área superficial específica e com uma demanda de água mais elevada que o cimento.

- Propriedades no estado endurecido

Segundo Kannan e Ganesan (2014) a utilização de cinza da casca do arroz como substituo parcial do cimento em CAA's proporciona ganhos de resistência à compressão para teores de até 25% de substituição. Contudo, quando combinada ao metacaulim em igual proporção, o efeito sinérgico dessas adições é satisfatório, pois em teores de até 40% de substituição do total de cimento são observados resultados melhores que a composição de referência.

Já Safiuddin *et al.* (2010) utilizaram substituições de cimento por cinza da casca do arroz em percentuais de até 30%. Com isso, foi percebido que o aumento do teor de cinza da casca do arroz na mistura elevou consideravelmente (mais de 10%) a resistência à compressão, e de maneira mais branda a velocidade do pulso ultrassônico.

Isso se justifica pelo efeito micro fíler e atividade pozolânica que melhoraram a microestrutura porosa da matriz cimentícia e da zona de transição. A cinza da casca do arroz possibilita isso devido a sua elevada finura, maior que a do cimento, verificada pela área superficial Blaine. Essa elevada finura possibilitou preencher os vazios entre as partículas de cimento, melhorando o efeito fíler, além de ter tornado

a cinza mais reativa e capaz de produzir com mais eficiência o C-S-H adicional (SAFIUDDIN *et al.*, 2010).

Chopra *et al.* (2015) utilizaram a cinza da casca do arroz como substituto parcial do cimento em teores de até 20% em misturas de CAA, tendo um traço de referência com consumo de 550 kg/m³ de cimento. Todos os traços estudados apresentaram a mesma relação água/finos e teor de aditivo superplastificante. Os resultados dos testes de resistência à compressão mostraram que para todos os níveis de substituição foram obtidas resistências maiores que o traço de referência, principalmente aos 56 dias.

Chopra *et al.* (2015) relatam que a melhoria da resistência à compressão com a substituição do cimento pela cinza da casca do arroz é principalmente devido à capacidade de enchimento micro e a atividade pozolânica da cinza. Devido a cinza ser altamente reativa, ela reage com o hidróxido de cálcio (um subproduto da hidratação do cimento) e produz C-S-H adicional. Esse C-S-H adicional reduz a porosidade do concreto, preenchendo os poros capilares e melhorando a microestrutura da matriz cimentícia do CAA e a zona de transição, o que leva ao aumento da resistência à compressão.

Le e Ludwig (2016) utilizaram a cinza da casca do arroz como substituição parcial do cimento em teores de até 20%, sempre combinada a outros 20% de cinza volante, em traços de referência com 625 kg/m³ de cimento. Com os resultados de resistência à compressão foi observado que o aumento do teor de cinza da casca do arroz leva a diminuição das resistências precoces. As exceções foram os teores de 5 e 10% aos 7 dias, que apresentaram resultados semelhantes ao traço de referência. Já aos 28 e 90 dias todos os traços com a cinza apresentaram resistências maiores que o traço de referência (LE e LUDWIG, 2016).

Le e Ludwig (2016) corroboram Chopra *et al.* (2015) relatando que os efeitos positivos da cinza da casca do arroz na resistência à compressão são justificados pelo seu teor bastante elevado de sílica amorfa, grande área superficial específica, e pela intensa reatividade com a água e o hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento para produzir C-S-H adicional. Além disso, Le e Ludwig (2016) acrescentam que a presença da cinza da casca do arroz também melhora a

hidratação do cimento através dos locais de nucleação e efeitos de diluição, particularmente em idades precoces.

Um outro efeito importante da cinza da casca do arroz diz respeito à cura interna. Esse efeito ocorre com a cinza porque os seus grãos têm estrutura porosa que pode absorver água livre durante a mistura. Esta quantidade de água pode ser liberada para a pasta de cimento em torno das partículas de cinza quando a umidade relativa diminuir na pasta durante a maturação, o que facilitaria uma hidratação prolongada. Assim, a cura interna pela cinza da casca do arroz pode ser uma razão importante para a melhoria da resistência à compressão em idades mais avançadas (NGUYEN *et al.*, 2011).

- Durabilidade

Safiuddin *et al.* (2010) utilizaram até 30% de substituição de cimento por cinza da casca do arroz em CAA's. Os resultados dos experimentos mostraram que o aumento do teor de cinza diminuiu a porosidade total e a absorção de água dos CAA's, e elevou a resistividade elétrica. O aumento da resistividade elétrica também ocorreu com a diminuição da relação água/finos, que melhora a qualidade da microestrutura porosa do concreto. Os valores encontrados para a resistividade elétrica variaram entre 4,1 e 121,2 K Ω .cm para as amostras na condição saturada.

Assim como na análise do estado endurecido, o bom desempenho das misturas com cinza da casca do arroz se deve ao efeito fíler e a elevada reatividade das cinzas. As reações pozolânicas produziram C-S-H adicional que reduziram a porosidade do concreto bem como refinaram os poros (SAFIUDDIN *et al.*, 2010).

Chopra *et al.* (2015) utilizaram a cinza da casca do arroz como substituto parcial do cimento para CAA's em teores de até 20% em relação a um traço de referência com consumo de cimento de 550 kg/m³. Com a análise da permeabilidade a cloretos verificou-se que todos os percentuais de substituição de cimento por cinza da casca do arroz apresentaram resultados significativamente melhores que o traço de referência, semelhante ao que ocorreu na resistência à compressão. Isso se

explica pela estrutura de poros mais refinada proporcionada pelas reações pozolânicas da cinza da casca do arroz (CHOPRA *et al.*, 2015).

Além disso, os resultados de porosidade são compatíveis com a resistência à compressão e a permeabilidade de íons cloreto, ou seja, para todos os percentuais de substituição os resultados foram menores que o traço de referência. Assim, pode-se dizer também que a porosidade diminuiu com o aumento da idade. Isto ocorre basicamente devido à grande formação de gel de CSH, que forma uma estrutura densa de modo capaz de reduzir a porosidade (CHOPRA *et al.*, 2015).

Para Kannan e Ganesan (2014) a utilização de cinza da casca do arroz como substituto parcial do cimento em CAA's proporcionou ganhos de resistência à compressão para teores de até 25% de substituição, embora tenha apresentado melhoras quando combinada ao metacaulim em percentuais totais de até 40%.

Entretanto, a substituição de cimento por cinza da casca do arroz só apresentou resultados de absorção por capilaridade menores que a composição de referência nos teores de 10 e 15%. Já para a resistência à cloretos todos os teores de substituição de 5 a 30% apresentaram resultados melhores que a composição de referência. Esses resultados comprovam a redução da estrutura porosa causada pelo metacaulim (KANNAN e GANESAN, 2014).

Para avaliar o efeito da cinza da casca do arroz no processo de carbonatação, Chatveera e Lertwattanak (2011) utilizaram uma cinza da casca do arroz com área superficial específica BET de 110 m²/g e BLAINE de 6200 cm²/g em concretos convencionais como substituição parcial ao cimento em teores de 20 e 40%.

A partir disso, amostras cúbicas com 10 cm de aresta foram produzidas e colocadas em câmara de carbonatação com 0,03% de concentração de CO₂, e umidade relativa de 70% durante 180 dias. Desta forma, verificou-se que a profundidade de carbonatação aumentou com o maior teor de substituição de cimento por cinza da casca do arroz (CHATVEERA E LERTWATTANARUK, 2011).

2.2 – Concretos com adição de cal hidratada

A cal hidratada é um pó seco e inodoro obtido da cal virgem em processos industriais e é extremamente fina e leve. É o aglomerante mais antigo usado pela humanidade na construção de edificações e muito utilizada em argamassas para melhorar trabalhabilidade, aderência e rendimento na mão de obra.

A utilização de cal hidratada em argamassas é prática conhecida dentro da indústria da construção civil. Entretanto, a utilização desse material em concretos ainda não é comum, mas vem sendo objeto de estudo nos últimos tempos, principalmente sobre sua contribuição nas reações pozolânicas com as adições minerais e seu efeito no controle da carbonatação em concretos com baixo consumo de cimento (CADORE, 2008; HOPPE FILHO, 2008; ANJOS *et al.*, 2015)

A cal hidratada cálcica, com área específica BET cerca de 10 vezes maior que a dos cimentos é composta basicamente por hidróxido de cálcio (fração aglomerante), carbonato de cálcio (fração inerte), e uma fração residual insolúvel (fração inerte). Quando adicionada em compostos cimentícios a cal hidratada intervém física e quimicamente.

A intervenção física será através de sua fração inerte que funcionará como agente nucleador para a precipitação dos hidratos de cimento (HOPPE FILHO, 2008). Já a intervenção química será através das reações pozolânicas, pois, segundo Hoppe Filho (2008), o maior teor remanescente de portlandita em sistemas cimentícios pozolânicos devido à adição de cal hidratada aumenta o grau de reação de um material pozolânico. Ou seja, há maior consumo de portlandita, e maior quantidade de compostos hidráulicos formados.

Anjos *et al.* (2015) analisaram formulações de CAA com substituição parcial do cimento nos teores de 60% e 70% por cinza volante e metacaulim, além da adição de 5% de cal hidratada sobre o total de finos da mistura. Os testes de resistência à compressão mostraram que as composições com cal hidratada apresentaram maiores valores do que as composições sem cal hidratada, entre 22% e 47% de ganho, pois a cal contribuiu para a formação de C-S-H secundário ao reagir com o material pozolânico que estava presente na mistura em teores elevados.

Além disso, foi verificado por Anjos *et al.* (2015) que a adição de cal hidratada contribui para redução da absorção por capilaridade e redução da difusão de íons cloreto, principalmente porque essas propriedades estão relacionadas com a estrutura porosa do material que é refinada devido a produção de C-S-H secundário.

As composições estudadas por Anjos *et al.* (2015) ainda foram submetidas a carbonatação acelerada com concentração de CO₂ de 4±0,5% e foi verificado que a adição de cal hidratada contribuiu para diminuir a profundidade de carbonatação, pois a cal hidratada repôs parcialmente a alcalinidade da mistura.

Dal Ri (2002) estudou a influência da adição de cal hidratada em concretos convencionais com elevados teores de adições minerais na penetração de cloretos e na resistência à compressão. Para isso, utilizou-se cinza volante, cinza da casca do arroz e escória substituindo entre 50 e 90% do cimento, e a cal hidratada foi adicionada nos percentuais de 15 e 18% dos aglomerantes.

Para todas as misturas, foi observado que a adição de cal hidratada proporcionou aumento da resistência à compressão, embora tenha aumentado a permeabilidade a cloretos. Desta forma, os resultados de resistência à compressão de Anjos *et al.* (2015) corroboram Dal Ri (2002), embora os resultados de permeabilidade a cloretos sejam contraditórios.

Cadore (2008) produziu amostras de concretos convencionais de referência, outras com substituição de 90% do cimento por adições minerais, sendo 20% de cinza volante e 70% de escória de alto forno, e outra semelhante acrescentando a substituição de 20% da areia por cal hidratada. As amostras foram submetidas a carbonatação acelerada com concentração de 5% de CO₂, confinadas por períodos de 3 a 9 semanas.

Com isso, percebeu-se que o traço de referência apresentou menor profundidade de carbonatação, seguido pelo traço com adição mineral e cal hidratada, e por último o concreto sem cal hidratada. Isso ocorreu em função da adição mineral ter consumido o hidróxido de cálcio da mistura que seria o responsável pela alcalinização. Além do mais, observou-se que o aumento da relação água/finos aumentou a profundidade carbonatada e o coeficiente de carbonatação, pois proporcionou maior porosidade ao concreto (CADORE, 2008).

Observou-se ainda que entre 91 e 300 dias a profundidade de carbonatação diminuiu nos traços com adição de cal hidratada devido a continuidade da produção de C-S-H na mistura, efeito contrário ao apresentado nos outros traços. Desta forma, considerou-se que o C-S-H formado nesse intervalo de tempo dificultou a entrada do CO₂, o que explicaria o menor teor de carbonatação aos 300 dias para esses traços (CADORE, 2008).

Diante disso, pode-se dizer que os resultados apresentados por Cadore (2008) indicam que a adição de cal hidratada atingiu sua finalidade de repor parcialmente a alcalinidade do concreto, pois reduziu os efeitos da carbonatação tanto pela ação química como física.

Esses resultados foram corroborados mais tarde por Anjos *et al.* (2015) afirmando que a reserva alcalina proporcionada pela adição de cal hidratada também aumenta a quantidade de C-S-H proveniente das reações pozolânicas, promovendo um aumento de resistência à compressão aos 28 dias e aos 90 dias.

Hoppe Filho (2008) analisou composições de concreto convencional com substituição de 50% do cimento por cinza volante, com e sem adição de 20% de cal hidratada. Assim, ele relatou que a adição de cal hidratada aumentou o grau de reação da fase vítrea da cinza volante e que o teor de 50% de substituição de cimento tinha potencial de consumir toda a portlandita produzida pelos 50% de cimento restante.

Logo, a cal hidratada garantiu o consumo máximo da cinza volante e ainda propiciou um teor residual que mantém a alcalinidade na solução dos poros. Entretanto, não se verificou melhora significativa nos resultados de resistência à compressão, apenas um refinamento na estrutura porosa a longo prazo (HOPPE FILHO, 2008).

Hoppe Filho (2008) ainda submeteu as composições estudadas a carbonatação acelerada em câmara climática com umidade relativa mantida em 75±2%, temperatura mantida em 20±1°C, e concentração de CO₂ de 5,0%. As profundidades de carbonatação foram medidas após 4, 8, 12, 16 e 20 semanas de exposição.

Embora a cal hidratada tenha proporcionado um teor residual de hidróxido de cálcio, ela não reduziu significativamente a susceptibilidade à carbonatação. Portanto, considerou-se que o teor remanescente de portlandita na matriz hidratada não é o fator determinante do avanço da interface de alcalinidade. Outros fatores como o volume de poros capilares (>50nm) e a área exposta para interação com o anidrido carbônico são relevantes (HOPPE FILHO, 2008).

CAPÍTULO 3

Indicativos de durabilidade relacionados aos mecanismos de transporte e resistividade elétrica

A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão, e outras condições em serviço. Como resultado de interações ambientais, a microestrutura e as suas propriedades mudam com o tempo. Mas, um material só chega ao final de sua vida útil quando suas propriedades se deterioraram de tal forma que a continuidade de sua utilização se torna inviável (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

É comum achar que a durabilidade dos concretos está diretamente relacionada a sua resistência. Entretanto, o coeficiente de relação entre a resistência a compressão e os resultados de durabilidade são baixos, especialmente quando se utiliza adições minerais nas composições de concreto convencional. Pois, existem diferenças nos seus mecanismos que são influenciados por diversos fatores. Um deles é a zona de transição entre camadas, que pode ser considerada um dos principais fatores da resistência à compressão, mas não tem efeito significativo sobre a resistividade elétrica, por exemplo (RAMEZANIANPOUR e JOVEIN, 2012).

Então, uma vez que os processos de transporte envolvidos no mecanismo de degradação do concreto dependem em grande parte da sua estrutura de poros, é importante para o estudo da durabilidade, em particular, a porosidade, a capilaridade e a permeabilidade da microestrutura do CAA produzido com várias combinações de adições, inertes ou pozolânicas (SILVA e BRITO, 2015).

Nesse contexto, outros mecanismos também são muito importantes e estão diretamente relacionados a corrosão das armaduras, como a carbonatação e difusão de íons cloreto, pois podem causar uma significativa redução da vida de serviço. Além disso, é importante destacar que o desempenho no estado endurecido e de durabilidade dos concretos convencionais e do CAA são avaliados pelas mesmas

propriedades. No entanto, as particularidades do CAA como elevado teor de materiais finos e baixo fator água/finos podem proporcionar melhor desempenho.

3.1 – Absorção de água por capilaridade

É evidente que o ar e a água desempenham um papel importante no desencadeamento do processo de corrosão. Se a entrada destes dois componentes pudesse ser impedida, a corrosão não aconteceria. Então, um dos métodos para medir a penetração de água no concreto é o teste de absorção por capilaridade. Este teste é utilizado para determinar as propriedades do concreto próximo a sua superfície, que controla o transporte de água para dentro do concreto e para a armadura (LEUNG *et al.*, 2016).

A absorção de água por capilaridade do concreto pode ser considerada como uma medida das forças de capilaridade exercidas pela estrutura de poros fazendo com que os líquidos sejam arrastados para o concreto. No entanto, o teste de capilaridade só é aplicado sobre a superfície do concreto, não fornecendo muita informação sobre as propriedades da sua matriz. Além disso, o teor de umidade inicial do concreto altera a absorção adicional de água. (LEUNG *et al.*, 2016).

Segundo Ramezani pour e Jovein (2012), a absorção por capilaridade tem sido reconhecida como um importante índice de durabilidade dos concretos, porque: o método de ensaio utilizado para a sua determinação reflete a maneira que a maioria dos concretos vai ser penetrada pela água e outros agentes prejudiciais, e, é uma boa medida da qualidade do concreto perto da superfície, que se relaciona com a corrosão das armaduras.

A absorção de água em um meio poroso é induzida por um fenômeno de absorção capilar nos macroporos do material cimentício (PERLOT *et al.*, 2013). Além disso, pode-se dizer que um dos principais fatores de durabilidade do concreto é a permeabilidade, que também é afetada pela estrutura porosa. Concretos com menor permeabilidade apresentam melhor resistência a ataques químicos, pois quando a água penetra no concreto, alguns sais solúveis, incluindo os íons cloreto no

concreto, podem penetrar e causar corrosão (RAMEZANIANPOUR e JOVEIN, 2012).

3.2 - Difusão de íons cloreto

O comportamento do concreto frente ao ataque de íons cloreto é importante para avaliação da durabilidade das estruturas de concreto armado. Os íons cloreto quando migram pelo concreto e chegam a sua armadura causam corrosão puntiforme que pode ter efeitos bastante consideráveis na estrutura, como a redução da seção de aço.

A estrutura porosa do concreto tem grande influência na permeabilidade de íons cloreto. Mohammed *et al.* (2014b) analisaram a estrutura de poros interna em diferentes escalas e observaram que as naturezas da porosidade macro ou micro do CAA não se relacionam com a resistência à penetração de cloretos, pois é a interconectividade dos poros na matriz de cimento e o grau de percolação dos poros na zona de transição que desempenham um papel mais importante.

Então, a formação de uma microestrutura menos porosa, densa e um sistema de poros descontínuo torna-se fundamental para uma reduzida permeabilidade à íons cloreto, pois normalmente esses íons penetram no concreto por difusão ao longo de caminhos de água ou poros abertos (UYSAL *et al.*, 2012). Nesse contexto, as reações pozolânicas parecem ser capazes de desenvolver um sistema de poros mais descontínuo devido a formação de C-S-H adicional. (WONGKEO *et al.*, 2014).

Para Anjos *et al.* (2015), o coeficiente de difusão de íons cloreto é dependente da estrutura de poros do concreto, da interação dos cloretos com a fase aluminato do cimento hidratado e com o efeito físico dos poros que tende a fixar esses cloretos nas paredes. Uysal *et al.* (2012) acrescentam que a utilização de componentes com elevado teor de alumina contribui para o aumento da resistência a penetração de íons cloreto no CAA, tendo como consequência a redução dos cloretos livres que poderiam iniciar o processo de corrosão.

3.3 - Carbonatação acelerada

Um outro mecanismo preponderante de deterioração relativo à armadura do concreto é a despassivação por carbonatação, ou seja, pela ação do gás carbônico da atmosfera que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução a valores inferiores a 9. Esse processo de carbonatação é iniciado quando o CO_2 penetra dentro dos materiais à base de cimento e é um processo de reações químicas entre as espécies de carbono dissolvido e as fases de cimento hidratado.

O fenômeno carbonatação é baseado na difusão do dióxido de carbono pelos poros do concreto, condicionado à concentração de CO_2 do ambiente circundante. O processo recebe o nome de carbonatação devido a reação que ocorre principalmente entre o hidróxido de cálcio (CH) e o CO_2 resultando em carbonato de cálcio (CaCO_3). Portanto, para ocorrer a carbonatação, primeiro tem que haver a difusão gasosa do CO_2 do ambiente na fase aquosa dos poros do concreto, para depois haver a reação química com os elementos alcalinos. Logo, a carbonatação se dá a partir da superfície do concreto, e a profundidade alcançada é chamada de frente de carbonatação (CADORE, 2008).

A carbonatação requer a presença de água nos poros do concreto porque o CO_2 dissolve-se na água formando ácido carbônico (H_2CO_3). Uma reação química ocorre entre o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o H_2CO_3 na pasta de cimento hidratado para formar CaCO_3 , levando à redução da alcalinidade, e favorecendo a corrosão do aço. Portanto, a incorporação de uma adição mineral pozolânica aumenta a taxa de carbonatação devido à menor concentração de cimento, o que diminui a quantidade de portlandita livre e reduz o PH do material. Além disso, a porosidade também influencia, pois quanto mais CO_2 entrar em contato com o hidróxido de cálcio mais carbonato de cálcio será formado (CHATVEERA e LERTWATTANARUK, 2011).

A carbonatação é um processo físico-químico complexo durante o qual o CO_2 reage não só com a portlandita (CH) mas também com o C-S-H, sendo difícil distinguir a contribuição de cada um desses produtos hidratados do cimento para a carbonatação total uma vez que a reação deles com o CO_2 ocorre simultaneamente (PHUNG *et al.*, 2015).

Foi investigado por BORGES *et al.* (2010) a contribuição da carbonatação de C-S-H na formação de carbonato de cálcio por análise termogravimétrica (TGA) em pastas de cimento completamente carbonatadas e concluiu-se que a carbonatação de C-S-H é significativamente mais elevada em pastas que continham menos portlandita inicial, como nos casos de elevados teores de substituição de cimento por adições minerais.

Ao atingir a armadura, a frente de carbonatação pode causar corrosão generalizada causando sérios danos à estrutura. Por outro lado, a carbonatação reduz a porosidade e permeabilidade do concreto, além de parecer um método promissor para cortar emissões provenientes de fontes industriais através do sequestro de CO₂ (MOHAMMED *et al.*, 2014a; PHUNG *et al.*, 2015).

A identificação dessa frente ou profundidade de carbonatação requer ensaios específicos com a utilização de medidores de pH por viragem de coloração como os indicadores a base de fenolftaleína ou timolftaleína, que medem pH nos intervalos de 8,3-10 e 9,3-10,5, respectivamente (FIGUEIREDO, 2005), ensaio muito utilizado *in loco* ou laboratório.

Em condições naturais, esta progressão da carbonatação é muito longa. Para prever desempenhos de longo prazo, a duração do teste tem de ser encurtada: essa aceleração pode ser obtida aumentando a concentração de dióxido de carbono no ambiente ao qual o concreto está exposto. Assim, a aceleração da carbonatação ocorre através do confinamento de amostras de concreto em uma câmara com uma concentração de CO₂ mais elevada que a atmosférica. Logo, dentro desta câmara devem estar controlados também a temperatura ambiente e a umidade relativa, além da concentração de CO₂.

3.4 - Resistividade elétrica

O teste de resistividade da superfície do concreto é um método simples, não-destrutivo, rápido e econômico que pode ser utilizado *in loco* ou laboratório, além de ser um indicador apropriado para permeabilidade de íons cloreto no concreto. A resistividade elétrica está relacionada ao movimento de íons no concreto, como os

íons cloreto na solução porosa, por isso depende das propriedades de microestrutura do concreto e da condutividade da solução dos poros. Essa propriedade de condutividade do concreto é predominantemente regida pelas composições químicas das soluções de poros, embora também seja afetada pela estrutura porosa. Assim, esse método deve ser utilizado nos concretos quando a maior parte de suas reações químicas de hidratação estiverem concluídas (RAMEZANIANPOUR e JOVEIN, 2012).

A resistividade elétrica aumenta geralmente com a menor porosidade e menores tamanhos de poro, pois o fluxo de íons através dos espaços dos poros é prejudicado. Além disso, os íons de hidroxila e de metais alcalinos se mostram como os principais íons que transportam carga, mas podem ter sua quantidade reduzida com a utilização de adições minerais, como a cinza da casca do arroz, por exemplo (SAFIUDDIN *et al.*, 2010).

