



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**RICARDO PERIM REAL**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DA  
CASCA DE ARROZ COMO ADIÇÃO  
MINERAL EM CONCRETO DE ALTO  
DESEMPENHO**

**Dissertação de Mestrado**

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, fevereiro de 2018

***PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil***

**RICARDO PERIM REAL**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO  
ADIÇÃO MINERAL EM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador: Prof. Dr. Nilton da Silva Maia**

**Coorientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues**

**BELO HORIZONTE**

**2018**

R288a Real, Ricardo Perim  
Avaliação da utilização da cinza da casca de arroz como adição mineral em concreto de alto desempenho. / Ricardo Perim Real. – Belo Horizonte, 2018.  
76 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2018.

Orientador: Prof. Dr. Nilton da Silva Maia.

Coorientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues

#### Bibliografia

1. Concreto de Alto Desempenho. 2. Materiais de Construção – Vida Útil - Concreto. 3. Adições no Concreto. I. Maia, Nilton da Silva. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 691.3

RICARDO PERIM REAL

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DA CASCA DE  
ARROZ COMO ADIÇÃO MINERAL EM CONCRETO DE ALTO  
DESEMPENHO**

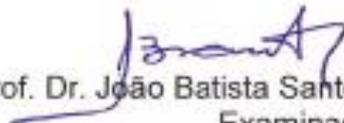
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil



Prof. Dr. Nilton da Silva Maia  
Orientador  
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues  
Coorientador  
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof. Dr. João Batista Santos de Assis  
Examinador Externo  
Departamento de Engenharia Civil, PUC-MG



Prof.ª Dr.ª Flávia Spitale Jacques Poggiali  
Examinador  
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Belo Horizonte, 21 de fevereiro de 2018

Dedico este trabalho ao meu Deus, fonte da minha vida,  
e a minha família, fonte do meu amor.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente eu agradeço à Deus, pois tudo o que tenho em minha vida e todas as coisas que eu já conquistei são graças a Ele. Agradeço a minha família por sempre ter me dado apoio nas minhas decisões e aos meus amigos por toda a força e por todos os momentos de descontração, que também fazem parte de qualquer vitória.

Agradeço aos professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG, em especial ao meu orientador Nilton da Silva Maia e ao meu coorientador Conrado de Souza Rodrigues, que sempre me guiaram com muita clareza e respeito e sem os quais eu não teria conseguido realizar minha pesquisa. Meus agradecimentos também são destinados ao professor Augusto Bezerra do Departamento de Transportes pela ajuda nos ensaios de MEV e Módulo de Elasticidade. Agradeço de forma geral ao CEFET-MG por toda a infraestrutura disponibilizada para a realização da minha pesquisa e pelo apoio financeiro que recebi durante o Mestrado.

Aproveito aqui para agradecer também aos técnicos dos laboratórios do CEFET-MG, em especial ao Ivan, responsável pelo laboratório do Departamento de Engenharia Civil, por toda a disponibilidade e atenção dedicada aos mestrandos. Agradeço também ao Departamento de química do CEFET-MG pela realização do ensaio de FTIR e ao Laboratório de Controle de Processos e Medição de Partículas do Instituto SENAI de Inovação em Processamento Mineral pela realização do ensaio de FRX.

Meus sinceros agradecimentos aos meus colegas de mestrado, que durante esse período propiciaram ricas trocas de conhecimentos e momentos dos quais nunca me esquecerei. Esses agradecimentos são destinados também aos alunos de iniciação científica e estagiários dos laboratórios, que durante os experimentos se mostraram prestativos e me ajudaram a obter resultados tão importantes.

Agradeço à empresa Pilecco Nobre pelo fornecimento da cinza da casca de arroz, à empresa Lafarge/Holcim pelo fornecimento do cimento e à empresa ERCA pelo fornecimento dos aditivos químicos. Todos esses materiais foram muito importantes para o desenvolvimento dos experimentos e contribuíram de fato para os resultados alcançados.

## RESUMO

O concreto de alto desempenho (CAD) é um tipo especial de concreto que apresenta propriedades mecânicas e de durabilidade mais elevadas em relação aos concretos convencionais, sem prejudicar as propriedades do material em seu estado fresco, mais precisamente a trabalhabilidade da mistura. Além dos componentes tradicionais na produção de concreto, na produção do CAD são utilizadas adições minerais e aditivos químicos para melhorar a microestrutura do material e garantir uma boa trabalhabilidade, mesmo com relações água/cimento mais baixas. A cinza da casca de arroz (CCA) é um resíduo agrícola, cuja utilização como adição mineral na produção de concreto vem sendo bastante estudada e explorada recentemente. Para avaliar essa utilização, o presente estudo propôs uma série de ensaios que foram executados em corpos de prova (CPs) cilíndricos ( $10 \times 20 \text{ cm}^2$ ) de CAD com teores de substituição do cimento pela CCA de 10%, 15% e 20% em massa, além de um traço referência sem substituição. Os ensaios buscaram avaliar o comportamento do concreto em seu estado fresco (trabalhabilidade) e em seu estado endurecido (propriedades mecânicas e de durabilidade). Em um estudo piloto foi realizada a caracterização físico-química dos materiais constituintes do CAD, com maior ênfase na adição mineral, e executados ensaios preliminares (abatimento de tronco de cone, compressão axial e módulo de elasticidade) em CPs com aditivo plastificante e consumo de água maior em sua produção. No estudo final, complementar ao piloto, foram ensaiados os mesmos traços do anterior, porém, com aditivo superplastificante e consumo de água inferior na mistura. Além dos mesmos ensaios realizados no estudo preliminar, foram empreendidos no estudo final, ensaios de absorção de água e adsorção de nitrogênio (B.E.T.). Os resultados mostraram que a trabalhabilidade da mistura fresca foi prejudicada conforme o acréscimo de cinza, porém, as propriedades mecânicas e de durabilidade foram aprimoradas. A troca de aditivos químicos e a diminuição do consumo de água melhorou todas as propriedades analisadas. O melhor teor de substituição do cimento pela adição mineral foi de 15% em massa para resistência à compressão axial aos 28 dias e de 10% em massa, aos 90 dias.

Palavras-Chave: adições minerais, CAD, CCA, durabilidade, propriedades mecânicas.

## **ABSTRACT**

High performance concrete (HPC) is a special type of concrete that has better mechanical properties and durability over conventional concretes, without damaging the material properties in its fresh state (workability). In addition to the traditional components of the concrete, when producing HPC, mineral admixtures and chemical additives are used to improve the microstructure of the material and ensure good workability even at lower water/cement ratios. Rice husk ash (RHA) is an agricultural residue whose use as a mineral admixture in concrete has been studied and explored recently. In