As propriedades eletroquímicas do concreto, como a resistividade elétrica, são capazes de produzir informações sobre a probabilidade de corrosão em estruturas de concreto armado (SENGUL, 2014). O CEB-192 (Comité Euro-International du Béton) propôs uma classificação para a provável taxa de corrosão em função da resistividade do concreto, conforme Tabela 3.1 (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Tabela 3.1 - Estimativa da provável taxa de corrosão em função da resistividade elétrica. FONTE: Adaptada de MEHTA e MONTEIRO (2014)

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

CAPÍTULO 4

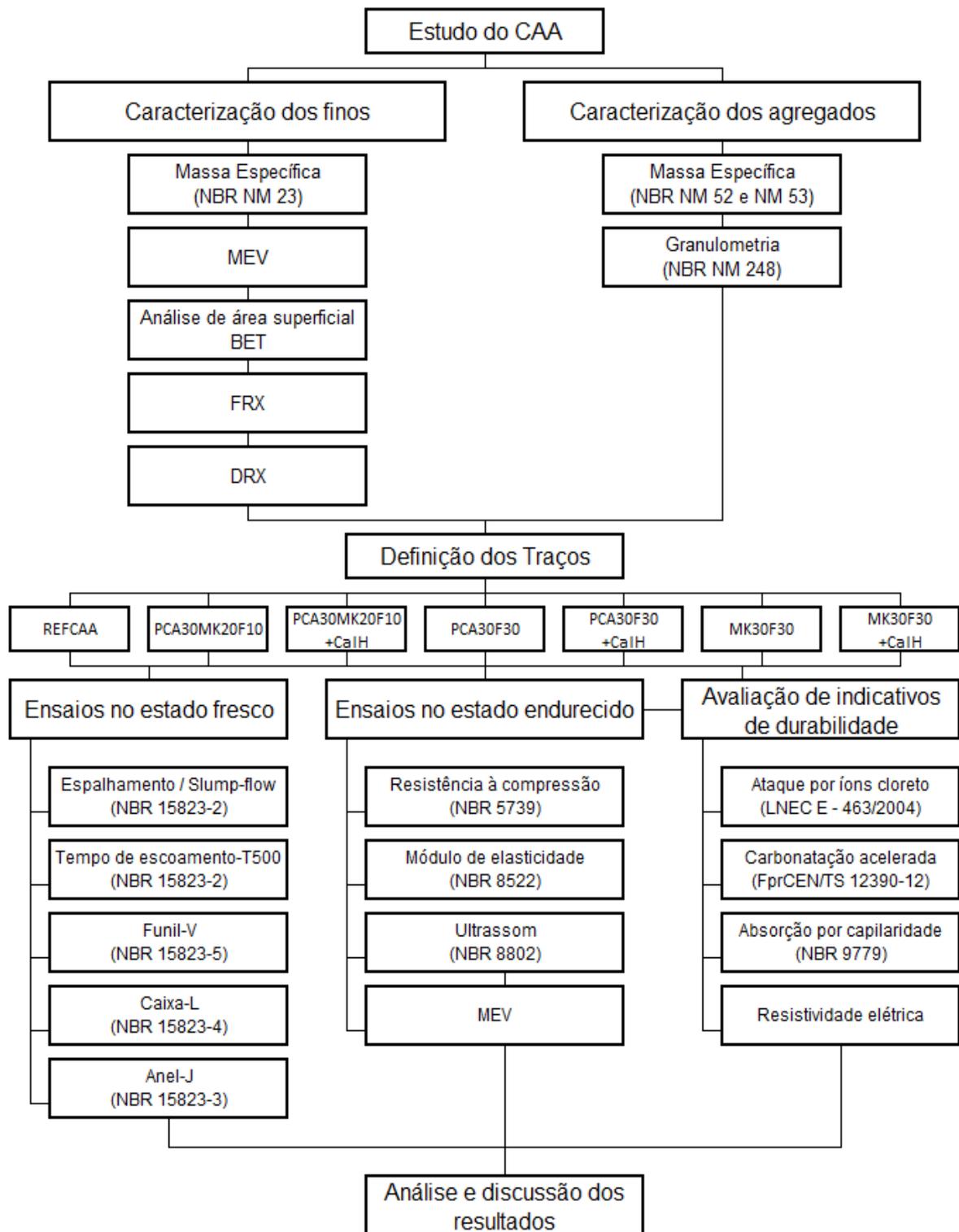
Materiais e métodos

Os experimentos realizados e descritos neste capítulo visaram responder às questões que motivaram este trabalho avaliando o comportamento no estado fresco e no estado endurecido no que diz respeito a propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais e adição de cal hidratada.

No entanto, o foco deste trabalho é a avaliação do indicativo de durabilidade a partir das propriedades de transporte: absorção de água por capilaridade e difusão de íons cloreto, bem como dos ensaios de resistividade elétrica e carbonatação acelerada, além da influência da adição de cal hidratada. A metodologia proposta com a organização dos experimentos está apresentada no fluxograma da Figura 4.1.

O programa experimental utilizado nessa pesquisa foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consistiu da caracterização dos materiais constituintes do concreto, tendo sido realizada através dos ensaios de massa específica e granulometria, além das análises por fluorescência de raios-x (FRX), difração de raios-x (DRX), microscopia eletrônica por varredura (MEV) e análise de área superficial pelo método BET.

Na segunda etapa do trabalho, o concreto de referência e os demais concretos com elevados teores de adições minerais e adição de cal hidratada foram produzidos e avaliados. Por fim, com os resultados obtidos foi possível discutir a respeito do desempenho desses CAA's no que se refere a influência da adição de cal hidratada, a efetividade de cada uma das adições minerais e ao efeito sinérgico dessas adições.



REFCAA – Traço de referência; MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada

Figura 4.1 - Fluxograma dos ensaios.

Para isso foram utilizados um traço de referência (REFCAA) sem substituição de cimento por adições minerais, e outros seis traços com substituição de 60% do cimento do traço de referência por adições minerais, em massa. Os percentuais mais utilizados e avaliados em outros trabalhos de CAA's com adições minerais variaram até 40%, por isso o percentual utilizado de 60% de substituição do cimento é considerado elevado (ANJOS et al., 2015; LE e LUDWIG, 2016; UYSAL e YILMAZ, 2011; KAVITHA et al., 2015; SAFIUDDIN et al., 2010; WONGKEO et al., 2014).

Assim, como pretendia-se produzir concretos com consumos de cimento abaixo do mínimo exigido pela NBR 12655 (ABNT, 2015), e pesquisas anteriores verificaram que percentuais de substituição de 50% forneciam resistências da ordem de 60 MPa (MEDEIROS, 2016), que são resistências elevadas, optou-se pela utilização do percentual de 60% de substituição.

4.1 - Caracterização dos materiais

4.1.1 - Experimentos realizados

- **Massa específica e granulometria dos materiais anidros**

Os ensaios de massa específica dos agregados miúdos e graúdos foram realizados de acordo com as normas NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 53 (ABNT, 2009), respectivamente. Para o cimento e as adições minerais, incluindo a cal hidratada, o ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001). Todos os ensaios de massa específica dos materiais no estado anidro foram realizados no laboratório de materiais e produtos cimentícios do campus Natal-Central do IFRN.

A granulometria dos agregados miúdo e graúdo foram realizados de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2001) no laboratório de materiais de construção do campus Natal-Central do IFRN.

- **Análise de área superficial – BET**

As análises de área superficial específica foram realizadas pelo método BET somente para os materiais finos componentes das misturas de CAA estudadas neste trabalho. Este procedimento utiliza dados referentes à adsorção volumétrica de um gás, nesse caso o nitrogênio, e equações provenientes do processo de adsorção identificado pelo procedimento BET e que fornece como resultado a área superficial específica. As análises foram realizadas pelo equipamento BEL JAPAN modelo BELSORP-mini II do Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN.

- **Fluorescência de Raios-X (FRX)**

A análise de fluorescência de raios-x pelo método semiquantitativo foi realizada somente para os materiais finos a fim de realizar análise química sob atmosfera a vácuo. Para isso utilizou-se o equipamento Shimadzu modelo EDX-720, onde os espectros de fluorescência de raios X foram obtidos utilizando-se cerca de 300 mg de amostra em pó fino depositado em um porta amostra formado por um filme plástico de polietileno, que apresenta baixa absorção de raios X na faixa de energia de interesse. Essas análises foram realizadas no laboratório de caracterização mineral do campus Natal-Central do IFRN.

- **Difração de Raios-X (DRX)**

A análise de difração de raios-x foi realizada apenas nos materiais finos no laboratório de nanoestruturas magnéticas e semicondutoras da UFRN utilizando equipamento MiniFlex II da Rigaku, que gera um feixe de raios-x com comprimento de onda $\lambda = 1,545 \text{ \AA}$. A coleta de dados se deu com um ângulo inicial (2θ) de $5,0^\circ$ a $70,0^\circ$ passo de $0,01^\circ$ e velocidade $15,0^\circ/\text{min}$. A interpretação qualitativa do espectro foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados JCPDS (ICDD-2002).

Com esta análise foi possível verificar a presença de estruturas cristalinas no material, e identificar quais são as fases cristalinas. Essas informações são importantes para analisar os resultados dos compósitos no estado endurecido, além do potencial reativo das adições minerais. Quanto mais amorfas as adições minerais, maior o potencial de reagir com o hidróxido de cálcio.

4.1.2 - Materiais utilizados

Nesta pesquisa utilizou-se o cimento (CIM) CP V – ARI, geralmente utilizado por centrais dosadoras de concreto da região metropolitana de Natal/RN. E, o cimento utilizado nos traços deste trabalho pertence a um mesmo lote de fabricação, pois foi coletado em uma única vez diretamente do silo de cimento de uma central dosadora de concreto localizada na zona norte do município de Natal/RN.

Como adições minerais foram utilizadas: pozolana da casca do arroz (PCA) cedida pela empresa PILECO NOBRE que produz o material no município de Alegrete/RS; metacaulim da marca BZ (MK) cedido pela empresa PINCOL PRÉ-MOLDADOS situada no município de Parnamirim/RN; fíler calcário (F) cedido pelo grupo IMAP que produz esse material no município de João Câmara/RN; cal hidratada (CalH) do tipo CH-I produzida no município de Governador Dix-Sept Rosado/RN e cedida pela Mineração Ouro Branco.

A pozolanidade das adições minerais pozolânicas utilizadas neste trabalho já foram verificados em pesquisas anteriores. Anjos *et al.* (2012) verificaram que o metacaulim obteve índice de atividade pozolânica (IAP) com a cal hidratada aos 7 dias igual a 7,9 MPa, tendo a pozolanidade confirmada pela presença de C-S-H na difração de raios-x (DRX) da pasta aos 7 dias.

Medeiros (2016) verificou que a PCA obteve IAP com a cal hidratada aos 7 dias igual a 4,1 MPa, e índice de desenvolvimento com cimento (IDC) Portland aos 28 dias igual a 112%. Embora a PCA tenha apresentado IAP menor que 6,0 MPa, o IDC maior que 90% e a existência de C-S-H no DRX da pasta confirmaram a pozolanidade do material.

Com relação ao agregado miúdo (areia natural quartzosa) e agregado graúdo (brita granulítica), eles foram cedidos por uma central dosadora de concreto da região

metropolitana de Natal/RN, a mesma que cedeu o cimento. Já o aditivo químico superplastificante utilizado foi o MasterGlenium SCC 160 da marca BASF, e cordialmente cedido pela mesma empresa. Esse aditivo é a base de policarboxilato e atua como dispersante dos materiais finos do concreto autoadensável (CAA).

As massas específicas dos materiais utilizados neste trabalho no estado anidro, apresentadas na Tabela 4.1, foram utilizadas para calcular o consumo dos materiais por metro cúbico para cada traço de concreto. E, as variações nos resultados se devem as características mineralógicas de cada material.

Tabela 4.1 - Massas específicas dos materiais finos no estado anidro.

Materiais	CIM	PCA	MK	F	CaH	AM	AG	ÁGUA
Massa específica (kg/dm ³)	3,05	2,10	2,55	2,70	2,30	2,62	2,63	1,00

** CIM – cimento; MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CaH – cal hidratada

A granulometria dos agregados graúdo e miúdo (brita granítica e areia natural quartzosa) foi realizada por peneiramento conforme NBR NM 248 (ABNT, 2001). Por este procedimento obteve-se as curvas granulométricas, apresentadas na Figura 4.2, os diâmetros máximos e módulos de finura, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Módulo de finura e diâmetro máximo dos agregados.

Característica	Agregado	Valores	Unidade
Dimensão máxima característica	Miúdo	1,18	mm
	Graúdo	12,5	mm
Módulo de finura	Miúdo	1,48	-
	Graúdo	5,79	-

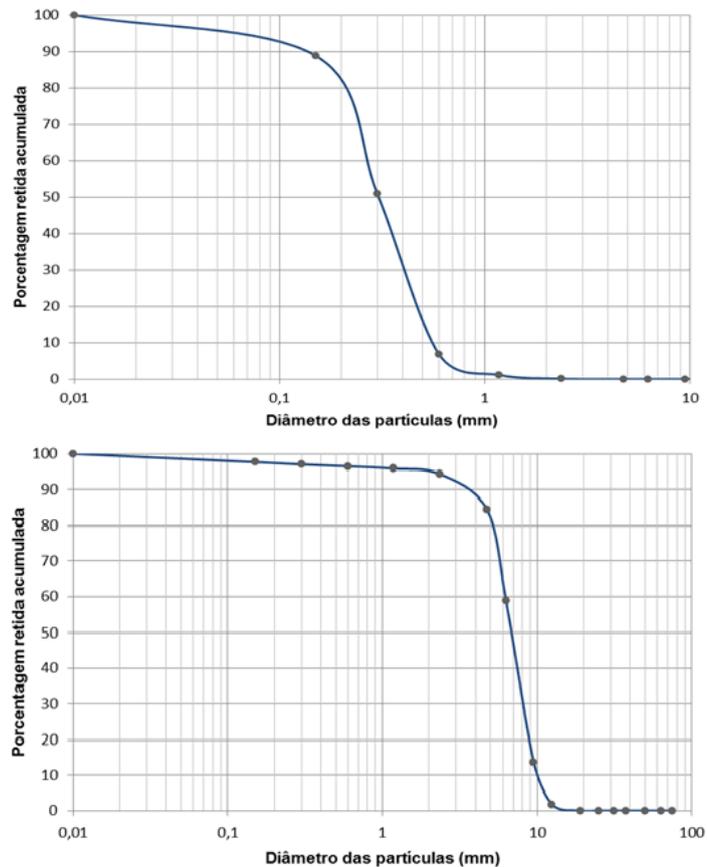


Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos agregados miúdo (acima) e graúdo (abaixo).

A cal hidratada será utilizada para contribuir nas reações pozolânicas fornecendo hidróxido de cálcio para reagir com a sílica das adições minerais. Além disso, espera-se que ela mantenha a alcalinidade do compósito, ajudando a minimizar a carbonatação. O teor de adição de cal definido para os traços de concreto foi de 5%, baseado nos trabalhos de Anjos *et al.* (2015) e Fonseca *et al.* (2016).

Anjos *et al.* (2015) utilizaram adição de cal hidratada no teor de 5% sobre o total de materiais finos em CAA's com 60% e 70% de substituição de cimento por adições minerais e os resultados de resistência à compressão e carbonatação mostraram influência positiva da adição de cal hidratada.

Já Fonseca *et al.* (2016) utilizaram teores de adições de cal hidratada de 5%, 10% e 15% em argamassas autoadensáveis com substituição de 50% de cimento

por adições minerais e os resultados de absorção por capilaridade mostraram que o percentual de 5% de adição de cal obteve o melhor resultado.

Além disso, as argamassas analisadas por Fonseca *et al.* (2016) ficaram mais viscosas na medida em que se aumentava o teor de cal, acarretando em valores mais altos para o ensaio do funil-V, e maior necessidade de aditivo superplastificante para atingir o mesmo padrão de espalhamento das argamassas.

4.2 - Definição dos traços e procedimento de mistura

O programa experimental proposto nesta pesquisa teve como intuito avaliar o efeito da substituição de 60% do teor de cimento em um traço de CAA de referência (REFCAA) com consumo de 451,12 kg/m³. A dosagem do REFCAA foi realizada previamente em outros estudos do grupo de pesquisa em materiais cimentícios do IFRN, tomando como base os parâmetros de autoabensabilidade das normas brasileiras de CAA.

A redução foi realizada em misturas ternárias, quaternárias e de quinta ordem, através da substituição em massa do cimento (CIM) por adições minerais como o metacaulim (MK), a pozolana da casca do arroz (PCA), e o fíler calcário (F). A cal hidratada foi incorporada como adição no teor de 5% sobre o teor total de materiais finos, como pode ser visto na Tabela 4.3. Após as substituições e adições de cada traço os consumos dos traços (kg/m³) foram recalculados de acordo com as massas específicas dos materiais utilizados.

Tabela 4.3 - Composição dos materiais finos dos CAA's (%).

TRAÇOS	COMPOSIÇÃO DOS FINOS (%)				
	CIM	MK	PCA	F	CaIH
REFCAA	100%	-	-	-	-
PCA30MK20F10	40%	20%	30%	10%	-
PCA30MK20F10 + CaIH	40%	20%	30%	10%	5%
PCA30F30	40%	-	30%	30%	-
PCA30F30 + CaIH	40%	-	30%	30%	5%
MK30F30	40%	30%	-	30%	-
MK30F30 + CaIH	40%	30%	-	30%	5%

** CIM – cimento; MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CaIH – cal hidratada

Assim, para definir o consumo por metro cúbico dos insumos de todos os traços definiu-se inicialmente a composição de um traço de referência (REFCAA) de CAA, sem adições minerais, para um consumo de cimento igual a 451,12 kg/m³ e um teor de argamassa igual a 55%. Em seguida, utilizando as massas específicas dos materiais, foram calculados os consumos dos demais traços, conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Consumo de materiais por metro cúbico das composições de CAA.

TRAÇOS	CONSUMO (kg/m ³)											
	CIM	MK	PCA	F	CaH	AM	AG	ÁGUA	ADITIVO (%)	PASTA (litros/m ³)	FINOS (kg/m ³)	ÁGUA/FINOS
REFCAA	451,1	0,0	0,0	0,0	0,0	739,8	974,4	198,5	0,52%	346,4	451,1	0,44
PCA30MK20F10	171,1	85,5	128,3	42,8	0,0	701,4	923,8	213,8	1,70%	380,4	427,7	0,50
PCA30MK20F10 +CaH	167,7	83,9	125,8	41,9	21,0	687,6	905,7	220,1	1,70%	392,5	440,2	0,50
PCA30F30	171,4	0,0	128,5	128,5	0,0	702,7	925,5	214,2	1,20%	379,2	428,5	0,50
PCA30F30 +CaH	168,0	0,0	126,0	126,0	21,0	688,9	907,3	220,5	1,20%	391,4	441,1	0,50
MK30F30	173,3	129,9	0,0	129,9	0,0	710,4	935,6	216,6	2,16%	372,5	433,1	0,50
MK30F30 +CaH	169,8	127,4	0,0	127,4	21,2	696,3	917,0	222,9	2,16%	384,9	445,8	0,50

** CIM – cimento; MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário; CaH – cal hidratada; AM – agregado miúdo; AG – Agregado graúdo

Como pode ser visto na Tabela 4.4, o fator água/finos para o traço de referência foi de 0,44 e para todos os traços com substituição parcial do cimento por adições minerais foi igual a 0,50. Essa diferença entre as relações água/finos ocorreu por necessidade de manter a integridade dos CAA's no estado fresco, pois os testes realizados previamente mostraram que não era possível obter as características desejadas para os traços com adições minerais utilizando um fator água/finos de 0,44.

Justifica-se ainda que não foi possível obter um CAA de referência sem segregação com um fator água/finos de 0,50. Desta forma, optou-se por manter apenas o traço de referência com um fator água/finos igual a 0,44, pois não comprometeria os objetivos deste trabalho.

Com as relações água/finos fixas para os traços com adições minerais, o aditivo superplastificante foi utilizado sobre o conteúdo total de materiais finos, em massa, com teores que possibilitassem resultados de espalhamento semelhantes ao do traço de referência, utilizando uma tolerância de ± 50 mm para obtenção de classificações SF2 ou SF3 de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2010).

É muito difícil manter o espalhamento igual para todos os traços, pois seriam necessários muitos testes e haveria uma grande perda de material, por isso foi definida essa faixa de interesse.

Todos os traços foram dosados para um teor de argamassa igual a 55%, havendo variação muito discreta (0,46%) apenas nos traços que tiveram adição de 5% de cal hidratada, e o volume de pasta das misturas varia de acordo com o teor das adições e suas respectivas massas específicas.

Os materiais foram misturados em betoneira marca CSM com capacidade de 150 litros do laboratório de materiais de construção do Campus Natal-Central do IFRN, sempre em temperatura ambiente. Para cada traço foram produzidos aproximadamente 66 litros de concreto suficientes para moldar 33 corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm, 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e 10 corpos-de-prova cúbicos com aresta de 10 cm.

O procedimento de mistura foi adotado de forma a produzir concretos homogêneos, sem segregação e capazes de garantir um bom envolvimento dos agregados pela pasta ligante. O tempo total de mistura foi de 10 minutos aproximadamente. E a sequência de colocação dos materiais e os tempos de homogeneização da mistura em cada etapa foram os seguintes:

- 1º. Agregado graúdo e 20% da água (mistura por 1 minuto)
- 2º. Areia, cimento e mais 50% da água (mistura por 3 minutos)
- 3º. Aditivo superplastificante (mistura por 3 minutos)
- 4º. Adições minerais e mais 10% da água (mistura por 3 minutos)

4.3 – Ensaio do CAA no estado fresco

4.3.1 – Espalhamento (Slump Flow Test) e tempo de escoamento (T500)

O ensaio de espalhamento (slump flow test) e tempo de escoamento (T500) são utilizados para medir a capacidade do CAA fluir livremente sem segregar. Estes ensaios foram realizados de acordo com a NBR 15823-2 (ABNT, 2010) no laboratório de materiais e produtos cimentícios do campus Natal-Central do IFRN. E, todos os concretos deste trabalho foram dosados para obter espalhamentos previstos pela NBR 15823-1 (ABNT, 2010).

4.3.2 – Funil-V

Este ensaio tem como função testar a capacidade do CAA de passar por uma redução de seção exclusivamente pela ação do seu peso próprio e foi realizado de acordo com a NBR 15823-5 (ABNT, 2010) no laboratório de materiais e produtos cimentícios do campus Natal-Central do IFRN. O procedimento consiste em medir o tempo necessário para a amostra de aproximadamente 10 litros de concreto atravessar completamente a cavidade inferior do funil após a abertura da comporta inferior.

4.3.3 – Caixa-L

O ensaio da Caixa-L mede a capacidade do concreto de passar por obstáculos sob ação do seu peso próprio, permanecendo coeso. Neste trabalho os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com a NBR 15823-4 (ABNT, 2010) no laboratório de materiais e produtos cimentícios do campus Natal-Central do IFRN.

4.3.4 – Anel-J

Esse ensaio também conhecido como Anel Japonês está relacionado com a propriedade de habilidade passante e pode ser utilizado em conjunto com o ensaio de espalhamento, acrescentando a avaliação da resistência ao bloqueio. Os procedimentos foram realizados de acordo com a NBR 15823-3 (ABNT, 2010) no laboratório de materiais e produtos cimentícios do campus Natal-Central do IFRN, e o equipamento utilizado é um anel de diâmetro igual a 300 mm que possui 16 barras verticais igualmente espaçadas.

4.4 – Ensaio do CAA no estado endurecido

Para o ensaio de carbonatação acelerada foram utilizados corpos-de-prova cúbicos com 10 cm de aresta, e para os demais ensaios foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

4.4.1 – Comportamento mecânico

O comportamento mecânico das composições de CAA estudadas nesse trabalho foram avaliadas através dos testes de resistência à compressão, velocidade do pulso ultrassônico e módulo de elasticidade estático.

4.4.1.1 – Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão do CAA foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) sendo analisadas três amostras cilíndricas para cada uma das seguintes idades: 3, 7, 28 e 91 dias. Utilizou-se uma prensa elétrica hidráulica com capacidade para 100 toneladas da marca Contenco no laboratório de materiais e produtos cimentícios do Campus Natal-Central do IFRN.

Assim, para a realização deste ensaio, logo após a desforma as amostras foram submetidas a cura úmida até a respectiva idade de rompimento. Antes de serem submetidas ao carregamento as amostras tiveram suas faces regularizadas e o resultado da resistência à compressão de cada composição de CAA foi definido como a média dos valores das três amostras analisadas.

4.4.1.2 – Velocidade do pulso ultrassônico

O ensaio de velocidade do pulso ultrassônico, que mede a velocidade do pulso ultrassônico, foi realizado de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2013). Como esse ensaio é não-destrutivo, eles foram realizados nas mesmas amostras do ensaio de resistência à compressão, após retificar as faces das amostras e antes de serem submetidas ao rompimento, obtendo-se resultados para as idades de 3, 7, 28, e 91 dias. Foi utilizado o aparelho 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 Campus Natal-Central do IFRN. O valor da velocidade do pulso ultrassônico para cada composição de CAA foi definido como a média entre os valores das três amostras analisadas.

4.4.1.3 – Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade estático foi realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008) e consiste na aplicação de cargas e verificações das deformações da amostra, conforme orientações da norma citada. Foram utilizados três corpos-de-prova cilíndricos com as faces retificadas para a idade de 91 dias. O resultado do módulo de elasticidade estático de cada composição de CAA foi definido como a média dos valores das três amostras analisadas.

Para realização do ensaio utilizou-se um compressômetro digital para medição do módulo de elasticidade das amostras, com dois LVDT's de resolução igual a 0,001 mm e prensa hidráulica marca Pavitest, com capacidade de 100 ton e

precisão de 10 kgf do laboratório de materiais e produtos cimentícios do Campus Natal-Central do IFRN.

4.4.2 – Avaliação dos indicativos de durabilidade

A avaliação dos indicativos de durabilidade das composições formuladas neste trabalho foi realizada quanto a absorção por capilaridade, difusão de íons cloreto, resistividade elétrica e carbonatação acelerada.

4.4.2.1 – Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado para três corpos-de-prova cilíndricos nas idades de 28 e 91 dias, seguindo as orientações da NBR 9779 (ABNT, 2012) nas instalações do laboratório de durabilidade do Campus Natal-Central do IFRN. Sendo assim, as amostras foram colocadas na estufa por 24 horas, e, após esfriar em temperatura ambiente, foram colocadas em contato com uma lâmina de água de 5 mm. Além disso, verificou-se a massa das amostras secas, e após o contato com a água nos seguintes períodos: 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h, 48h e 72h.

Com isso foi possível calcular a absorção para cada amostra em todos os períodos de medição, e os valores das absorções de cada composição de CAA para cada período de medição foram definidos como a média dos valores das três amostras. Com esses dados foi possível traçar a curva de absorção por capilaridade onde no eixo “y” estão os valores de absorção e no eixo “x” estão os valores da raiz quadrada do tempo de exposição em minutos. Além disso, foram calculados também os coeficientes de absorção por capilaridade para cada amostra através da inclinação da curva de absorção entre os períodos de 1h e 6h.

4.4.2.2 – Difusão de íons cloreto

O ensaio foi realizado de acordo com o documento normativo LNEC E-463 (2004) apenas para a idade de 28 dias e o seu objetivo foi determinar o coeficiente de difusão dos cloretos no concreto por meio de migração em regime não estacionário.

Para isso, utilizou-se três amostras cilíndricas de 10cm x 5cm, 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Essas amostras foram derivadas de corpos-de-prova cilíndricos de 10cm x 20cm, 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, que passaram por um corte a meia altura, e na sequência cada uma das metades gerou uma amostra com 5 cm de altura. Desta forma, as amostras que foram utilizadas no ensaio representam os dois quartos centrais de um corpo-de-prova cilíndrico de 10cm x 20cm.

O procedimento consistiu da aplicação de um potencial elétrico externo nas extremidades das amostras, forçando os íons cloreto a penetrar no concreto, conforme mostrado na Figura 4.3. A voltagem inicial definida pela norma para o ensaio é de 30 V, mas essa voltagem é corrigida em função da corrente apresentada inicialmente, e o tempo de duração do ensaio também será definido em função dessa corrente.

Após o encerramento do tempo de ensaio rompeu-se a amostra por tração, através da compressão diametral, e pulverizou-se uma solução de nitrato de prata em uma das seções obtidas. A partir do precipitado branco visível de cloreto de prata mediu-se a profundidade de penetração.

O coeficiente de difusão foi calculado de acordo com uma equação proposta por LNEC E-463 (2004) e os parâmetros definidos por ela que foram obtidos durante o ensaio. O valor da difusão para cada composição de CAA foi definido como a média dos coeficientes encontrados para as três amostras. Os ensaios foram realizados no laboratório de durabilidade do Campus Natal-Central do IFRN

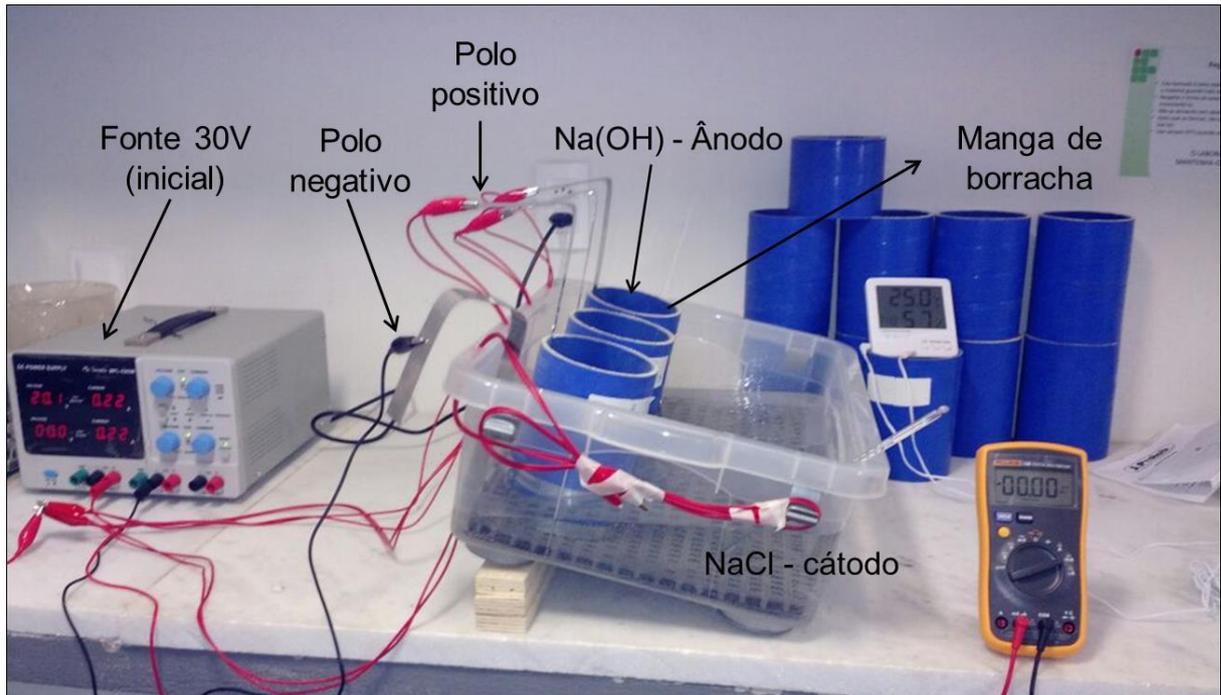


Figura 4.3 - Ensaio de difusão de íons cloreto. FONTE: Medeiros (2016).

4.4.2.3 – Carbonatação

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado de acordo com o prescrito pela especificação técnica FprCEN/TS 12390-12. Para isso, foram utilizados corpos-de-prova cúbicos com 10cm de aresta para todas as composições estudadas. Essas amostras foram colocadas em cura úmida por 28 dias, e depois foram colocadas para secar à temperatura ambiente no interior do laboratório durante 14 dias.

Após isso, esses corpos-de-prova cúbicos foram selados com parafina em quatro faces deixando apenas duas faces opostas livres para que a carbonatação ocorresse exclusivamente nesse sentido. Depois de seladas as amostras foram colocadas no interior da câmara de carbonatação, conforme Figura 4.4.



Figura 4.4 - Corpo-de-prova cúbico selado com parafina (à esquerda) e câmara de carbonatação (à direita).

A concentração utilizada foi de $4 \pm 0,5\%$ de CO_2 em relação ao volume da câmara, com temperatura de 30 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 10\%$. Para medir a profundidade de carbonatação as amostras foram cortadas no sentido do fluxo de CO_2 , a fenoftaleína foi aspergida e, após a mudança de coloração da região não carbonatada foram realizadas as medições da profundidade de carbonatação com um paquímetro, conforme mostrado na Figura 4.5.

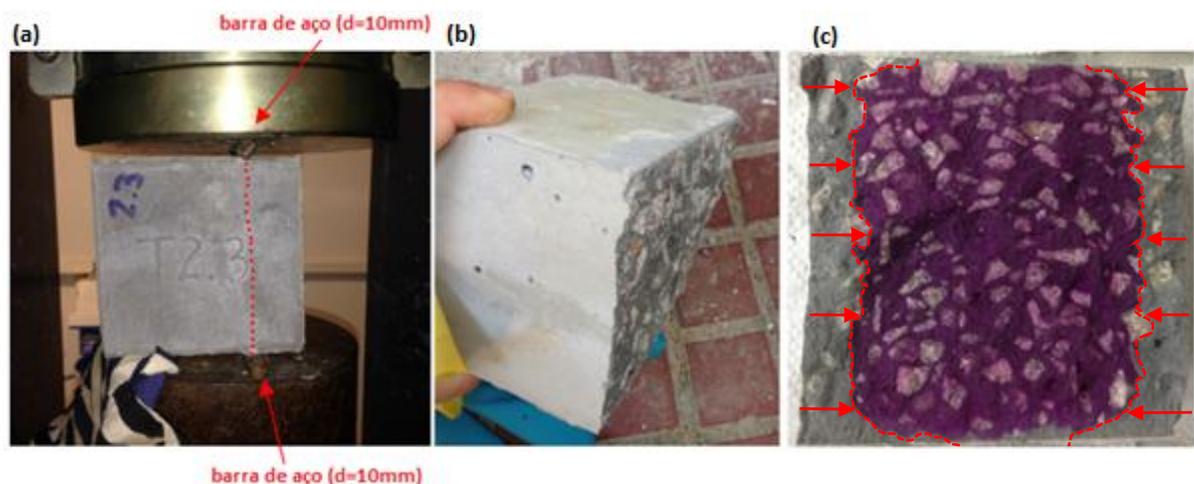


Figura 4.5 - Etapas de medição da profundidade de carbonatação: (a) rompimento da amostra com a projeção da linha de corte; (b) face após a separação; (c) aspersão da fenoftaleína para medição da profundidade carbonatada.

As medições foram realizadas para os seguintes períodos de exposição no interior da câmara: 14, 28, 56, 63 e 70 dias, conforme fluxograma da Figura 4.6. Para cada idade foram analisadas duas amostras, e em cada amostra foram medidas as profundidades de carbonatação em cinco pontos de cada uma das faces por onde o CO₂ entrava. Portanto, para o resultado da profundidade de carbonatação de cada composição de concreto foi considerada a média dos vinte pontos medidos.

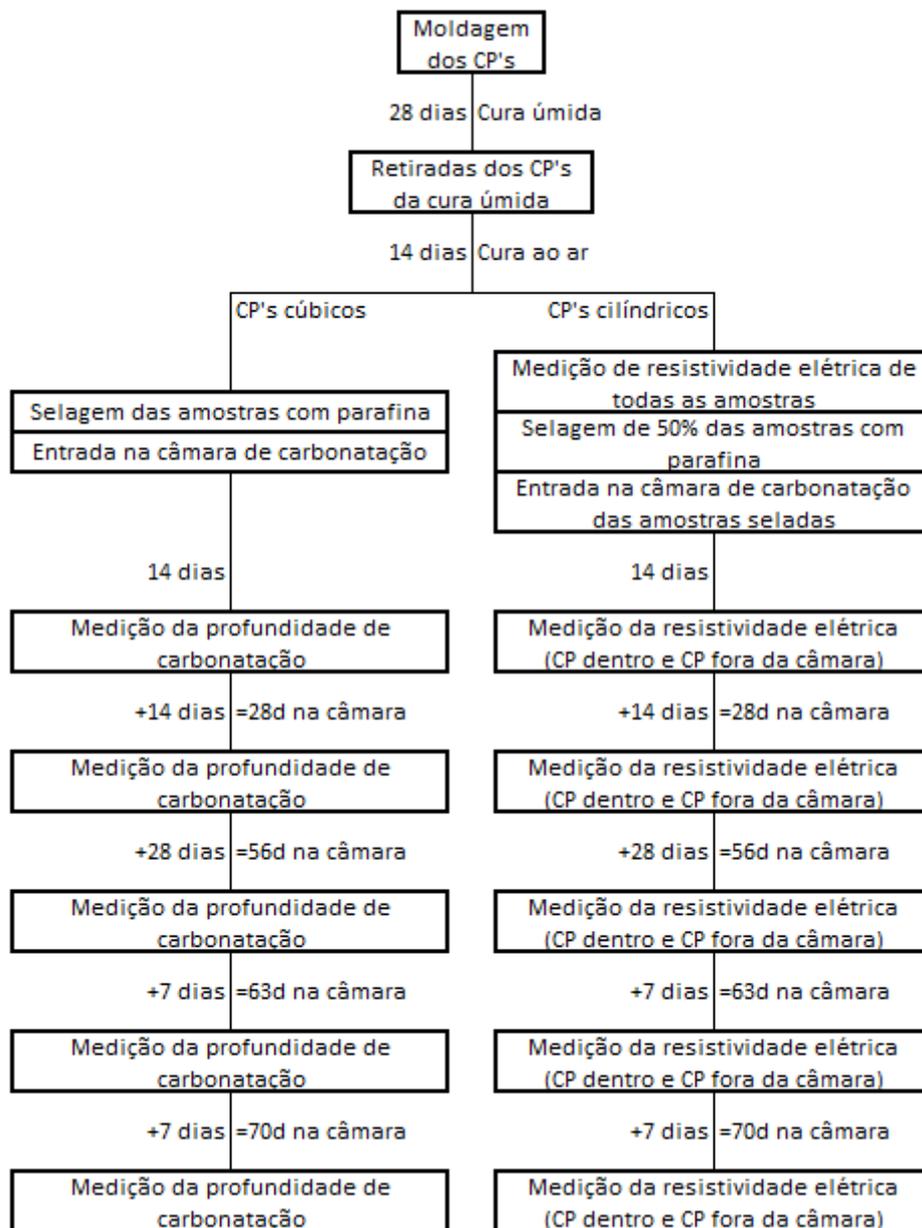


Figura 4.6 - Fluxograma de carbonatação e resistividade elétrica.

5.4.2.4 – Resistividade elétrica

Para verificação da resistividade dos CAA's foi utilizado um aparelho Resipod da marca Proceq, modelo de espaçamento de 50 mm entre as sondas, pertencente ao laboratório de durabilidade do Campus Natal-Central do IFRN.

O Resipod mede a resistividade elétrica do concreto através da aplicação de uma corrente que passa pelas duas sondas das extremidades e da medição da diferença de potencial entre as duas sondas internas, conforme ilustrado na Figura 4.7. A corrente é carregada por íons no líquido dos poros da estrutura do concreto e a resistividade calculada depende do espaçamento destas sondas, seguindo o princípio de Wenner.

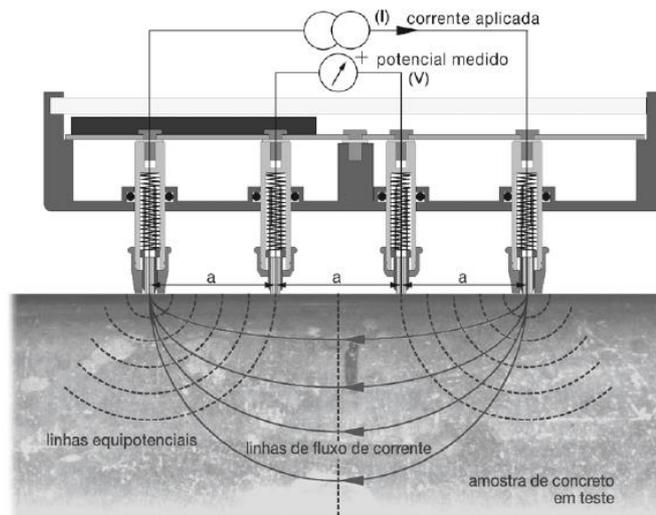


Figura 4.7 - Mecanismo do ensaio de resistividade elétrica. FONTE: Fabricante PROCEQ.

Para esta análise foram utilizados dois corpos-de-prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Essas amostras passaram 28 dias em cura úmida e depois 14 dias secando ao ar em temperatura ambiente.

Após isso, foi realizada a primeira verificação de resistividade, e em seguida uma das amostras cilíndricas foi colocado na câmara de carbonatação juntamente com as amostras cúbicas que seriam utilizadas para a análise de carbonatação. Mas, antes de entrar na câmara o corpo-de-prova foi selado com parafina nas duas

extremidades para que o CO₂ só penetrasse pelas laterais onde seriam realizadas as medições de resistividade.

Desta forma, foram analisadas as resistividades das composições de CAA propostas neste trabalho bem como a influência da carbonatação na resistividade desses CAA's. Para isso, uma das amostras estava dentro da câmara de carbonatação, submetida a uma concentração de $4,0 \pm 0,5\%$ de CO₂, e a outra estava fora da câmara submetida às condições do ambiente no interior do laboratório.

O ensaio de resistividade utilizando o aparelho resipod consiste basicamente de molhar as extremidades das sondas do aparelho, conforme recomendado pelo fabricante, e em seguida pressioná-las contra o corpo-de-prova no sentido longitudinal até a realização da leitura da resistividade, conforme Figura 4.8.

Após a data de entrada na câmara de carbonatação, os ensaios foram realizados nas duas amostras (dentro e fora da câmara) com 14, 28, 56, 63 e 70 dias. Em cada amostra foram realizadas cinco leituras e o resultado utilizado foi a média dos cinco valores para cada amostra em cada uma das idades.

É importante ressaltar que em alguns trabalhos utilizam-se amostras saturadas para análise de resistividade (SAFIUDDIN *et al.*, 2010), no entanto, como pretendia-se aqui analisar o efeito da carbonatação nas amostras de CAA, foram utilizadas as amostras em condições de secagem ao ar e temperatura ambiente, e em condições de exposição a carbonatação acelerada. Além disso, essa condição não saturada se assemelha mais as condições reais das obras. Ribeiro (2014) recomenda a medição sistemática da resistividade do concreto em obra, aliada às medidas de potencial, a fim de refinar o diagnóstico de corrosão.



Figura 4.8 - Ensaio de resistividade elétrica.

4.4.3 – Análise da microestrutura

- **Microscopia eletrônica de varredura**

A microestrutura dos CAA's foi avaliada aos 91 dias através de microscopia eletrônica de varredura com o intuito de identificar os produtos formados nas reações de hidratação do cimento. Para isso foi utilizado equipamento TESCAN (VEGA3-LMU) do laboratório de caracterização de minerais do campus Natal-Central do IFRN.

O procedimento de preparação dos materiais para a análise consistiu na deposição de uma porção do sólido sobre uma fita adesiva de carbono fixada no porta-amostra. As amostras utilizadas tinham aproximadamente 10 mm de diâmetro e foram retiradas do centro de um corpo de prova cilíndrico de 10cm x 20cm.

Após metalização de 60 segundos utilizando recobrimento de ouro, as amostras foram colocadas no microscópio para captura e análise das imagens utilizando tensões entre 10 e 20 Kv, e ampliações de 4.000 a 20.000 vezes. Para identificar os compostos hidratados levou-se em consideração a morfologia da superfície das amostras e a composição química dos elementos identificados nas imagens.

A análise da composição química foi realizada por um espectrômetro de dispersão de energia (EDS) acoplado ao MEV que determinou os elementos químicos na área superficial das amostras em pontos de até 2 μm de diâmetro.

CAPÍTULO 5

Resultados e discussões

5.1 - Caracterização dos materiais anidros

5.1.1 - Área superficial BET

A área superficial específica é uma propriedade importante que pode contribuir para o entendimento dos fenômenos físico-químicos nos quais os materiais estão envolvidos. Além disso, essa propriedade pode ajudar a entender o comportamento dos CAA's no estado fresco e endurecido, pois se relaciona com a viscosidade do CAA fresco e com a compacidade da matriz cimentícia no estado endurecido.

Para os materiais finos no estado anidro componentes dos traços de CAA estudados neste trabalho a área superficial específica foi analisada pelo método BET, e os resultados descritos na Tabela 5.1. Esse método é realizado através da adsorção de gás nitrogênio pelas amostras analisada, então não se pode considerá-lo como uma análise direta da finura material, mas um indicativo dessa finura, pois os resultados sofrem influência da morfologia e da porosidade do material.

Os resultados mostraram que o cimento apresentou a menor área superficial, e a pozolana da casca do arroz a maior. Assim, pode-se dizer que todas as adições minerais são mais finas que o cimento. Além disso, pelas maiores áreas superficiais as adições minerais devem aumentar a demanda de água das misturas de CAA e a sua viscosidade.

Tabela 5.1 - Área superficial específica BET dos materiais finos no estado anidro.

Materiais	CIM	PCA	MK	F	CalH
Área superficial específica BET (m ² /g)	1,15	16,04	8,12	10,90	6,74

** CIM – cimento; MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada

5.1.2 - Composição química e mineralógica

A análise química realizada por FRX caracteriza os materiais finos utilizados nos CAA's destacando-se o elevado teor de sílica (SiO_2) do metacaulim e da pozolana da casca do arroz, o elevado teor de óxido de cálcio (CaO) do cimento e da cal hidratada, e o elevado teor de alumina (Al_2O_3) do metacaulim, conforme Tabela 5.2. Além disso, o teor de óxido de magnésio (MgO) encontrado no filer calcário indica que esse material é derivado de calcário dolomítico.

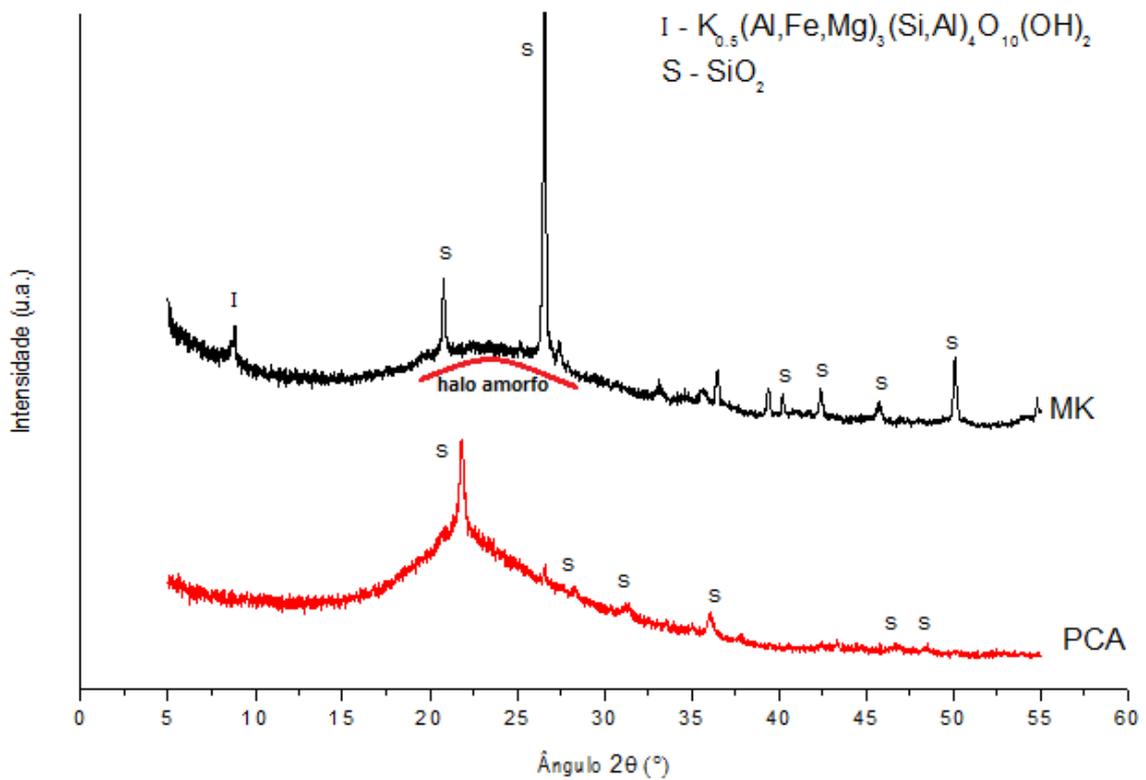
Tabela 5.2 - Composição química dos materiais finos no estado anidro.

Elemento químico	CIM	MK	PCA	F	CalH
	Teor (%)				
CaO	77,696	0,445	0,935	75,880	97,197
SiO ₂	9,624	53,916	92,424	9,956	1,323
Fe ₂ O ₃	7,021	9,901	0,093	2,770	0,468
SO ₃	2,943	0,223	0,134	0,138	0,133
Al ₂ O ₃	1,771	30,344	2,013	2,822	0,397
MgO	-	-	-	4,340	-
K ₂ O	0,467	2,253	2,924	1,457	0,404
TiO ₂	0,337	1,357	-	-	-
MnO	0,076	0,055	0,582	0,086	-
Outros	0,065	1,506	0,895	2,551	0,078

** CIM – cimento; MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário;

CalH – cal hidratada

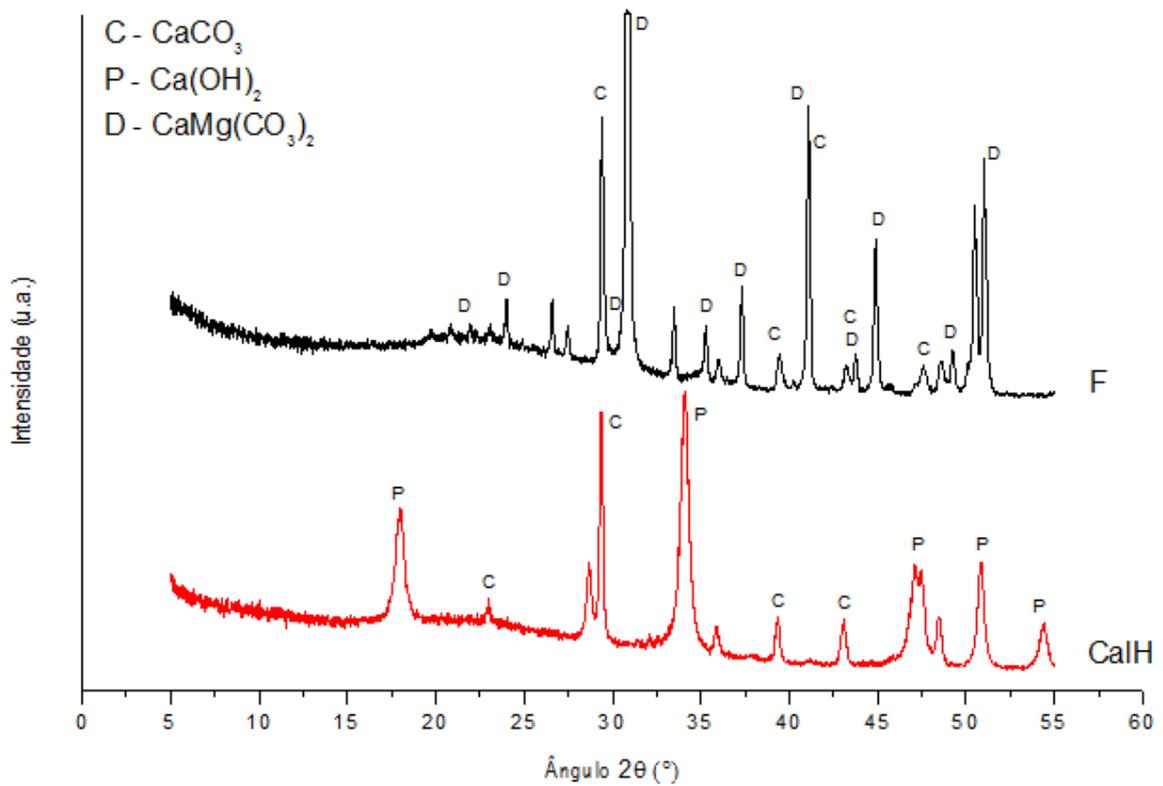
O difratograma de raios X apresentado na Figura 5.1 mostra que a pozolana da casca do arroz é um material predominantemente amorfo e composto de sílica na forma de cristobalita, e o metacaulim é um aluminossilicato com um halo amorfo entre os ângulos 2θ de 20° e 30° .



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz

Figura 5.1 - DRX do metacaulim e pozolana da casca do arroz.

Já o difratograma de raios X apresentado na Figura 5.2 mostra que a cal hidratada é predominantemente cristalina e composta por calcita ($CaCO_3$) e portlandita ($Ca(OH)_2$). O fíler calcário também se mostrou predominantemente cristalino e tem natureza dolomítica, pois é composto por calcita ($CaCO_3$) e dolomita ($CaMg(CO_3)_2$).



** F – filer calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.2 - DRX do filer calcário e cal hidratada.

5.1.3 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos materiais finos

A microscopia eletrônica de varredura mostra a morfologia dos grãos dos materiais finos. Através das imagens observa-se que o cimento apresentou grãos com morfologias semelhantes e superfícies mais lisas, como mostrado na Figura 5.3.

Os grãos do metacaulim apresentaram superfícies bastante rugosas e formatos variáveis, conforme Figura 5.4. A pozolana da casca do arroz apresentou grãos com formatos e superfícies bastante rugosas, como mostrado na Figura 5.5.

O filer calcário apresentou grãos com formatos regulares e superfícies mais lisas, conforme Figura 5.6. Já a cal hidratada apresentou grãos com formatos irregulares e superfícies rugosas, como mostrado na Figura 5.7.

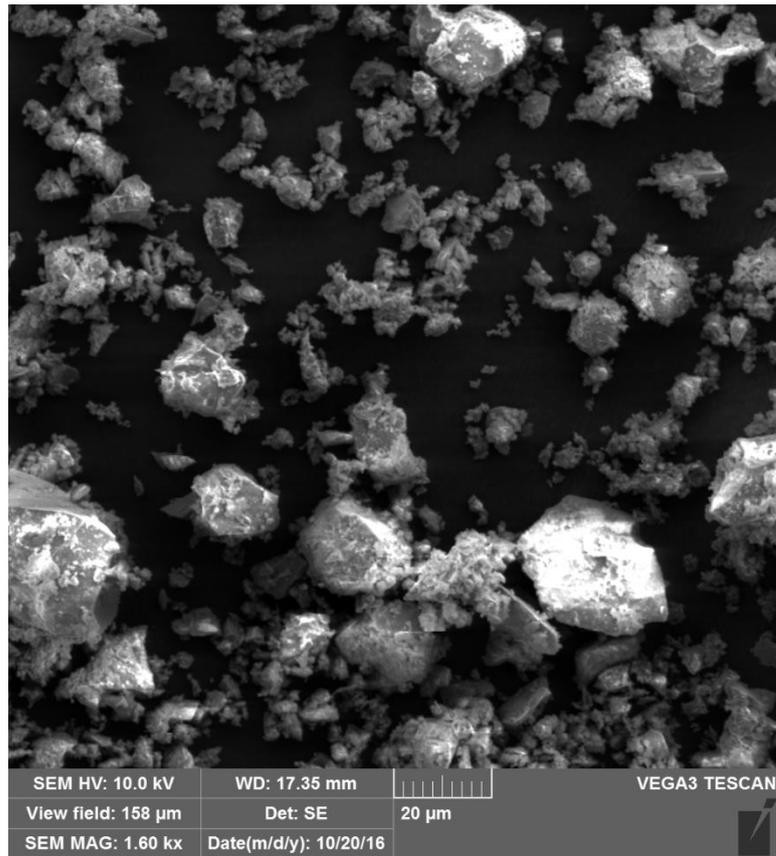


Figura 5.3 - MEV do cimento.

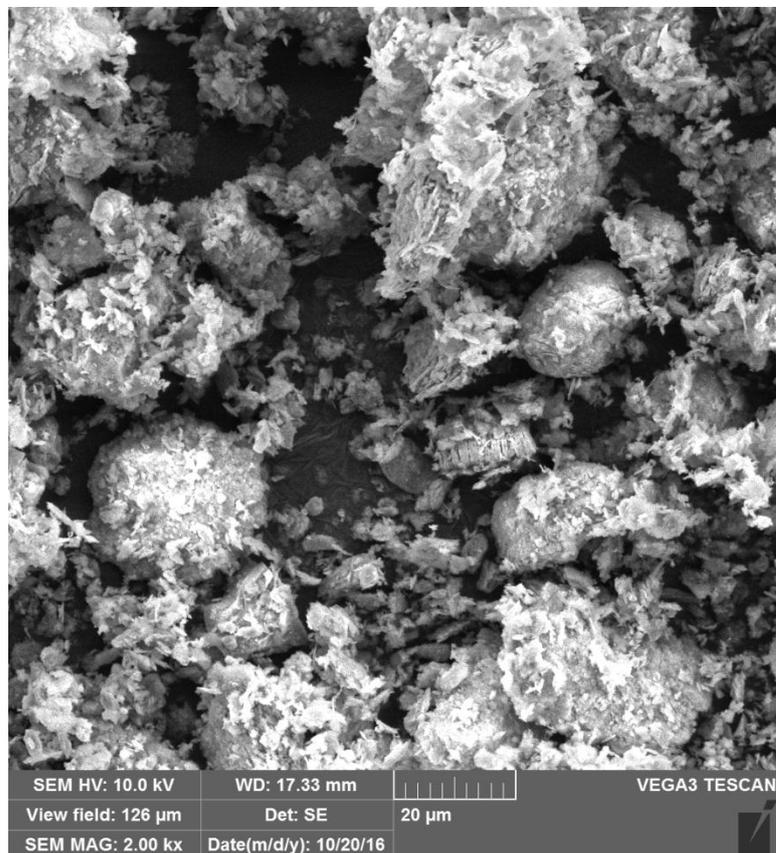


Figura 5.4 - MEV do metacaulim.

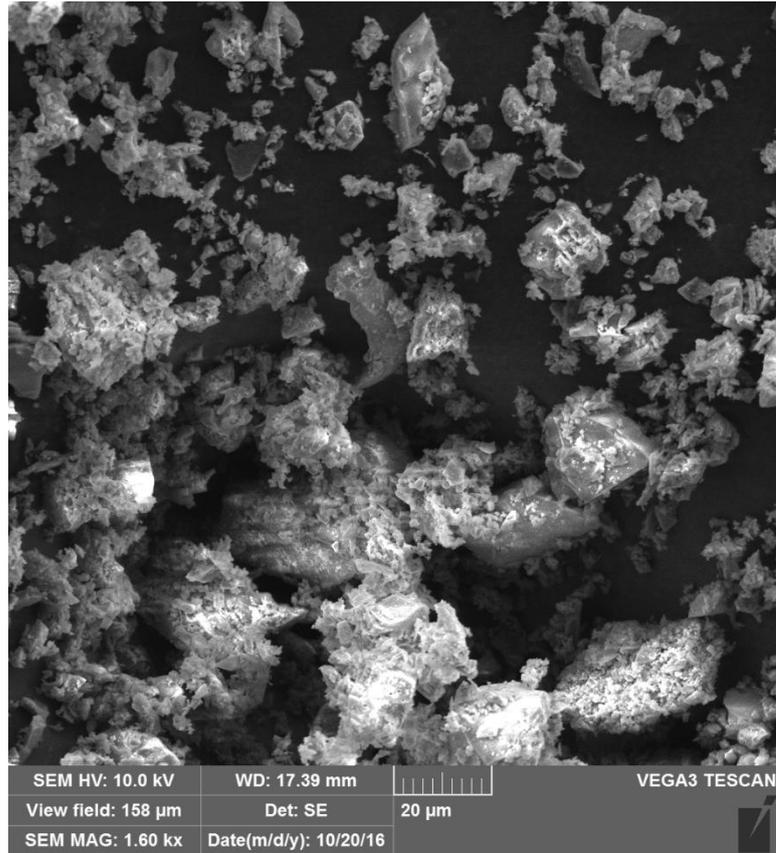


Figura 5.5 - MEV da pozolana da casca do arroz

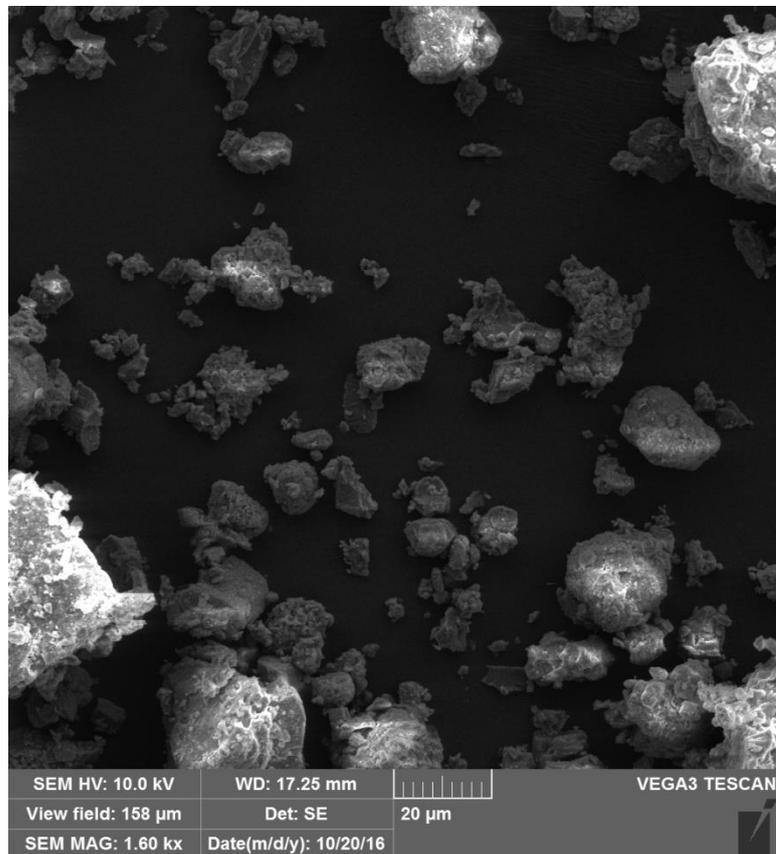


Figura 5.6 - MEV do fíler calcário

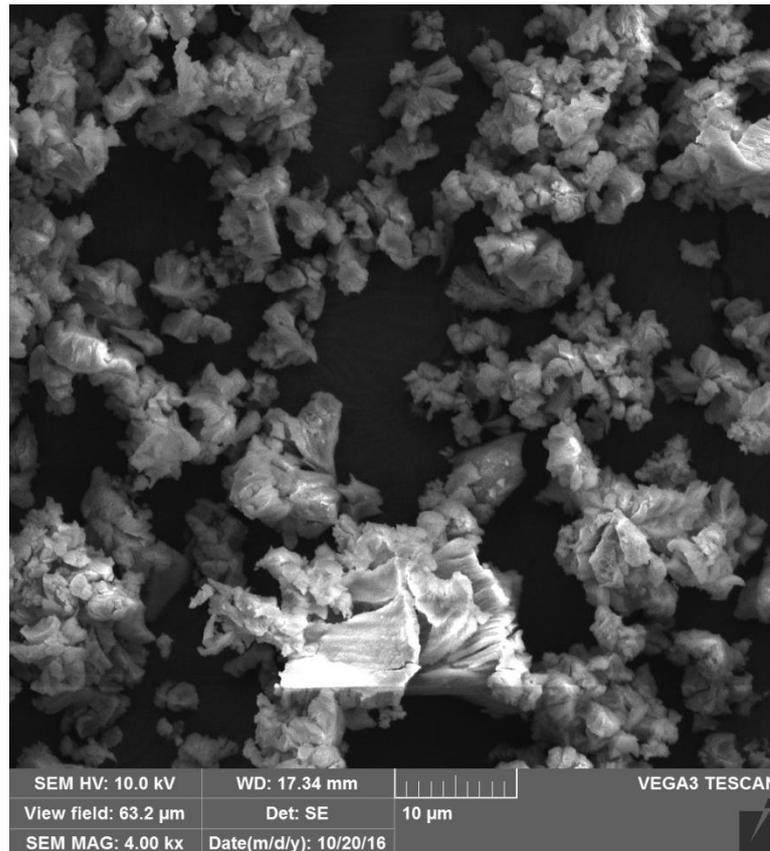


Figura 5.7 - MEV da cal hidratada

5.2 - Avaliação do comportamento dos CAA's no estado fresco

Os traços de CAA analisados são mostrados na Tabela 5.3 onde se apresentam parâmetros importantes para as análises das diferentes composições, como teor de pasta e relação água/finos, parâmetros estes com influência direta sobre as propriedades no estado fresco e endurecido.

Enfatiza-se aqui que todas as composições partiram da composição de referência com $451,1 \text{ kg/m}^3$ e que as reduções do consumo de cimento foram realizadas substituindo 60% do cimento por adições minerais. No entanto, devido as diferenças nas massas específicas dos materiais o consumo final de finos e pasta das composições não poderia ser igual.

Destaca-se mais uma vez que se procurou manter a relação água/finos em massa (kg/m^3) constante para todos os traços, no entanto, testes previamente realizados mostraram que os traços com adições minerais não obtinham características autoadensáveis com o fator água/finos de 0,44, e o traço de

referência não obtinha boa coesão para espalhamentos elevados e relação água/finos de 0,50.

Desta forma, resolveu-se manter a relação água/finos em massa do traço de referência diferente dos demais uma vez que não comprometeria os objetivos deste trabalho. Outro parâmetro importante é a relação água/finos em volume que foi calculada de acordo com as massas específicas dos materiais. Conforme a Tabela 5.3, todos os traços apresentaram relação igual a 1,3, com exceção dos traços MK30F30 e MK30F30+CalH que apresentaram relação igual a 1,4.

Tabela 5.3 - Consumo de materiais por metro cúbico das composições de CAA.

TRAÇOS	CONSUMOS (kg/m ³)							PARÂMETROS				
	CIM	MK	PCA	F	CalH	AM	AG	ÁGUA/ FINOS (kg/m ³)	ADITIVO (%)	PASTA (litros/m ³)	FINOS (kg/m ³)	ÁGUA/ FINOS (lit/m ³)
REFCAA	451,1	0,0	0,0	0,0	0,0	739,8	974,4	0,44	0,52%	346,4	451,1	1,3
PCA30MK20F10	171,1	85,5	128,3	42,8	0,0	701,4	923,8	0,50	1,70%	380,4	427,7	1,3
PCA30MK20F10 +CalH	167,7	83,9	125,8	41,9	21,0	687,6	905,7	0,50	1,70%	392,5	440,2	1,3
PCA30F30	171,4	0,0	128,5	128,5	0,0	702,7	925,5	0,50	1,20%	379,2	428,5	1,3
PCA30F30 +CalH	168,0	0,0	126,0	126,0	21,0	688,9	907,3	0,50	1,20%	391,4	441,1	1,3
MK30F30	173,3	129,9	0,0	129,9	0,0	710,4	935,6	0,50	2,16%	372,5	433,1	1,4
MK30F30 +CalH	169,8	127,4	0,0	127,4	21,2	696,3	917,0	0,50	2,16%	384,9	445,8	1,4

** CIM – cimento; MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada; AM – agregado miúdo; AG – Agregado graúdo

Para avaliação do comportamento dos CAA's no estado fresco foram realizados os ensaios de slump flow (inclusive T500), anel-J (inclusive T500), funil-V e caixa-L. Com os resultados desses ensaios, apresentados na Tabela 5.4, foi realizada a classificação de acordo com os parâmetros especificados pela NBR 15823-1 (ABNT, 2010) para os CAA's no estado fresco.

Tabela 5.4 - Caracterização dos CAA's no estado fresco.

Traços	Ensaio					
	Slump Flow		Anel-J		Funil-V (s)	Caixa-L (h2/h1)
	Espalhamento (mm)	T500 (s)	Espalhamento (mm)	T500 (s)		
REFCAA	780	0,70	680	1,40	4,80	0,98
PCA30MK20F10	740	2,60	695	2,80	11,40	0,84
PCA30MK20F10 +CalH	770	2,40	725	2,50	6,50	0,95
PCA30F30	745	1,00	570	1,80	4,50	0,87
PCA30F30 +CalH	820	0,75	768	1,20	3,20	0,91
MK30F30	760	1,55	695	1,92	6,24	0,91
MK30F30 +CalH	650	1,60	560	3,70	7,11	0,93

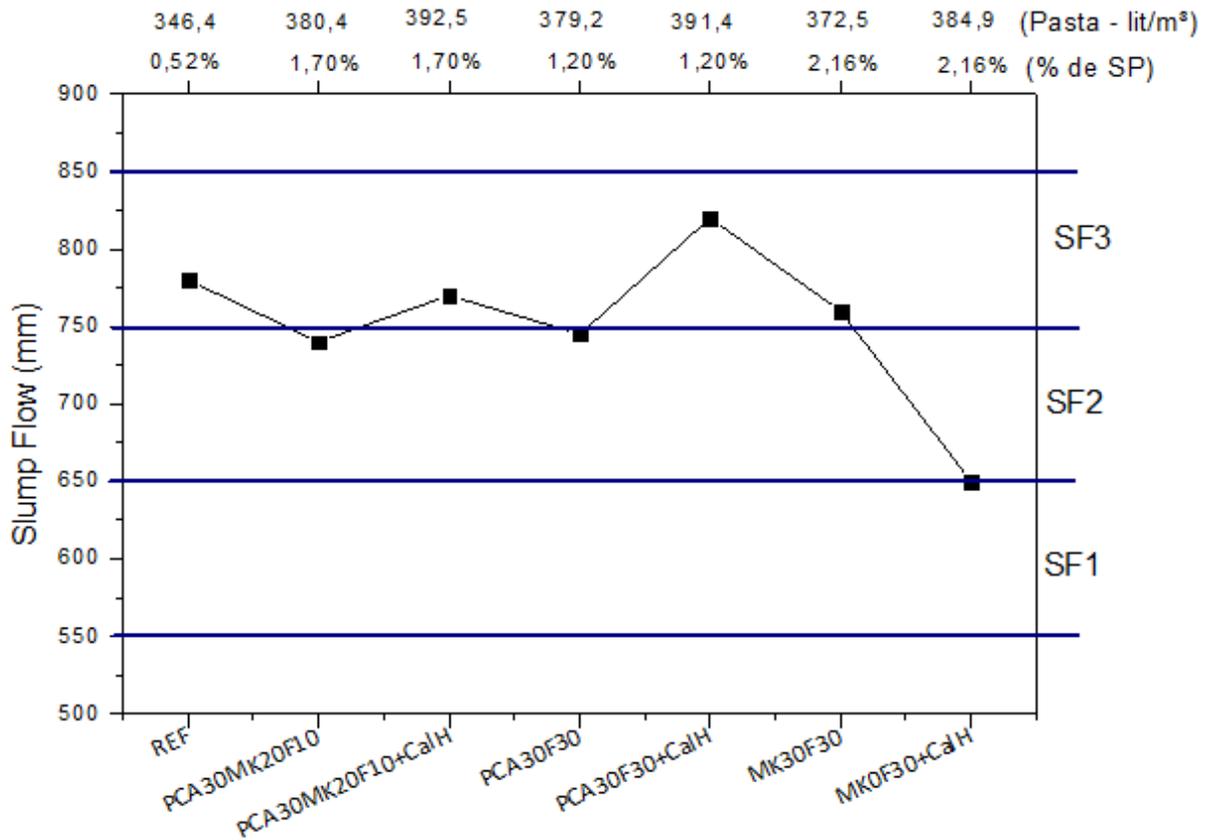
** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada

O ensaio de espalhamento do CAA (slump flow test) tem a proposta de testar a deformabilidade do CAA (OKAMURA e OUCHI, 2003). Segundo o SCCEPG (2005), o espalhamento é uma medida da fluidez total e, portanto, capacidade de enchimento do concreto.

Através desse ensaio pode ser realizada uma avaliação visual para qualquer indicação de separação de argamassa / pasta na circunferência do fluxo e qualquer separação de agregados na área central também fornece alguma indicação da resistência à segregação.

Sendo assim, maiores espalhamentos apresentam menor resistência à deformação e maior fluidez, no entanto, deformações muito elevadas com rápida velocidade (T500) podem provocar exsudação e acarretar bloqueios de fluxo.

O ensaio de espalhamento é um teste prático e classifica os CAA em classes de consistência de SF1 a SF3 (ABNT NBR 15823-1, 2010). A Figura 5.8 mostra a classificação das composições de CAA estudadas neste trabalho.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CaH – cal hidratada

Figura 5.8 – Classificação dos CAA's pelo ensaio de espalhamento.

Os resultados obtidos mostram que as composições de CAA com substituição de 60% de cimento por adições minerais necessitaram de um maior teor de aditivo superplastificante para obtenção de classe de espalhamento semelhante ao traço de referência. Todas as composições foram classificadas como SF2 ou SF3, de acordo com os parâmetros da NBR 15823-1 (ABNT, 2010).

Verificou-se também que a inclusão das adições em substituição ao cimento aumentou a demanda por superplastificante devido a maior área superficial e rugosidade das adições minerais. A PCA, o MK e o fíler calcário têm áreas superficiais 16, 8 e 10 vezes maiores que o cimento, respectivamente. Essas adições também se apresentam mais rugosas que o cimento, por isso a necessidade de maior teor de aditivo.

Neste trabalho o MEV e a área superficial específica dos grãos são utilizados para explicar os fenômenos no estado fresco. No entanto, é importante destacar que

alguns outros parâmetros poderiam colaborar com a interpretação dos resultados nos CAA's no estado fresco, como: densidade dos finos, porosidade de empacotamento teórico, distância de separação interparticular (IPS), espessura teórica da camada que separa os agregados (MPT), granulometria dos materiais finos e área de superfície volumétrica (ASV).

Comparando-se as misturas “PCA30MK20F10” e “PCA30F30”, quando 20% de metacaulim foram substituídos por fíler calcário, houve uma redução do teor de aditivo de 1,70% para 1,20% e ainda assim verificou-se que o espalhamento aumentou discretamente. Já na comparação entre os traços “PCA30F30” e “MK30F30”, a segunda apresentou um teor de aditivo superior ao da primeira, 1,20% e 2,16%, respectivamente, e mesmo assim, esses traços apresentaram espalhamentos semelhantes.

Esses resultados comprovaram que o metacaulim proporcionou maior viscosidade a mistura do que o fíler calcário e a PCA, embora apresente menor área superficial. Esse comportamento do metacaulim pode ser atribuído a elevada reatividade inicial, a morfologia mais irregular e a maior rugosidade dos grãos, o que corrobora Sfikas *et al.* (2014), Kannan e Ganesan (2014), e Vejmelková *et al.* (2011).

A elevada reatividade inicial das composições de CAA com metacaulim está relacionada com o alto teor de alumina presente nesta adição mineral, aliado ao alto teor de alumina presente no C₃A e C₄AF do cimento CP V ARI, conforme verificado por Medeiros (2016). Desta forma, ocorre nessas misturas de CAA uma pega rápida, tornando-as menos trabalháveis após 20 minutos da mistura com a água.

Com relação ao efeito da adição de cal hidratada nas propriedades do CAA no estado fresco, não foi obtido um comportamento semelhante para todas as misturas. Enquanto nas composições “PCA30MK20F10+CalH” e “PCA30F30+CalH” a adição de cal hidratada aumentou o diâmetro de espalhamento significativamente, na “MK30F30+CalH” o comportamento foi oposto, a adição de cal hidratada contribuiu para a diminuição do espalhamento.

Inclusive, a composição “MK30F30+CalH” foi a única composição que obteve diâmetro de espalhamento com diferença maior que 50mm em relação ao traço de referência, o que pode ter ocorrido em função das variações climáticas no dia da mistura ou erro experimental.

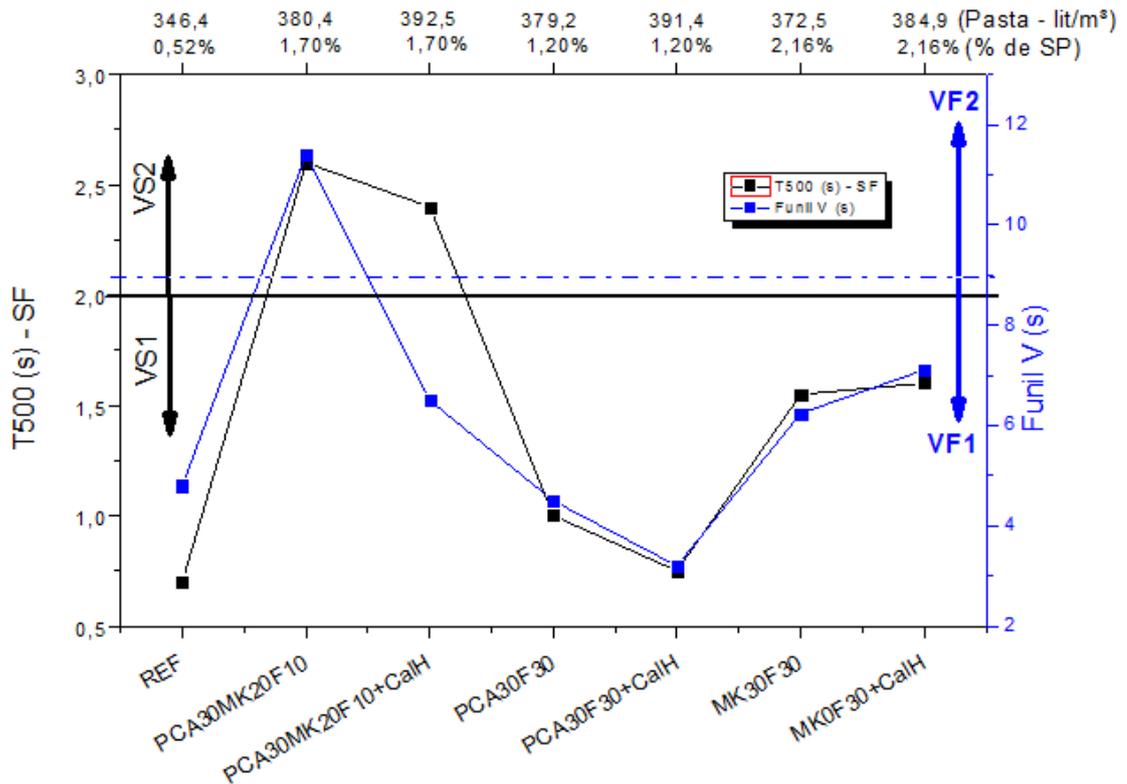
A cal hidratada tem uma área superficial elevada, cerca de seis vezes maior que a do cimento, mas é a menor dentre as adições minerais. Então, pode-se atribuir o aumento do diâmetro de espalhamento das composições com adição de cal hidratada principalmente ao aumento do teor de pasta, pois isso aumenta a lubrificação entre os grãos favorecendo a fluidez da mistura.

O ensaio de espalhamento (slump flow test) é fundamental para caracterização dos CAA's no estado fresco, contudo ele não deve ser realizado isoladamente. Outras análises são necessárias para avaliação da viscosidade e da habilidade passante dos CAA's.

Madandoust e Mousavi (2012) verificaram que em duas amostras distintas, uma apenas com cimento e outra com substituição de 20% de cimento por metacaulim, mesmas relações água/finos e teores de aditivos diferentes, podem apresentar diâmetros de espalhamentos semelhantes e tempos de funil-V completamente diferentes. Assim, é necessário avaliar a capacidade de preenchimento do CAA através do slump flow (diâmetro de espalhamento e T500), e do teste no funil-V.

Os resultados dos ensaios de T500 (slump flow) e do funil-V, apresentados na Figura 5.9, permitem classificar o CAA quanto a sua viscosidade. As composições estudadas neste trabalho foram classificadas de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2010) em VS1 ou VS2, para o ensaio de T500, e VF1 ou VF2 para o ensaio de funil-V. Assim, os maiores valores dos resultados dos ensaios de T500 e funil-V comprovam o aumento na viscosidade da mistura.

Observou-se na Figura 5.9 que as composições com adições minerais apresentaram maior viscosidade que o traço de referência, o que se justifica pela maior área superficial específica dessas adições. No entanto, as composições com 30% de fíler (PCA30F30 e MK30F30) apresentaram menor viscosidade com relação a PCA30MK20F10, o que pode ser atribuído ao formato mais regular e menor rugosidade dos grãos de fíler.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.9 - Classificação dos CAA's pelos ensaios de T500 e funil-V.

O metacaulim demandou mais água (aumentou o teor de superplastificante) e ainda tornou o sistema mais viscoso que a PCA e o fíler, pois a sua substituição pelo fíler entre as composições “PCA30MK20F10” “PCA30F30” ocasionou diminuição do T500 e funil-V. Além disso, a mistura “MK30F30” apresentou maiores tempos que “PCA30F30”. A influência do metacaulim na modificação da viscosidade se deve a sua morfologia, rugosidade e elevada reatividade inicial.

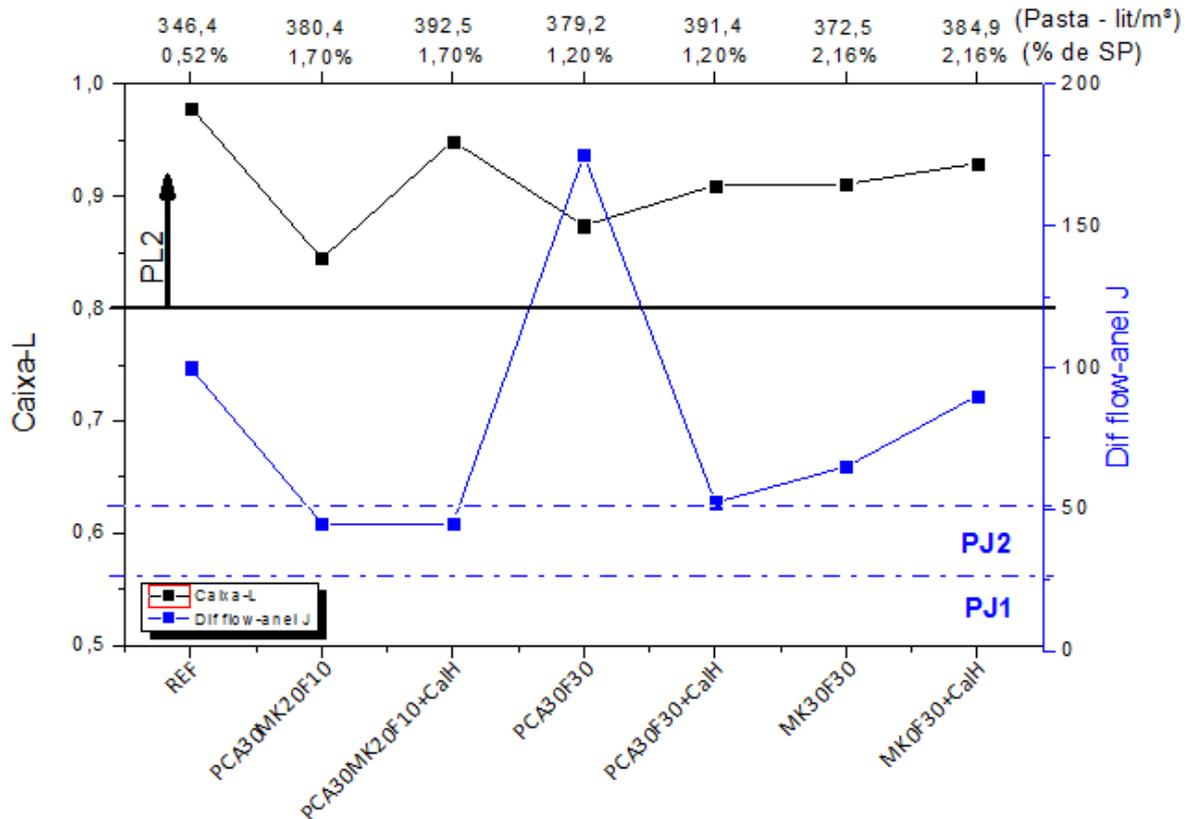
Com relação ao efeito da cal hidratada, embora tenha alta área superficial específica, o fato de ter sido incorporada a mistura como adição e não como substituição se mostrou mais relevante, pois promoveu aumento do teor de pasta da mistura, aumentando a fluidez através da maior lubrificação entre os grãos e diminuindo os resultados de T500 e funil-V que estão relacionados com a viscosidade da mistura, mas sem comprometer a coesão. O traço “MK30F30 +CalH” foi uma exceção, pois apresentou resultados próximos ao do “MK30F30”.

Considerando os parâmetros de viscosidade, T500 (slump flow) e funil-V, observou-se na Figura 5.9 que há uma forte relação entre eles. Pode-se dizer que eles são bons indicativos e coerentes entre si, pois quanto maior o valor desses parâmetros, maior a viscosidade da mistura. Na medida em que um deles aumenta, o outro acompanha na mesma proporção.

Observa-se também que nos traços com adições minerais essa relação entre T500 e funil-V é mais forte que no traço de referência. A única exceção a esse comportamento foi o traço “PCA30MK20F10 +CalH” em que os resultados de T500 e funil-V não diminuíram na mesma proporção com relação ao traço “PCA30MK20F10”, o que pode ter ocorrido em função de erro na medição do T500, por exemplo.

Outra observação importante é que os traços com maior teor de finos pozolânicos apresentaram a maior viscosidade (“PCA30MK20F10” e “PCA30MK20F10 +CalH”), seguidos pelos traços com 30% de metacaulim, o que comprova que o metacaulim tem uma influência maior que a pozolana da casca do arroz como modificador de viscosidade da mistura.

O ensaio da caixa-L classifica a habilidade passante do CAA, conforme apresentação dos resultados na Figura 5.10, e por este ensaio verificou-se que todas as composições obtiveram razões de bloqueio admissíveis para este tipo de concreto (acima de 0,8) de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT,2010). Por outro lado, pode-se perceber que a utilização das adições minerais diminuiu a razão de bloqueio em relação ao traço de referência. Isso ocorre porque as adições minerais proporcionam maior viscosidade ao CAA.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcáreo; CalH – cal hidratada

Figura 5.10 - Classificação dos CAA's pelos ensaios da caixa-L e anel-J.

Outro ensaio que avalia a habilidade passante das misturas de CAA é o ensaio do anel-J prescrito pela NBR 15823-3 (ABNT, 2010), que classifica os CAA's de acordo a diferença de espalhamento entre o ensaio do slump flow e do anel-J.

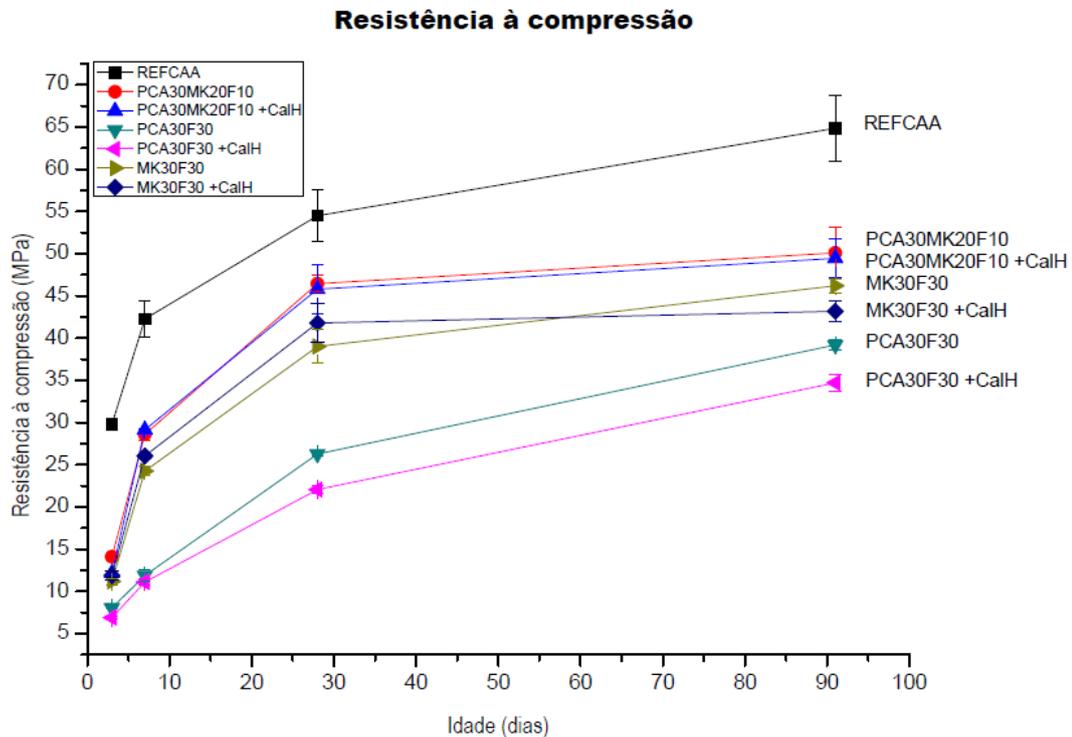
Os resultados dessa análise mostraram que apenas as misturas “PCA30MK20F10” e “PCA30MK20F10 +CalH” foram classificadas como “PJ2”. Então, pode-se concluir que a realização apenas do anel-J não é suficiente para classificação da habilidade passante do CAA, principalmente quando possui diâmetros de espalhamento elevados, próximos da classe SF3.

5.3 - Avaliação do comportamento dos CAA's no estado endurecido

5.3.1 – Análise do comportamento mecânico

- Resistência à compressão

A análise dos resultados da resistência à compressão, mostrados na Figura 5.11, revela que a substituição de 60% do cimento do traço de referência por adições minerais, independentemente de quais sejam, promoveu uma queda considerável nos resultados desta propriedade, de 15 a 60% em relação ao REFCAA aos 28 dias.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.11 - Curvas de crescimento das resistências à compressão dos CAA's.

Esse comportamento se justifica pelo maior fator água/finos em massa apresentado nas composições com adições minerais. Conforme explica Safiuddin *et al.* (2010), os resultados de resistência à compressão dos CAA's aumentam com

uma menor relação água/finos, pois ocorre diminuição da porosidade e melhora da microestrutura da matriz cimentícia e zona de transição pasta-agregado graúdo.

Por outro lado, pesquisas anteriores com a utilização de metacaulim (KANNAN e GANESAN, 2014; MADANDOUST e MOUSAVI, 2012; KAVITHA *et al.*, 2015), ou pozolana da casca do arroz (SAFIUDDIN *et al.*, 2010; LE e LUDWIG, 2016; CHOPRA *et al.*, 2015) mostram que a utilização desses materiais como substitutos parciais do cimento contribui para o aumento da resistência à compressão em relação aos traços de referência quando utilizados em percentuais de substituição de até 40%.

Isso ocorre porque o metacaulim possui elevada área superficial e relevante atividade pozolânica, além de favorecer a hidratação do cimento através de um efeito físico (MADANDOUST e MOUSAVI, 2012). Além disso, a pozolana da casca do arroz possui alto teor de sílica e também elevada área superficial específica, que melhora o seu efeito fíler e garante boa atividade pozolânica (SAFIUDDIN *et al.*, 2010; LE e LUDWIG, 2016).

Então, a elevada finura e atividade pozolânica dessas duas adições minerais permite com que seja formada uma quantidade significativa de C-S-H adicional, que refina a estrutura porosa e aumenta a resistência à compressão dos CAA's (LE e LUDWIG, 2016).

Os resultados obtidos aos 3 dias variaram entre 6,90 e 14,10 MPa para os traços com adições minerais, e o traço de referência obteve 27,00 MPa. Já aos 7 dias os resultados das compsoições com adições minerais variaram entre 11,10 e 29,14 MPa, enquanto o traço de referência alcançou 42,27 MPa. Desta forma, observou-se que nas primeiras idades (3 e 7 dias) é bastante significativa a contribuição do metacaulim no aumento da resistência a compressão, o que corrobora Madandoust e Mousavi (2012) e Vejmelková *et al.* (2011).

Segundo Perlot *et al.* (2013), além de ter elevada atividade pozolânica, o metacaulim favorece a hidratação do cimento através de um efeito físico, devido à sua elevada área superficial e acelera a hidratação do cimento através da sua composição química e modificação da composição iônica da solução dos poros. No curto prazo, esta ativação de cimento anidro na presença de metacaulim acelera o endurecimento dos materiais cimentantes.

Para analisar a influência do metacaulim e da pozolana da casca do arroz no desempenho mecânico dos CAA's comparou-se as composições "PCA30F30" e "MK30F30". Com isso, verificou-se que o metacaulim proporciona maiores ganhos de resistência à compressão em todas as idades com relação a pozolana da casca do arroz, o que corrobora Kannan e Ganesan (2014).

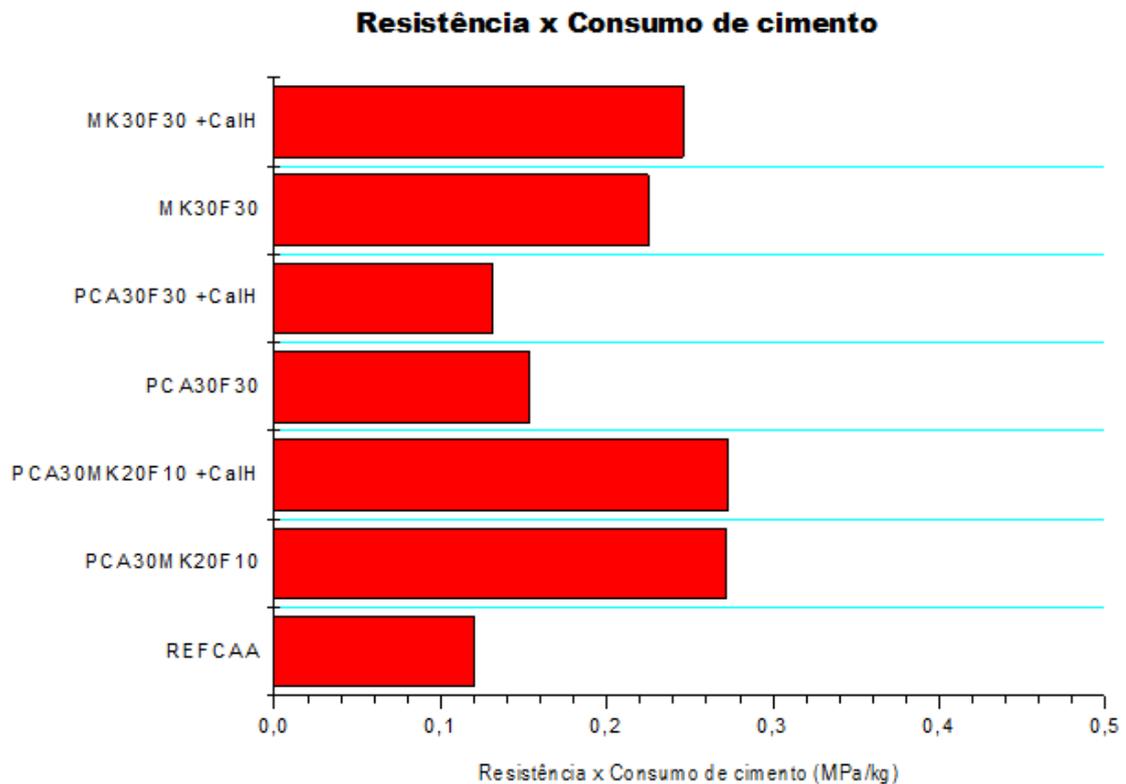
Enquanto a resistência à compressão aos 28 dias da composição "PCA30F30" foi de 26,2 MPa, a da composição "MK30F30" foi de 39,0 MPa, representando um aumento de cerca de 48%. No entanto, viu-se também que os dois materiais juntos apresentam boa sinergia, pois o resultado da resistência à compressão da composição "PCA30MK20F10" foi maior que das outras duas.

Embora a composição "MK30F30" tenha um teor mais elevado de metacaulim, a composição "30PCA20MK10F" apresentou melhores resultados de resistência à compressão em todas as idades. Aos 28 dias a composição "MK30F30" apresentou resultado de resistência à compressão aproximadamente 16% menor que "PCA30MK20F10". Isso ocorreu em virtude da substituição do fíler da primeira composição pela pozolana da casca do arroz (PCA) da segunda, uma vez que a PCA é um material reativo e o fíler é inerte.

Todavia, ressalta-se que as composições de CAA utilizadas neste trabalho com adições minerais regionais como o fíler calcário e o metacaulim apresentaram resistência à compressão aos 28 dias da ordem de 40 MPa. Esse resultado mostra a eficiência desses traços com adições regionais quando comparados a traços com cinza volante e microssilícia, como os estudados por Wongkeo *et al.* (2014).

A Figura 5.12 mostra a relação de eficiência de cada formulação, considerando eficiência como a relação entre a resistência à compressão (MPa) e consumo de cimento (kg/m^3). Su e Miao (2003) consideram valores entre 0,11 a 0,14 MPa/kg para desenvolver concretos de média resistência com baixo teor de cimento.

Yu *et al.* (2015) produziu concretos de alta performance eco amigáveis e obteve índices que variaram entre 0,16 e 0,19, superando os índices propostos por Su e Miao (2003). Os CAA's estudados neste trabalho apresentaram coeficientes entre 0,13 e 0,27, conforme mostrado na Figura 5.12, demonstrando maior eficiência que as composições estudadas por Yu *et al.* (2015) e Su e Miao (2003).



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filler calcário; CaIH – cal hidratada

Figura 5.12 – Relação entre resistência à compressão (MPa) e consumo de cimento (Kg/m^3).

Observando-se o efeito da adição de 5% de cal hidratada, pode-se dizer que ela não foi relevante para a maioria das composições estudadas, independentemente da idade analisada. Nem mesmo aos 91 dias isso foi observado, quando se esperaria um aumento na resistência à compressão nas composições com adição de cal devido a sua reação com as adições minerais. A única exceção foi a composição “MK30F30 +CaIH” aos 28 dias quando a adição de cal hidratada contribuiu para um aumento aproximado de 7% na resistência à compressão com relação à composição sem cal hidratada “MK30F30”.

Desta forma, pode-se dizer que a quantidade de cal hidratada adicionada foi insuficiente para aumentar as reações pozolânicas. Ou, outra possibilidade seria a participação da cal hidratada nas reações pozolânicas com as adições minerais formando um C-S-H adicional que não contribuiu para o aumento da resistência à compressão, semelhante ao que Hoppe Filho (2008) relatou.

Para investigar com maior profundidade o efeito das adições de cal hidratada nas reações de hidratação do material cimentício seriam necessárias outras análises, como a difração de raios-x e a termogravimetria, por exemplo.

- **Velocidade do pulso ultrassônico**

Uma avaliação complementar ao ensaio de resistência à compressão que pode ser feita para avaliação da qualidade do concreto é o ensaio de ultrassom. Assim como acontece com a resistência à compressão, os resultados do ensaio de velocidade do pulso ultrassônico estão relacionados com a porosidade do concreto.

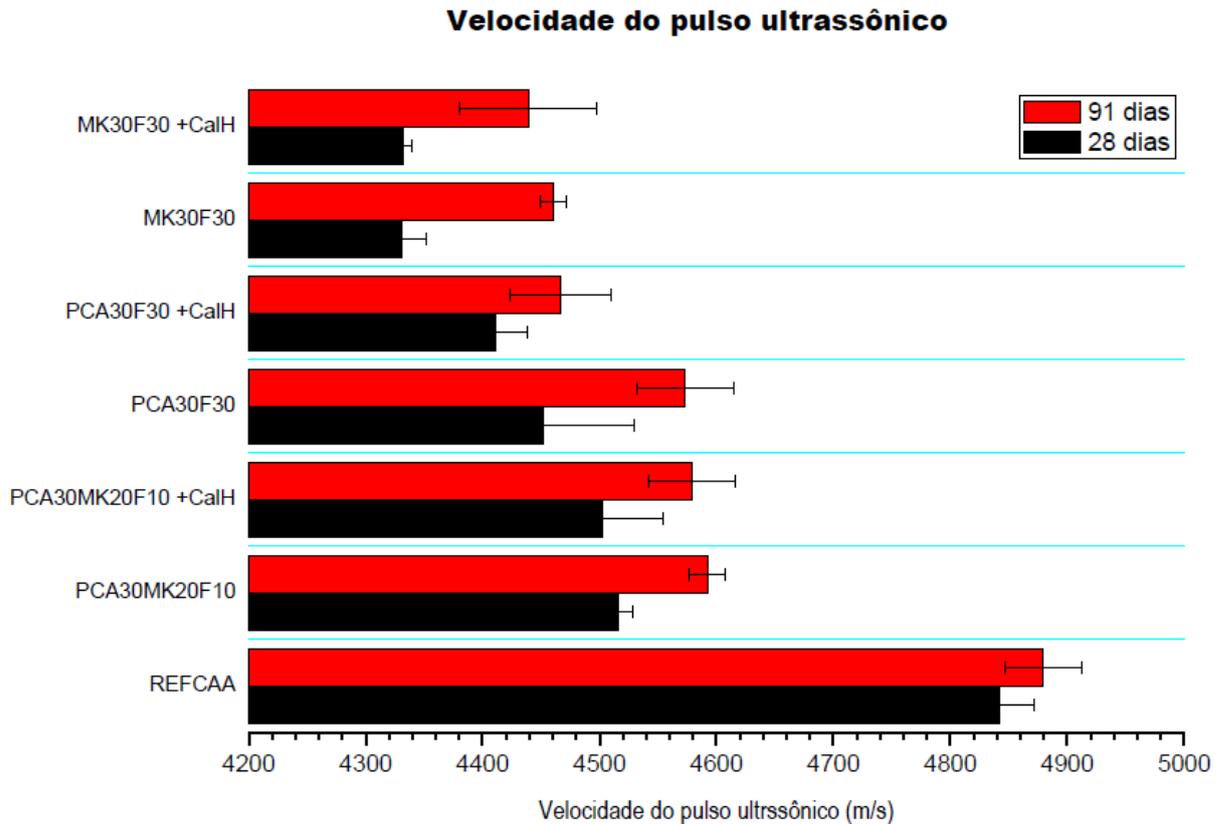
Logo, uma redução na porosidade proporciona maiores velocidades de propagação das ondas. Isso pode ser obtido por redução da relação água/finos, maior volume de C-S-H, e um bom empacotamento das partículas da mistura (SAFIUDDIN *et al.*, 2010).

Portanto, Whitehurst (1951, *apud* MADANDOUST e MOUSAVI, 2012) propôs uma classificação da qualidade dos concretos de acordo com a velocidade de pulso ultrassônico apresentada, conforme Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Classificação do concreto de acordo com a velocidade do pulso ultrassônico. FONTE: Adaptado de WHITEHURST (1951, *apud* MADANDOUST e MOUSAVI, 2012).

Velocidade do pulso ultrassônico	Classificação do concreto
Maior ou igual a 4500 m/s	Excelente
3500-4500 m/s	Bom
3000-3500 m/s	Indefinido ou duvidoso
2000-3000 m/s	Fraco
Menor que 2000 m/s	Muito fraco

Os resultados da velocidade do pulso ultrassônico mostrados na Figura 5.13 revelam que todas as misturas com substituição de 60% do cimento por adições minerais tiveram uma redução significativa de velocidade com relação ao traço de referência, tanto aos 28 como aos 91 dias. Os valores das velocidades variaram aos 28 dias entre 4330 e 4841 m/s, e aos 91 dias variaram entre 4439 e 4879 m/s.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.13 - Velocidade do pulso ultrassônico dos CAA's.

As reduções dos resultados dos traços com adições minerais em relação aos traços de referência variaram aos 28 dias entre 7 e 11%, e aos 91 dias entre 6 e 9%. Para todos os traços observa-se um aumento das velocidades entre as idades de 28 e 91 dias, visto que essa propriedade melhora com a evolução da resistência do CAA (SUA-IAM *et al.*, 2016).

Isso significa que a estrutura porosa do traço de referência é mais densa, pois, de acordo com Sua-iam *et al.* (2016), a velocidade do pulso ultrassônico do CAA está relacionada com a densidade do material, sendo mais elevada a velocidade quanto mais densa for a estrutura. Logo, dentre as composições com adições minerais a mais densa é “PCA30MK20F10”.

Assim como na resistência à compressão, os resultados da velocidade do pulso ultrassônico de todas as misturas com adições minerais foram inferiores aos resultados do traço de referência. Como as duas propriedades estão relacionadas

com a densidade da estrutura porosa do CAA, pode-se dizer que os seus resultados foram influenciados pelos mesmos fatores: o aumento do fator água/finos em massa e a utilização de fíler calcário que é uma adição mineral inerte, sem atividade pozolânica.

Embora os resultados das composições com adições minerais tenham sido menores que o traço de referência, de acordo com a classificação proposta por WHITEHURST (1951, *apud* MADANDOUST e MOUSAVI, 2012), apresentada na Tabela 5.5, todos os concretos analisados neste trabalho estariam classificados como bons ou excelentes.

Nos resultados de velocidade do pulso ultrassônico das composições com adições minerais não se observa a mesma tendência dos resultados de resistência à compressão, pois a mistura “MK30F30” obteve resultado significativamente melhor que a mistura “PCA30F30” na resistência a compressão, enquanto na velocidade do pulso ultrassônico a mistura “PCA30F30” obteve resultado um pouco melhor que “MK30F30”.

Esse resultado é contraditório visto que as duas propriedades estão relacionadas com a estrutura porosa, sendo maiores a velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão quanto menor for a porosidade.

Com relação a adição de cal hidratada, pode-se afirmar que não teve representatividade, e chegou a ter efeito negativo, como no caso da composição “PCA30F30 +CalH” aos 28 e 91 dias.

- **Módulo de elasticidade estático**

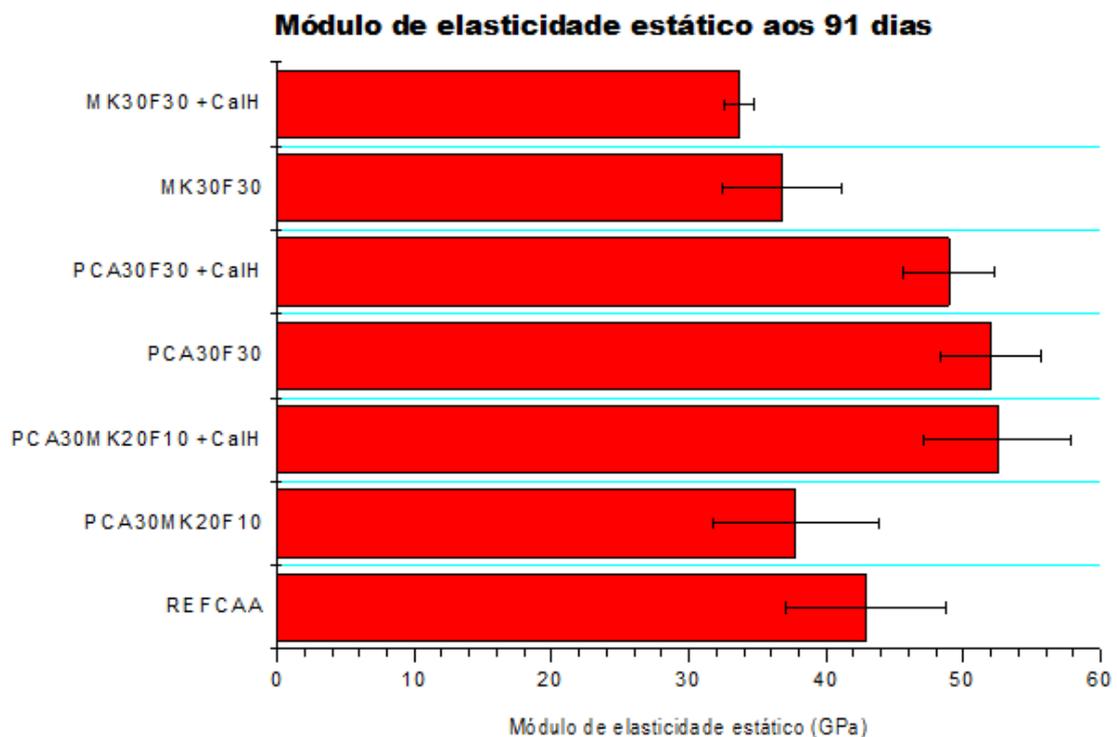
A avaliação do módulo de elasticidade é importante dada a sua relação com as deformações estruturais, por isso, neste trabalho foi realizada a análise do módulo de elasticidade estático.

Como um tipo de concreto especial, o CAA pode indicar valores de relação tensão x deformação diferentes, uma vez que misturas de CAA normalmente têm uma menor quantidade de agregado graúdo e maior quantidade de pasta (FELEKOGLU *et al.*, 2007), e os agregados graúdos são geralmente mais rígidos

que as pastas cimentícias. Entretanto, a literatura apresenta muitos resultados contraditórios, o que dificulta uma consideração mais precisa sobre essa propriedade.

Para UYSAL e YILMAZ (2011), o aumento da resistência à compressão provoca aumento dos módulos de elasticidade estático e dinâmico. No entanto, ao observar os resultados da Figura 5.14, não se percebe uma relação com os resultados de resistência à compressão, pois a composição “PCA30F30” apresentou menores resultados de resistência à compressão e o maior módulo de elasticidade estático.

Os resultados de módulo de elasticidade aos 91 dias mostrados na Figura 5.14 variaram entre 33,65 GPa e 52,47 GPa, sendo o menor resultado da composição “MK30F30+CalH” e o maior da composição “PCA30F30”.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.14 - Módulo de elasticidade estático dos CAA's aos 91 dias.

Uysal *et al.* (2012) afirmam que a utilização de filer causa diminuição no módulo de elasticidade estático entre 7 e 16%. No entanto, observou-se que a

maioria das composições apresentou resultados maiores que o traço de referência, mesmo utilizando fíler. Os traços “MK30F30” e “MK30F30 +CalH” foram exceções.

Além disso, não houve uma tendência constante sobre a utilização da adição de cal hidratada. Para os traços “PCA30F30” e “MK30F30” a adição de cal hidratada ocasionou redução do módulo de elasticidade, enquanto para o traço “PCA30MK30F30” a adição de cal hidratada ocasionou aumento do módulo de elasticidade estático.

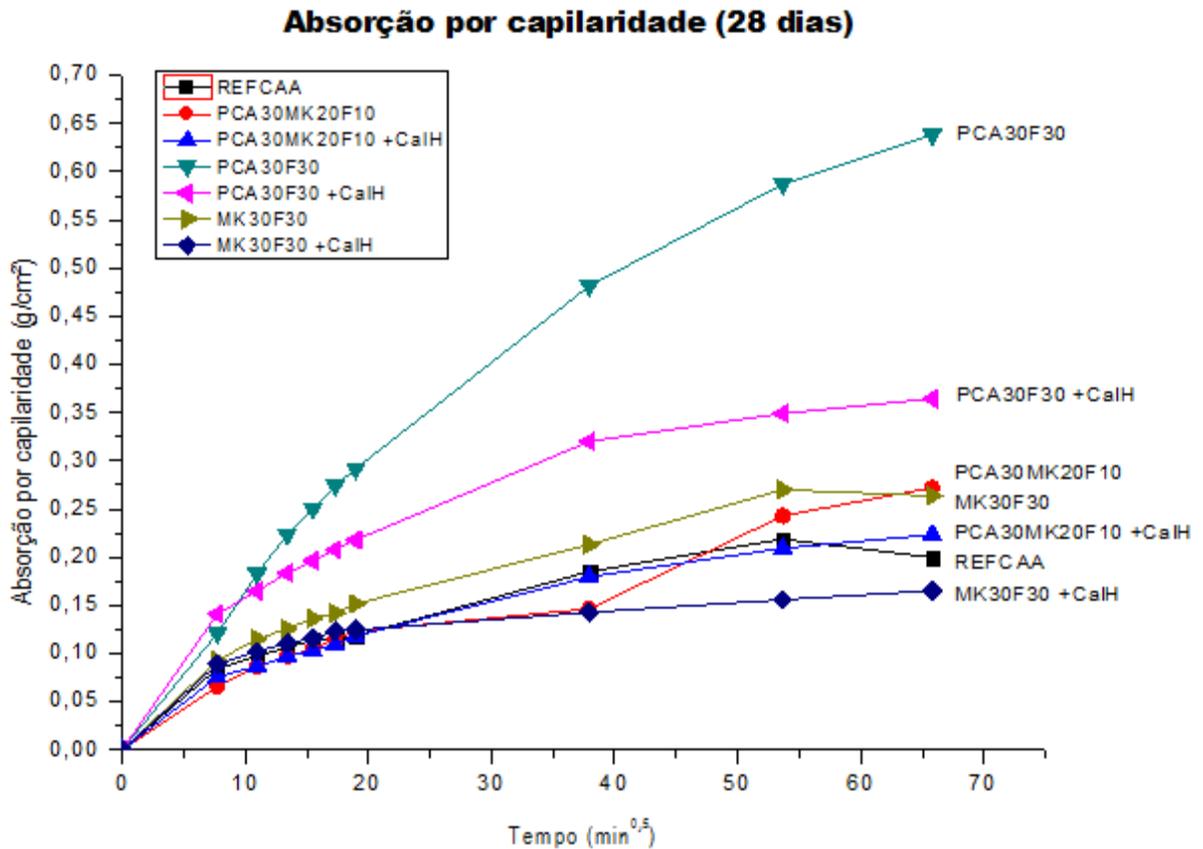
5.3.2 – Indicativos de durabilidade

- **Absorção de água por capilaridade**

A absorção por capilaridade aos 28 dias, mostrada na Figura 5.15, da maior parte das composições estudadas foi superior a absorção do traço de referência, com exceção do traço “MK30F30 +CalH”. Além disso, os maiores resultados foram apresentados pela composição “PCA30F30”, e as misturas “MK30F30” e “PCA30MK20F10” apresentaram resultados próximos. Isso está coerente com os resultados de resistência à compressão, pois o traço “PCA30F30” apresentou menor resistência aos 28 dias.

Sabe-se que a resistência à compressão está relacionada com a estrutura porosa da matriz cimentícia, e, segundo Perlot *et al.* (2013), a absorção por capilaridade também está relacionada com a porosidade da matriz cimentícia, principalmente com os macroporos (PERLOT *et al.*, 2013). Assim, pode-se dizer que as divergências entre os resultados da resistência à compressão e absorção por capilaridade estão relacionadas ao tamanho dos poros das matrizes cimentícias.

Ollivier e Vichot (2014) complementam que a altura de ascensão capilar ao longo do tempo e a massa de água absorvida por unidade de seção ao longo do tempo são diretamente proporcionais ao raio médio dos poros do concreto.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.15 - Absorção de água por capilaridade dos CAA's aos 28 dias.

Logo, o maior fator água/finos (SAFIUDDIN *et al.*, 2010) e a utilização de filer calcário (SILVA e BRITO, 2015) contribuíram para o aumento da absorção por capilaridade com um incremento da porosidade e do tamanho dos poros nas composições com adições minerais. Além disso, comparando as composições “PCA30F30” e “MK30F30”, verifica-se que o desempenho do metacaulim foi bastante superior ao da pozolana da casca do arroz, assim como na resistência à compressão.

Isso significa que o metacaulim foi mais eficiente no refinamento da estrutura porosa em relação a pozolana da casca do arroz, pois, segundo Kannan e Ganesan (2014), o metacaulim possui elevada reatividade e produz C-S-H adicional levando a redução do tamanho dos poros.

Para as composições estudadas neste trabalho a adição de cal hidratada se mostrou eficiente na redução da absorção por capilaridade, embora não tenha

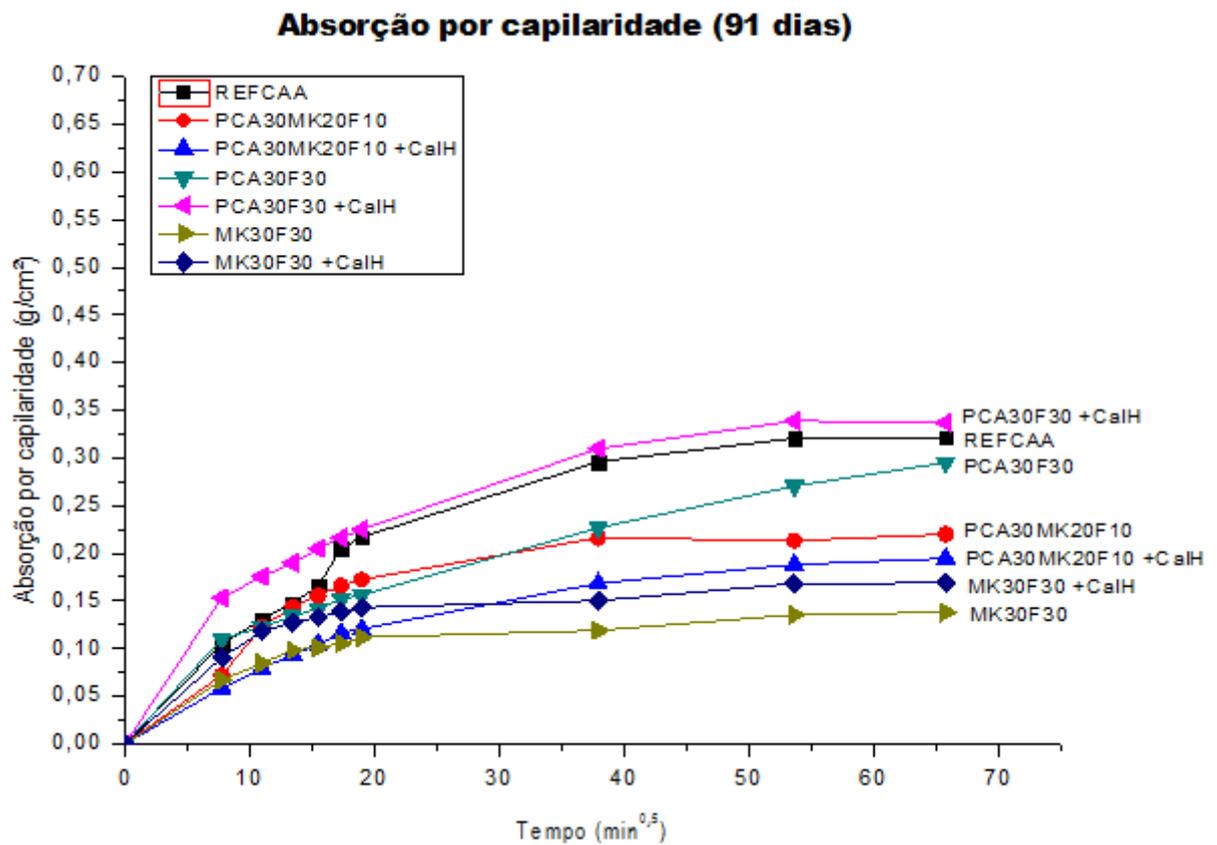
aumentado a resistência das composições de CAA. Para Anjos *et al.* (2015) a adição de cal hidratada contribui para redução da absorção por capilaridade principalmente porque essas propriedades estão relacionadas com a estrutura porosa do material, que é refinada devido a produção de C-S-H secundário oriundo das reações pozolânicas entre as adições minerais e a cal hidratada.

Desta forma, esperava-se que a adição de cal hidratada proporcionasse aumento da resistência à compressão aos CAA's estudados neste trabalho, o que não ocorreu. Então, pode-se dizer que a redução da absorção por capilaridade nas composições com adição de cal hidratada é devido a produção de C-S-H adicional, que reduziu a porosidade do CAA, mas não aumentou a resistência à compressão.

Os resultados dos testes de absorção por capilaridade aos 91 dias mostrados na Figura 5.16 revelam que todos os traços com adições minerais mantiveram ou melhoraram a intensidade de absorção capilar. Com isso, apenas a composição "PCA30F30" obteve absorção capilar maior que o traço de referência. Essa melhora nos resultados das composições com adições minerais pode ser atribuída às reações pozolânicas.

Para a idade de 91 dias o desempenho do metacaulim continuou significativamente melhor que o da pozolana da casca do arroz e a adição de cal hidratada se mostrou eficaz apenas na composição "PCA30MK20F10 +CalH".

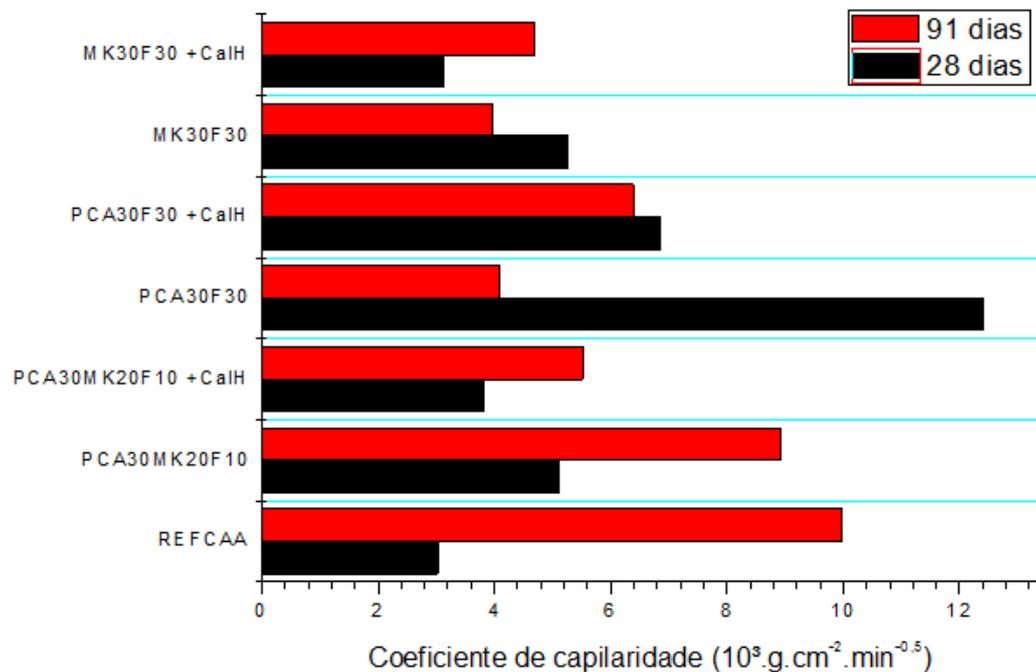
No entanto, Leung *et al.* (2016) afirma que o teste de capilaridade só é aplicado sobre a superfície do concreto e não fornece muita informação sobre as propriedades da matriz do concreto. Além disso, o teor de umidade inicial do concreto também altera a absorção adicional de água.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.16 – Absorção de água por capilaridade dos CAA's aos 91 dias.

A Figura 5.17 mostra uma forte tendência de redução dos coeficientes de capilaridade para as composições de CAA com adições minerais aos 91 dias, em relação ao REFCAA, o que implica melhor comportamento com relação a durabilidade. Segundo Badogiannis *et al.* (2015), a substituição de cimento por metacaulim em percentuais de até 20% pode reduzir a absorção por capilaridade em até 41%.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.17 - Coeficientes de absorção por capilaridade dos CAA's aos 28 e 91 dias.

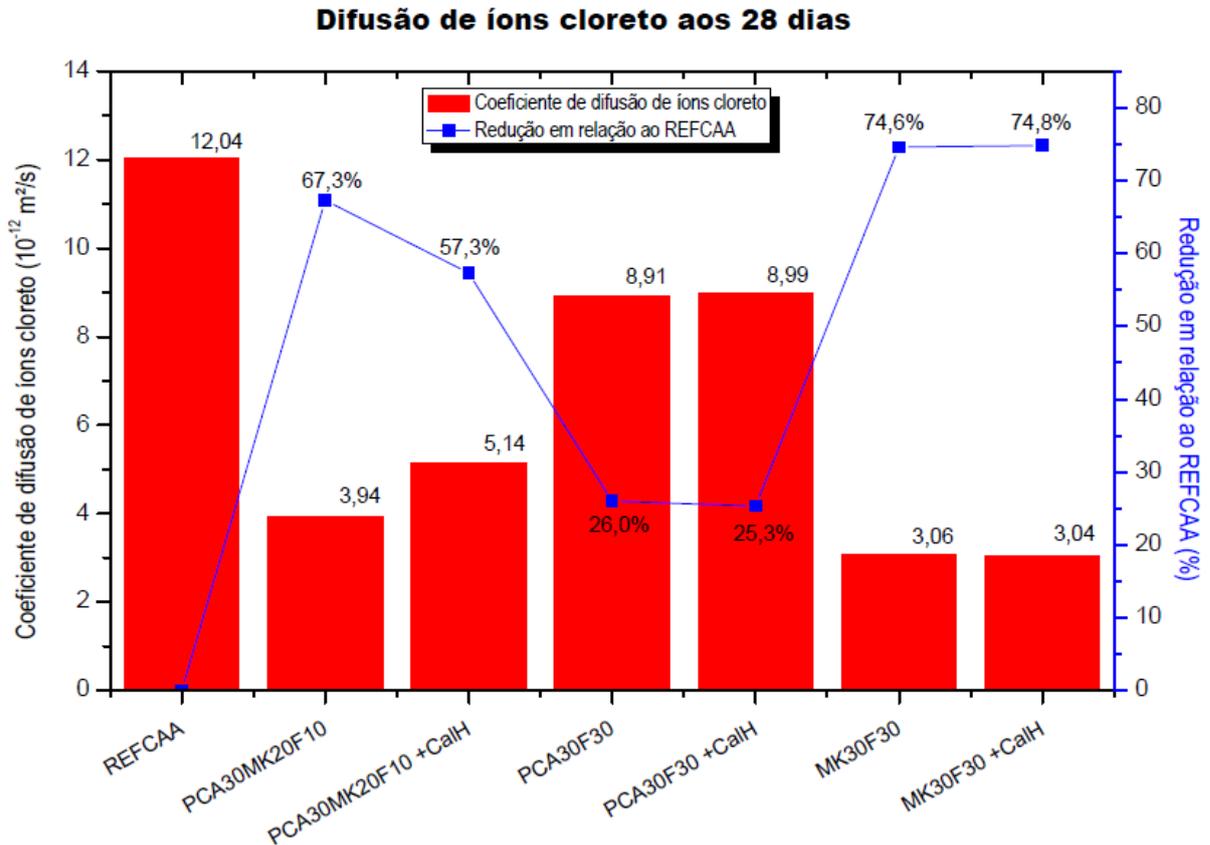
- **Difusão de íons cloreto**

Os resultados do teste de difusão de íons cloreto realizados aos 28 dias mostram que todas as composições com adições minerais apresentaram coeficientes de difusão significativamente menores que o traço de referência, conforme mostrado na Figura 5.18, observando-se reduções que variaram de 25,3% a 74,8%.

Para Mohammed *et al.* (2014b) a estrutura porosa do concreto tem grande influência na permeabilidade de íons cloreto, mas é a interconectividade dos poros na matriz de cimento e o grau de percolação dos poros na zona de transição que desempenham um papel mais importante. Nesse contexto, as reações pozolânicas parecem ser capazes de desenvolver um sistema de poros mais denso e descontínuo (UYSAL *et al.*, 2012; WONGKEO *et al.*, 2014).

Embora as composições com adições minerais tenham um fator água/finos em massa maior que o traço de referência e tenham utilizado o filer calcário, que é

uma adição mineral inerte, a atividade pozolânica do metacaulim e da pozolana da casca do arroz foi capaz de produzir C-S-H adicional que provocou uma descontinuidade no sistema poroso da matriz cimentícia e reduziu o coeficiente de difusão.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.18 - Difusão de íons cloreto nos CAA's aos 28 dias.

Os menores coeficientes de difusão foram das composições “MK30F30” e “MK30F30 +CalH”, e os resultados mais elevados foram das composições “PCA30F30 +CalH” e “PCA30F30”. Isso demonstra que o metacaulim também tem desempenho melhor que a pozolana da casca do arroz nesta propriedade. Neste caso, isso se justifica não só pela sua alta reatividade, mas pelo elevado teor de alumina na sua composição química.

De acordo com Uysal *et al.* (2012) e Anjos *et al.* (2015), a utilização de materiais que possuem grande quantidade de alumina conduz a uma redução na

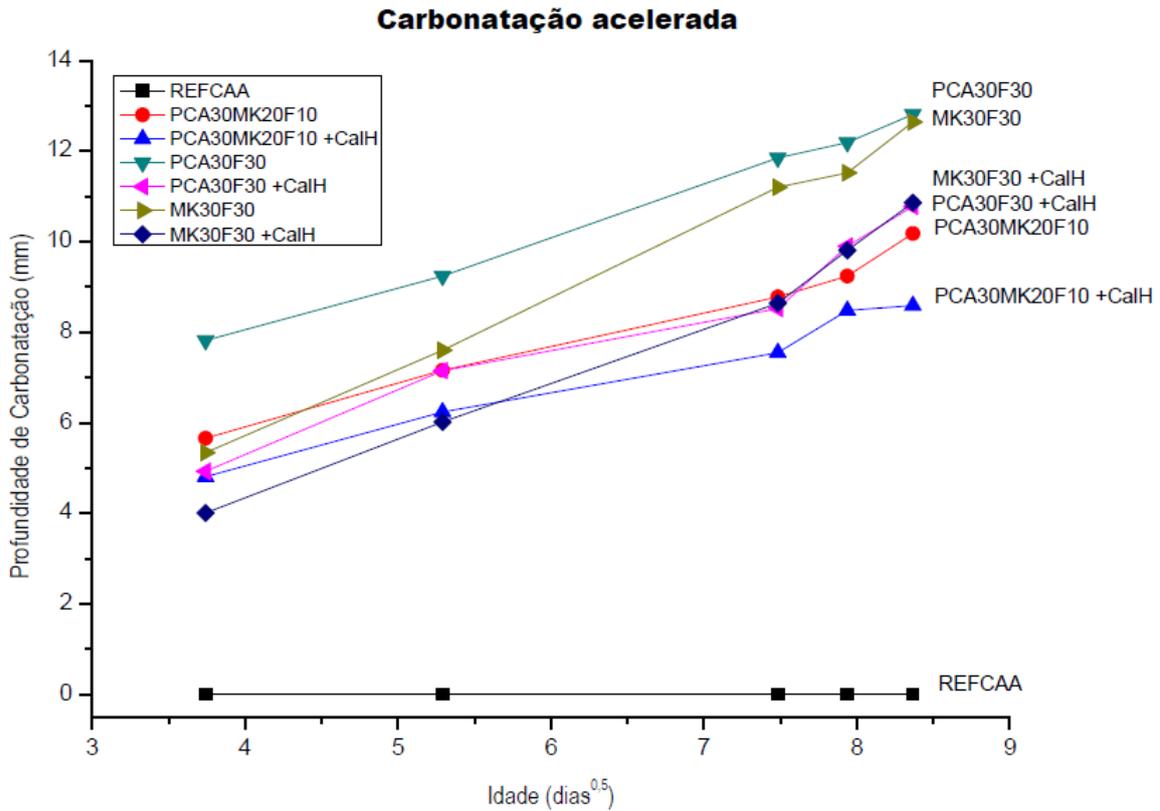
migração dos íons cloreto. A influência da alumina ocorre durante a hidratação do cimento quando esta contribui para formação de produtos hidratados que fixam o cloro, os chamados cloro-aluminatos de cálcio ou sal de Friedel, diminuindo a quantidade de íons cloro livres disponíveis para migrar pelo CAA.

A adição de cal hidratada não representou efeito significativo nas composições “PCA30F30 +CalH” e “MK30F30 +CalH”. Mas na composição “PCA30MK20F10 +CalH” apresentou coeficiente de difusão cerca de 30% maior que “PCA30MK20F10”. Entretanto, esse aumento não compromete o desempenho de durabilidade dessa mistura pois ainda com esse aumento o valor do coeficiente de difusão é 57,3% menor que o traço de referência.

- **Carbonatação acelerada**

Os resultados da análise de carbonatação acelerada mostrados na Figura 5.19 revelam que o traço de referência não carbonatou durante os 70 dias de exposição a uma concentração de $4,0 \pm 0,5\%$ de CO_2 . Já os traços com adições minerais apresentaram considerável carbonatação, pois a incorporação de uma adição mineral pozolânica diminuiu a quantidade hidróxido de cálcio livre e reduziu o pH do material (CHATVEERA e LERTWATTANARUK, 2011).

Além disso, o efeito da carbonatação também é regido pela relação água/finos, então, mesmo utilizando adições minerais como metacaulim e pozolana da casca do arroz, a relação água/finos em massa mais elevada das composições com adições minerais foi fator importante para ocorrência das reações de carbonatação (PERLOT *et al.*, 2013).

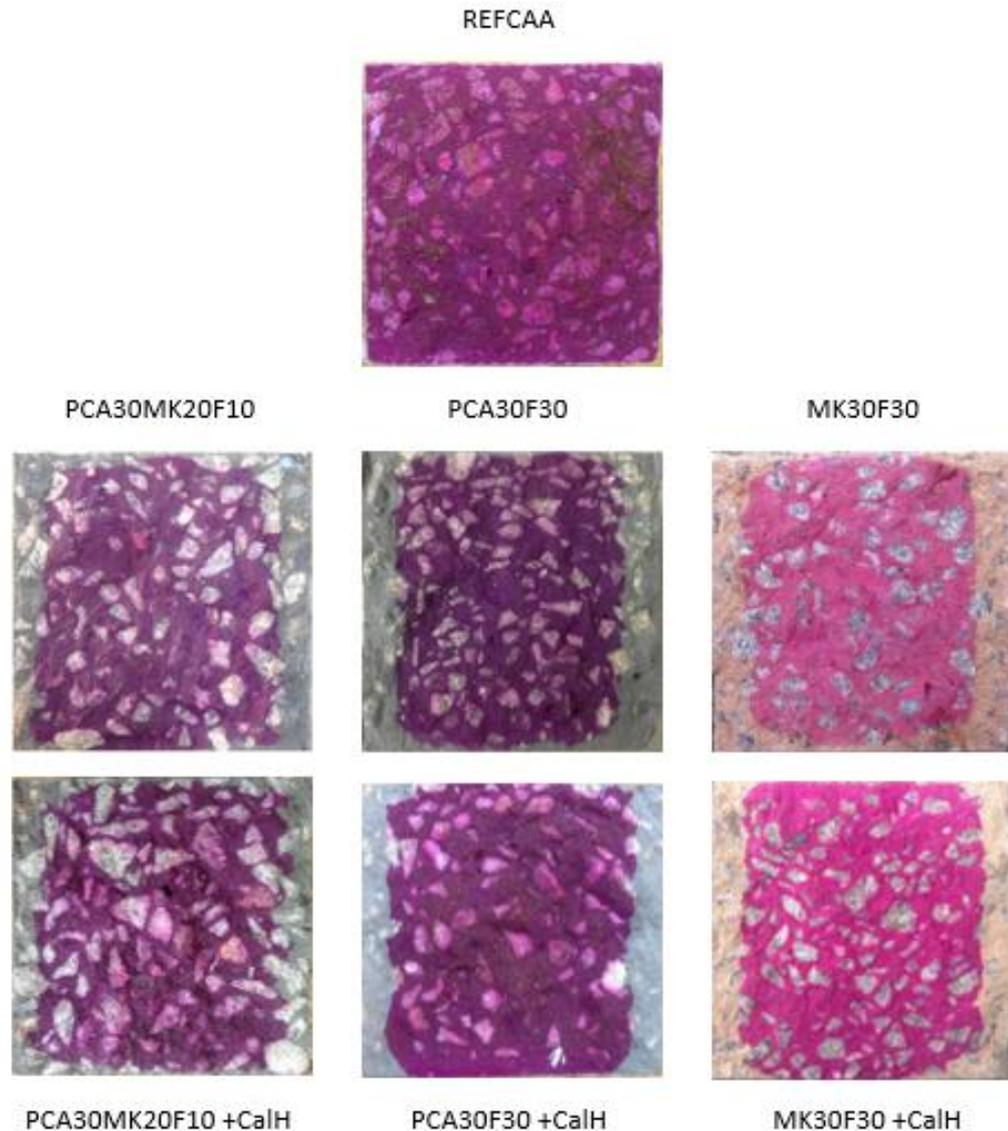


** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.19 - Profundidades de carbonatação nos CAA's.

Um efeito contrário ao das adições minerais foi observado com a adição de cal hidratada, pois ocorre o aumento do teor de portlandita livre, que repõe parcialmente a alcalinidade do CAA e aumenta a resistência à carbonatação (ANJOS *et al.*, 2015). Pode-se verificar pela coloração mais forte da fenoftaleína na região interna das amostras que o pH é mais elevado nas composições de CAA com adição de cal hidratada, conforme mostrado na Figura 5.20.

Outro fato observado foi que as amostras com maior percentual de fíler obtiveram maiores profundidades de carbonatação. Embora as misturas com fíler calcário possam apresentar maiores percentuais de hidróxido de cálcio livre, a estrutura porosa dessa mistura apresenta um maior percentual de macroporos, demonstrando que para esse caso os fatores físicos foram mais relevantes que os químicos (Mohammed *et al.*, 2014a). Além disso, o fíler é composto por carbonato de cálcio, o que pode reduzir ainda mais o PH do CAA pela formação de carboaluminato de cálcio hidratado.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário; CalH – cal hidratada

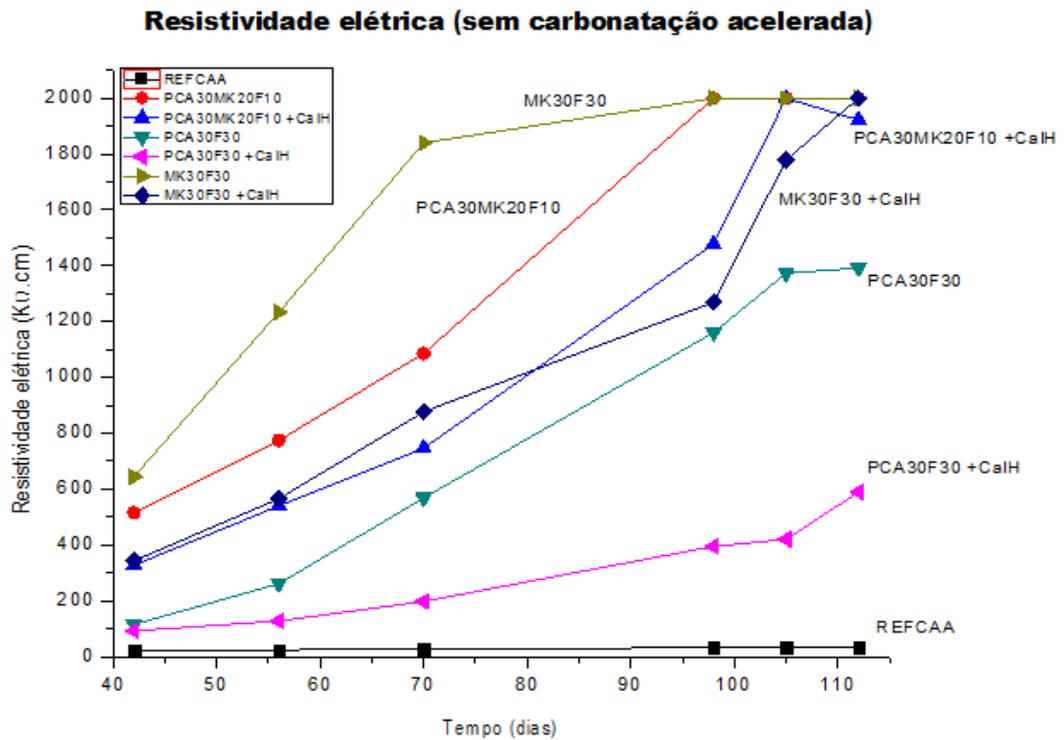
Figura 5.20 - Verificação com fenofaleína da profundidade de carbonatação das amostras de CAA após 70 dias de exposição na câmara.

- **Resistividade elétrica**

A resistividade elétrica foi analisada paralelamente ao ensaio de carbonatação acelerada. Assim, foram analisadas simultaneamente amostras submetidas a carbonatação acelerada, e outras em condições normais (cura ao ar).

Com os resultados da análise das amostras que não sofreram carbonatação acelerada mostrados na Figura 5.21, verificou-se que os traços com adições

minerais apresentaram de maneira geral resistividades elétricas muitas vezes maiores que o traço de referência, atingindo inclusive o limite de leitura do aparelho que é de 1999 K Ω .cm. Já o traço de referência apresentou resultados de 22,3 a 33,9 K Ω .cm. Portanto, pode-se dizer que todos os CAA's têm taxa provável de corrosão desprezível.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filer calcário; CaIH – cal hidratada

Figura 5.21 - Resistividade elétrica das amostras de CAA não carbonatadas.

Dentre as composições com adições minerais, as que continham metacaulim se mostraram mais efetivas no aumento da resistividade elétrica, sendo os melhores resultados das composições “MK30F30” e “PCA30MK20F10”. A composição “PCA30F30+CaIH” foi a menos efetiva dentre as composições com adições minerais.

Estudos anteriores já mostraram que o metacaulim (RAMEZANIANPOUR e JOVEIN, 2012) e a pozolana da casca do arroz (SAFIUDDIN *et al.*, 2010) são adições minerais pozolânicas que proporcionam elevados ganhos de resistividade elétrica em comparação ao traço de referência. Entretanto, do mesmo modo que

ocorreu na resistência à compressão e difusão de íons cloreto, o metacaulim se mostrou mais eficiente em melhorar a resistividade elétrica.

Segundo Safiuddin *et al.* (2010), a resistividade elétrica aumenta geralmente com a menor porosidade e menores tamanhos de poro, pois o fluxo de íons através dos espaços dos poros é prejudicado. Além disso, os íons de hidroxila e de metais alcalinos se mostram como os principais íons que transportam carga, mas podem ter sua quantidade reduzida com a utilização das adições minerais.

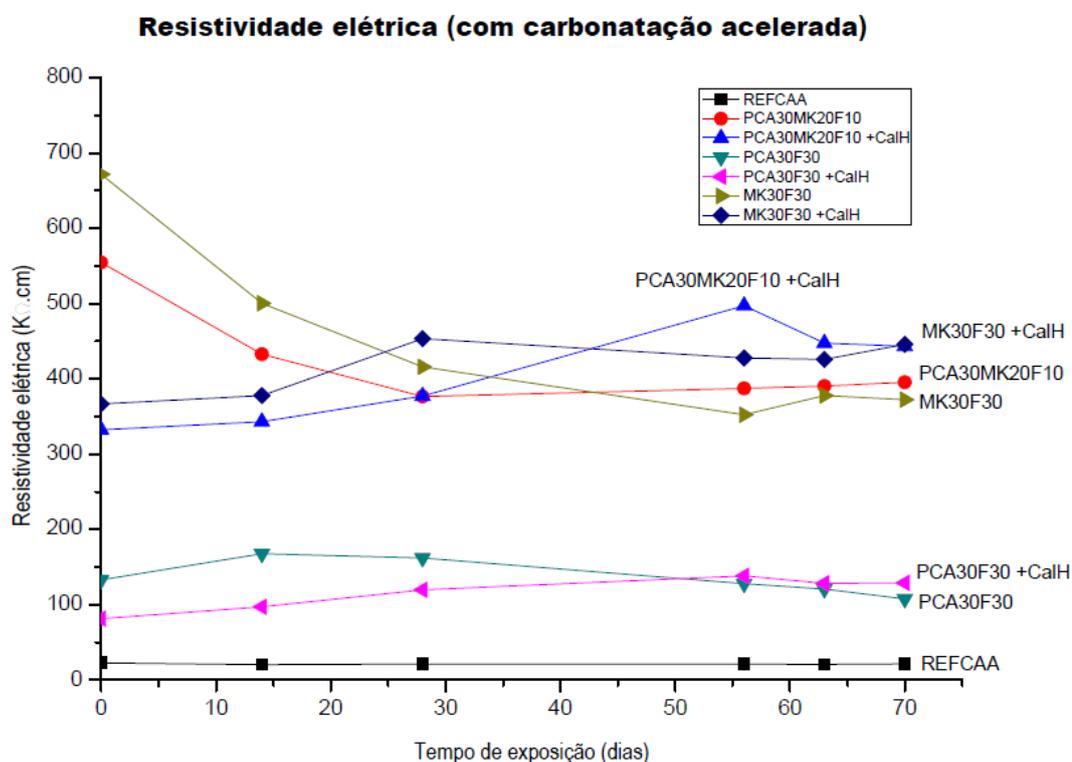
Por outro lado, observou-se que as adições de cal hidratada contribuíram para a redução da resistividade elétrica do concreto. Como a adição de cal hidratada não apresentou resultados positivos na análise de resistência à compressão, pode-se admitir que nessas composições existiria certa quantidade de hidróxido de cálcio livre. Assim, a diluição do hidróxido de cálcio na solução dos poros liberou íons de cálcio (metal alcalino terroso) e hidroxila, que são os principais transportadores de carga (SAFIUDDIN *et al.*, 2010), e responsáveis pela redução da resistividade elétrica.

Ao analisar a resistividade elétrica das amostras que foram submetidas a carbonatação acelerada, mostrados na Figura 5.22, verificou-se redução nos valores das resistividades elétricas de todas as amostras, sendo muito mais significativa nas amostras com adições minerais.

O motivo dessa redução nas amostras com adições minerais é que nelas as reações de carbonatação são mais intensas do que no traço de referência. Essas reações químicas ocorrem na solução dos poros do concreto, e durante essas reações há uma intensa movimentação de íons, tanto do hidróxido de cálcio diluído, quanto do gás carbônico que vai formar o ácido carbônico para posterior reação com os íons de cálcio, formando o carbonato de cálcio (CHATVEERA e LERTWATTANARUK, 2011).

Além disso, observou-se que as amostras com adição de cal hidratada submetidas a carbonatação acelerada apresentaram valores de resistividade maiores que as composições sem adição de cal hidratada. Percebeu-se também que as amostras com cal apresentaram curva de desenvolvimento da resistividade um pouco ascendente, ou seja, aumentaram a resistividade com o tempo.

Já as composições sem cal hidratada perdem resistividade com o tempo, pois estão mais expostas a carbonatação. Logo, o melhor desempenho das composições com cal hidratada se deve a resistência à carbonatação que elas proporcionam a mistura em relação as composições sem cal.



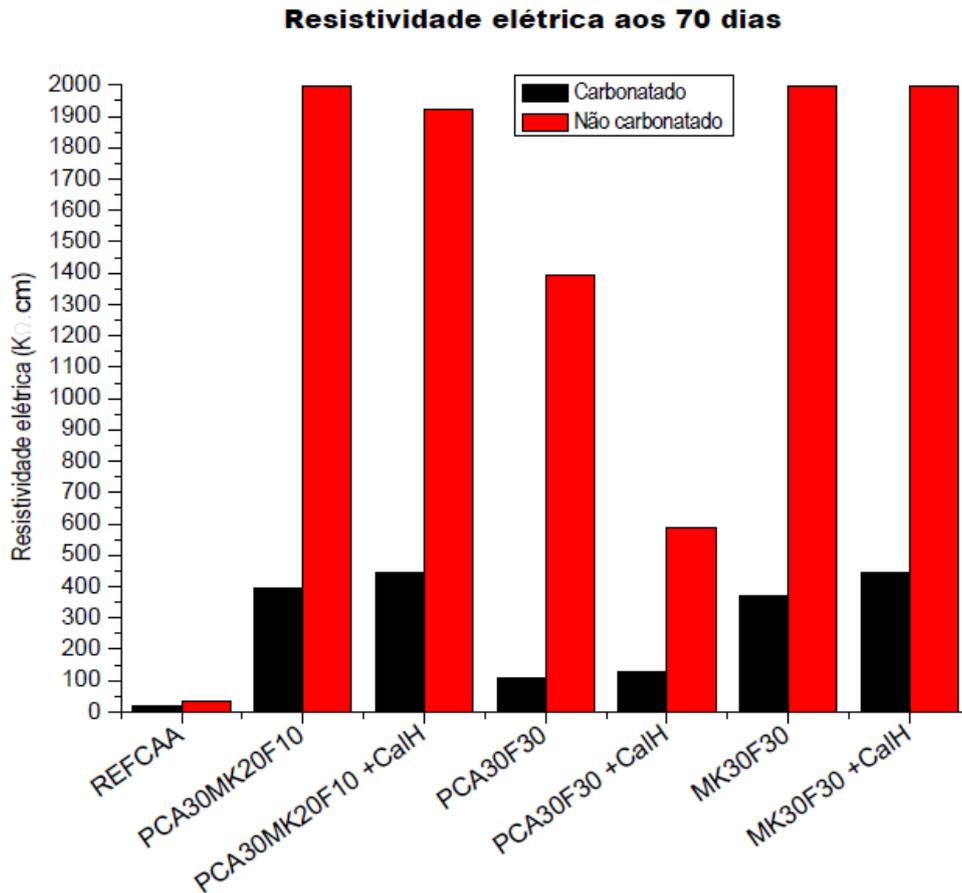
** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – filler calcário; CalH – cal hidratada

Figura 5.22 - Resistividade elétrica das amostras de CAA em carbonatação.

Os resultados das amostras do traço de referência submetidas a carbonatação variaram entre 20,2 e 22,6 KΩ.cm. Desta forma, percebeu-se uma suave redução da resistividade elétrica da composição “REFCAA” chegando a valores de resistividade elétrica próximos aos que favorecem a corrosão das armaduras de concreto armado (20 KΩ.cm), mesmo sem as amostras terem sofrido carbonatação.

Portanto, o comparativo das resistividades elétricas de cada mistura para as situações carbonatadas e não carbonatadas, mostrado na Figura 5.23, confirmou que o movimento de íons no processo de carbonatação aumentou bastante, e por isso as resistividades elétricas das amostras não carbonatadas são muito maiores que as amostras carbonatadas.

Desta maneira, as amostras com adição de cal hidratada apresentaram melhores resistividades quando submetidas a carbonatação uma vez que apresentam maior resistência à carbonatação.



** MK – metacaulim; PCA – pozolana da casca do arroz; F – fíler calcário; CalH – cal hidratada

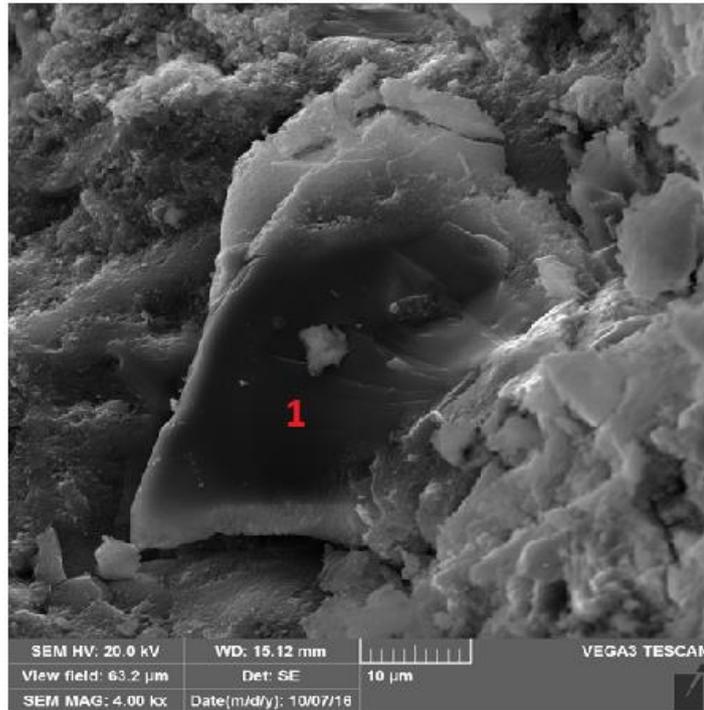
Figura 5.23 - Comparativo de resistividade elétrica de amostras carbonatadas e não carbonatadas aos 70 dias.

5.4 – Análise da microestrutura dos CAA's

A microscopia eletrônica por varredura (MEV) foi realizado para todos os traços de CAA, e em todos eles encontrou-se silicoaluminato de cálcio hidratado com morfologia semelhante a encontrada por Antonovic *et al.* (2013), conforme mostrado nas Figuras de 5.24 a 5.29.

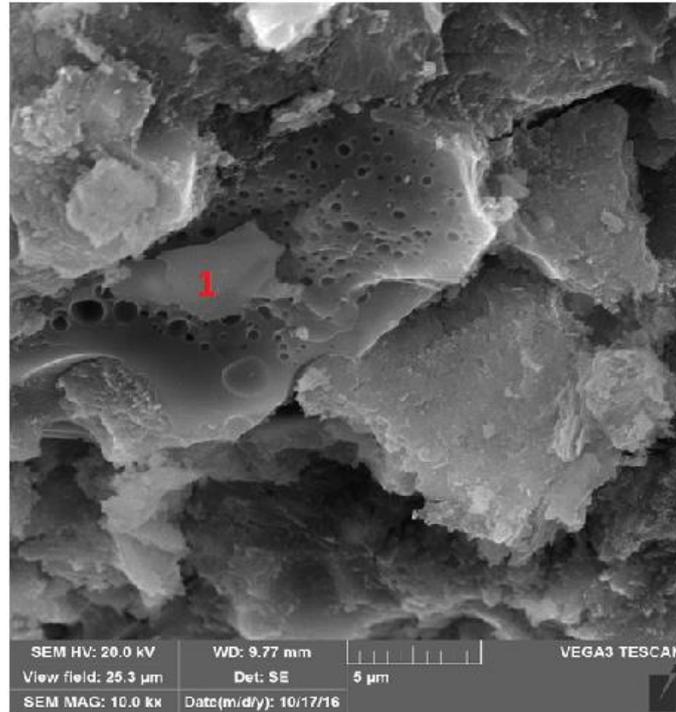
A única exceção foi o traço “REFCAA” onde se encontrou portlandita, conforme Figura 5.30. Nos outros traços que continham adições minerais a portlandita foi consumida durante as reações pozolânicas e não foi encontrada durante a análise de MEV.

As micrografias foram realizadas em amostras de CAA com idade de 91 dias e as amostras utilizadas são partes representativas do todo.



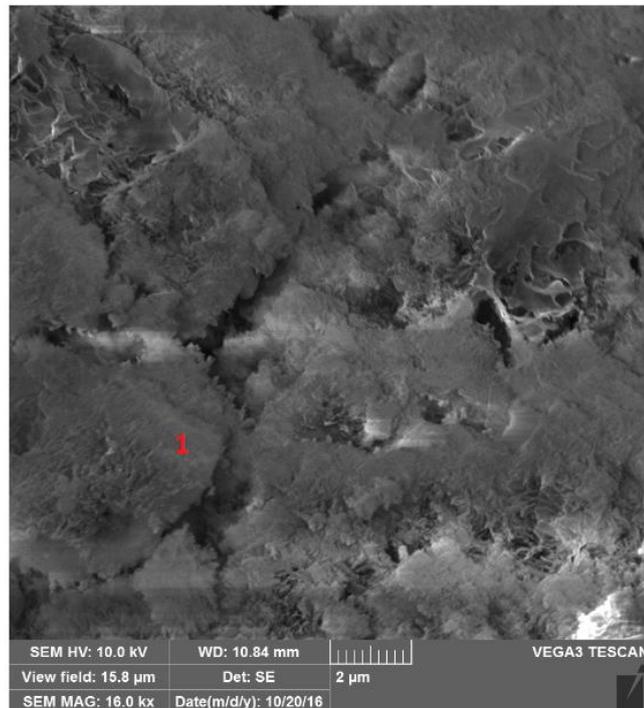
EDS: C=2,81%, O=51,10%, Al=0,83%, Si=10,14%, Ca=35,12%.

Figura 5.24 - Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço “PCA30MK20F10”.



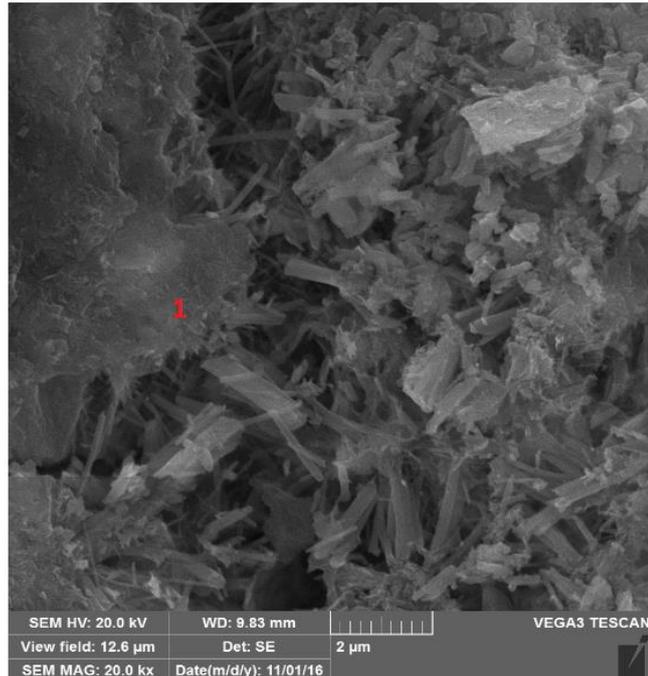
EDS: O=40,97%, Al=1,46%, Si=49,52%, Ca=6,36%, K=1,69%.

Figura 5.25 - Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "PCA30MK20F10 +CalH".



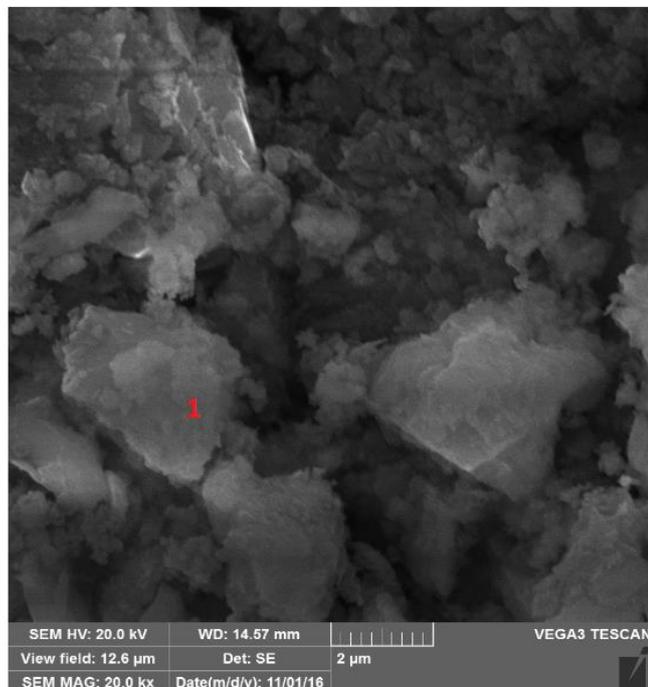
EDS: O=66,51%, Mg=5,97%, Al=0,96%, Si=9,51%, Ca=17,04%.

Figura 5.26 – Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "PCA30F30".



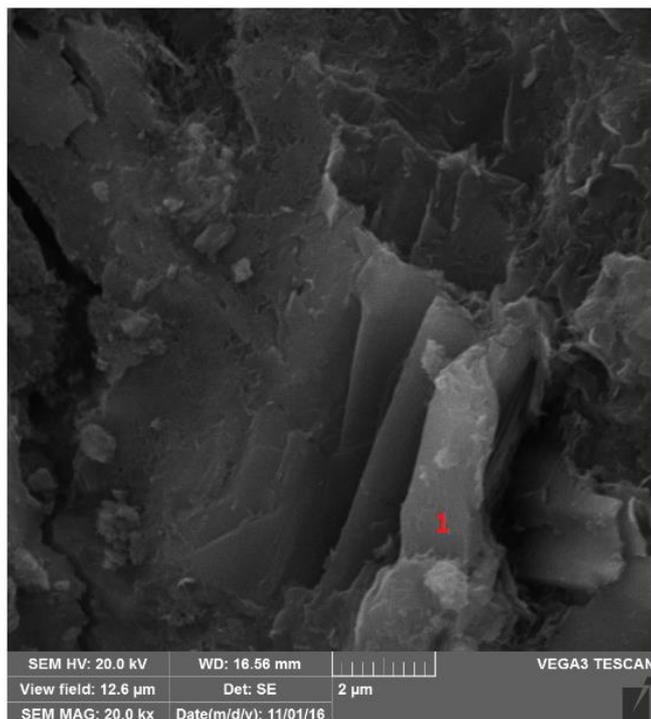
EDS: O=18,24%, Mg=0,54%, Al=3,86%, Si=13,48%, S=5,79%, K=2,38%,
Ca=48,88%, Fe=6,83%.

Figura 5.27 – Sulfoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço
“PCA30F30+CalH”.



EDS: O=42,25%, Mg=0,94%, Al=7,01%, Si=19,35%, K=0,73%, Ca=27,10%,
Fe=2,61%.

Figura 5.28 – Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço
“MK30F30”.



EDS: O=53,00%, Mg=5,20%, Al=8,40%, Si=12,30%, Ca=6,72%, Mn=0,77%,
Fe=13,61%.

Figura 5.29 – Silicoaluminato de cálcio hidratado (1) encontrado no traço "MK30F30+CalH".

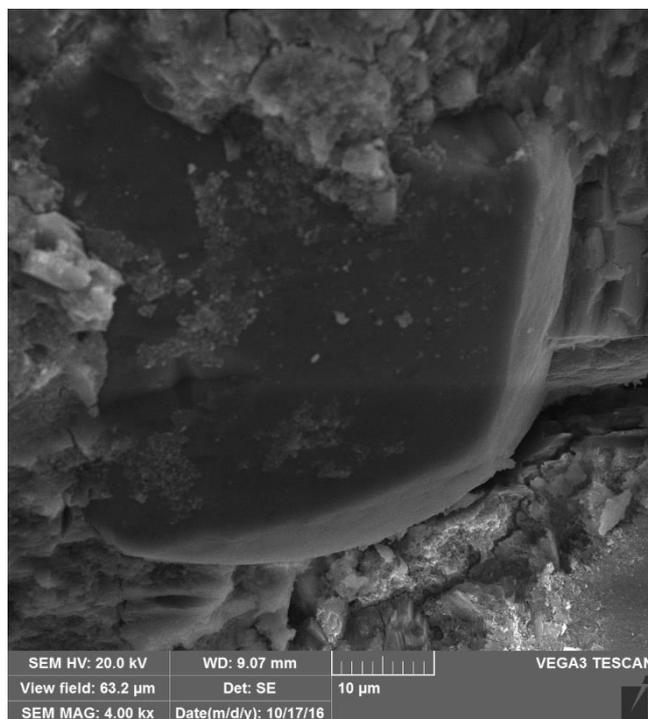


Figura 5.30 - Portlandita encontrada no traço "REFCAA".

CAPÍTULO 6

Considerações finais

6.1 - Conclusões

Após análise dos resultados obtidos neste trabalho, destacam-se as principais conclusões:

Os CAA's com baixos consumos de cimento, e elevados teores de adições minerais, alcançaram parâmetros satisfatórios para o estado fresco e compatíveis com os requisitos da NBR 15823 (ABNT, 2010).

O metacaulim e a pozolana da casca do arroz contribuíram para o aumento da viscosidade do CAA devido a sua elevada reatividade e maior área superficial específica em relação ao cimento. Todavia, esse efeito pode ser administrado com a utilização de fator água/finos e teor de aditivo superplastificante adequados.

O ensaio de anel-J isolado não é suficiente para análise da habilidade passante dos CAA's com elevados teores de adições minerais e com elevada viscosidade e fluidez. Enquanto alguns resultados do anel-J não possuem classificação pela NBR 15823-1 (ABNT, 2010), a análise visual durante o espalhamento e a caixa-L mostram resultados admissíveis para o CAA no estado fresco. Já os ensaios de T500 e funil-V apresentaram boa relação e ajudam a caracterizar a viscosidade dos CAA's.

O metacaulim é o material com maior capacidade de modificar a viscosidade da mistura de CAA, seguido pela pozolana da casca do arroz e pelo fíler calcário. Ele tem área superficial maior que a do cimento, embora seja menor que a da pozolana da casca do arroz e do fíler calcário. Assim, pode-se atribuir o aumento da viscosidade das misturas com metacaulim a sua composição química, rica em alumina e sílica amorfos, que proporciona elevada reatividade inicial e perda rápida de trabalhabilidade.

A utilização de CAA's com 60% de adições minerais, resultando em consumos de cimento da ordem de 170 kg/m³, mostrou-se eficiente na análise mecânica, pois todas as composições apresentaram resistências à compressão maiores que 20 MPa. Isso significa dizer que é possível obter o desempenho mecânico requisitado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para estruturas de concreto armado mesmo para CAA's produzidos com consumos de cimento abaixo do limite mínimo definido pela NBR 12655 (ABNT, 2015).

Pelos resultados apresentados de velocidade do pulso ultrassônico, resistência à compressão, e difusão de íons cloreto, as adições minerais parecem ter um efeito mais relacionado ao refinamento e descontinuidade da estrutura porosa da matriz cimentícia do que a redução da porosidade.

Com relação a absorção por capilaridade, as adições só se mostraram eficientes aos 91 dias. As adições minerais também se mostraram muito eficientes ao reduzir significativamente o coeficiente de difusão de íons cloreto aos 28 dias e aumentar a resistividade elétrica. Isso ocorreu devido a capacidade de produzirem C-S-H adicional através das reações pozolânicas, o que proporciona redução e descontinuidade dos poros da matriz cimentícia.

Destaca-se ainda o desempenho do metacaulim sobre a redução da difusão de íons cloreto em função de conter altos teores de alumina em sua composição química, que tem capacidade de se ligar aos íons cloreto impedindo sua migração pelo concreto.

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade que apresenta boa relação com a difusão de íons cloreto, pois observou-se que maiores resistividades implicam menores coeficientes de difusão de íons cloreto. Além disso, a resistividade elétrica também apresentou relação com a carbonatação, pois nas amostras carbonatadas o movimento dos íons das reações de carbonatação aumenta e a resistividade diminui.

As adições minerais apresentaram melhoras representativas nas análises de durabilidade com exceção da carbonatação acelerada. Nesta análise observou-se que devido ao baixo teor de cimento nas misturas de CAA, o hidróxido de cálcio foi produzido em menor quantidade e ao mesmo tempo foi consumido pelas reações pozolânicas. Logo, esses CAA's ficaram com o pH reduzido e apresentaram

elevadas profundidades de carbonatação, enquanto o traço de referência não apresentou carbonatação.

As adições de cal hidratada no teor de 5% para os CAA's estudados neste trabalho, com consumo de cimento da ordem de 170 kg/m³, não apresentaram melhorias no comportamento mecânico e de durabilidade, mas sim estabilidade, mantendo desempenho semelhante aos CAA's sem cal.

A exceção foi a análise de carbonatação acelerada quando a cal hidratada se mostrou eficiente em repor parcialmente a alcalinidade dos CAA's, proporcionando menores profundidades de carbonatação a essas misturas.

6.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se:

Realizar avaliações complementares de difração de raios-x e termogravimetria nas composições de CAA para avaliar a presença de portlandita e calcita antes, durante e depois do processo de carbonatação acelerada. Além das avaliações de permeabilidade a gás, e porosimetria por intrusão de mercúrio para verificar a distribuição dos tamanhos dos poros aos 28 e 91 dias, e após a carbonatação para avaliar a colmatação dos poros pelo carbonato de cálcio.

Proceder com a redução do consumo de cimento aumentando os níveis de substituição por adições minerais e analisar outros teores de adição de cal hidratada avaliando sempre a influência na carbonatação, resistividade elétrica e difusão de íons de cloreto. Além disso, realizar as análises de resistividade elétrica em condições saturadas e realizar análise de íons cloreto pela ASTM 1202 (2005) para comparar com os métodos utilizados neste trabalho.

Avaliar o custo de produção dessas composições de CAA e quantificar índices de sustentabilidade como o total de emissões de CO₂ para cada unidade de desempenho estudada, como resistência à compressão (MPa), resistividade elétrica (KΩ.cm) e profundidade de carbonatação (mm).

Avaliar o efeito do tipo de cimento nas propriedades dos CAA's, bem como o efeito da redução total de clínquer com a utilização de cimentos com adições (como CP III e CPIV) na sustentabilidade desses CAA's. Assim, aplicando-se percentuais de substituição de cimento por adições minerais suplementares entre 40 e 60% sobre a quantidade de cimento do traço, teria-se um teor de clínquer ainda mais baixo do que os utilizados neste trabalho.

Avaliar a influência da densidade dos finos, porosidade de empacotamento teórico, distância de separação interparticular (IPS), espessura teórica da camada que separa os agregados (MPT), granulometria dos materiais finos e área de superfície volumétrica (ASV) nas propriedades dos CAA's no estado fresco.

Referências

ANJOS, M. A. S.; CAMÕES, A.; JESUS, C. CAMPOS, P. **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.

ANJOS, M. A. S.; FERREIRA, D. F.; BORJA, E. V. **Influência da finura do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar na atividade pozolânica com a cal**. Holos, v.2, ano 28, p.44-57, 2012.

ANTONOVIC, V.; KERIENE, J.; BORIS, R.; ALEKNEVICIUS, M. **The Effect of Temperature on the Formation of the Hydrated Calcium Aluminate Cement Structure**. Procedia Engineering, v. 57, p. 99–106, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: **Concreto auto-adensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: **Concreto auto-adensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-3: **Concreto auto-adensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-4: **Concreto auto-adensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-5: **Concreto auto-adensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: **Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

BADOGIANNIS, E. G.; SFIKAS, I. P.; VOUKIA, D. V.; TREZOS, K. G.; TSIVILIS, S. G. **Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete**. Construction and Buildings Materials, v. 82, p. 133-141, 2015.

BORGES, P. H. R.; COSTA, J. O.; MILESTONE, N. B. LYNSDALE, C. J.; STREATFIELD, R. E. **Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS**. Cement and Concrete Research, v. 40, p. 284-292, 2010.

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

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

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. **Durability of conventional concretes containing black rice husk ash**. Journal of Environmental Management, v. 92, p. 59-66, 2011.

CHOPRA, D.; SIDDIQUE, R.; KUNAL. **Strength, permeability, and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash**. Biosystems Engineering, v. 130, p. 72-80, 2015.

DAL RI, M. **Efeito da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Dissertação de mestrado, 111 p. Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. **Measuring the eco-efficiency of cement use**. Cement & Concrete Composites, v. 32, p. 555-562, 2010.

FELEKOGLU, B.; TURKEL, S.; BARADAN, B. **Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete**. Build Environ, v.42, p. 1795-1802, 2007.

FIGUEIREDO E.P. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON 2005, Cap. 27:829-55.

FONSECA, T. V.; MENDONÇA, L. K. M.; SOUZA, D. P. P.; TORRES, T. C.; ANJOS, M. A. S. **Argamassas autoadensáveis com elevados teores de adições minerais**

e adição de cal hidratada. Anais do II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. João Pessoa/PB, 2016.

GESOGLU, M.; GUNEYISI, E.; KOCABAG, M. E.; BAYRAM, V.; MERMEDAS, K. **Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash.** Construction and Buildings Materials, v.37, p. 160-170, 2012.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil II, 318 p. São Paulo, 2008.

KANNAN, V.; GANESAN, K. **Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin.** Construction and Buildings Materials, v.51, p. 225-234, 2014.

KAVITHA, O.; SHANTHI, V.; ARULRAJ, G.; SIVAKUMAR, P. **Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete.** Applied Clay Science, v. 114, p. 370-374, 2015.

LE, H. T.; LUDWIG, H. M. **Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete.** Materials and Design, v. 89, p. 156-166, 2016.

LEUNG, H. Y.; KIM, J.; NADEEM, A.; JAGANATHAN, J. ANWAR, M. P. **Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume.** Construction and Buildings Materials, v. 113, p. 369-375, 2016.

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

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.

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. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. Ed. São Paulo: IBRACON. 2014.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. **Carbonation of filler typed self-compacting concrete and its impact on the microstructure by utilization of 100% CO₂ accelerating techniques**. Construction and Buildings Materials, v.50, p. 508-516, 2014a.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. **Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture**. Construction and Buildings Materials, v. 72, p. 83-93, 2014b.

MOUNANGA, P.; KHOKAR, M. I. A.; HACEM, R. E.; LOUKILI, A. **Improvement of the early-age reactivity of fly ash and blast furnace slag cementitious systems using limestone filler**. Materials and Structures, v. 44, p. 437-453, 2011.

NGUYEN, V.T.; YE, G.; VAN BREUGEL, K.; FRAAIJ, A. L. A.; BUI, D.D. **The study of using rice husk ash to produce ultrahigh performance concrete**. Construction and Building Materials, v. 25, p. 2030-2035, 2011.

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

OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1. Ed. São Paulo: IBRACON. 2014.

PERLOT, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S. **Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry**. Cement & Concrete Composites, v. 44, p. 50-57, 2013.

PHUNG, Q. T.; MAES, N.; JACQUES, D.; BRUNEEL, E.; DRIESSCHE, I. V.; YE, G.; SCHUTTER, G. **Effect of limestone fillers on microstructure and permeability due to carbonation of cement pastes under controlled CO₂ pressure conditions**. Construction and Buildings Materials, v. 82, p. 376-390, 2015.

RAMEZANIANPOUR AA, BAHRAMI JOVEIN H. **Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes.** Construction and Buildings Materials, v. 30, p. 470-479, 2012.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência.** Dissertação de Mestrado, 213 p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2011.

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise.** 1. Ed. Rio de Janeiro: ELSEVIER. 2014.

SAFIUDDIN, M.; WEST, J.; SOUDKI, K. **Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash.** Cement & Concrete Composites, v.32, p. 708-717, 2010.

SAFIUDDIN, M.; WEST, J.; SOUDKI, K. **Properties of freshly mixed self-compacting concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material.** Construction and Building Materials, v.30, p. 833-842, 2012.

SCCEPG. **The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use.** West Midlands, UK: Self-Compacting Concrete European Project Group (SCCEPG), The European Federation of Concrete Admixtures Associations; 2005.

SENGUL, O. **Use of electrical resistivity as an indicator for durability.** Construction and Building Materials, v. 73, p. 434-441, 2014.

SFIKAS, I.; BADOGIANNIS, E.; TREZOS, K. **Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin.** Construction and Building Materials, v. 64, p. 121-129, 2014.

SILVA, P. R.; BRITO, J. **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, v.86, p. 101-112, 2015.

SU, N.; MIAO, B. **A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content.** Cement and Concrete Composites, v. 25, p. 215-222, 2003.

SUA-IAM, G.; SOKRAI, P.; MAKUL, N. **Novel ternary blends of Type 1 Portland cement, residual rice husk ash, and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 1028-1034, 2016.

UYSAL, M.; YILMAZ, K. **Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete.** *Cement & Concrete Composites*, v. 33, p. 771-776, 2011.

UYSAL, M.; YILMAZ, K.; IPEK, M. **The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 27, p. 263-270, 2012.

VEJMELKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; GRZESZCZYK, S.; SKALINSKI, B.; CERNY, R. **Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag.** *Construction and Buildings Materials*, v. 25, p. 1325-1331, 2011.

WONGKEO, W.; THONGSANITGARN, P.; NGAMJARUROJANA, A.; CHAIPANICH, A. **Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume.** *Materials and Design*, v. 64, p. 261-269, 2014.

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 & Concrete Composites*, v. 55, p. 383-394, 2015.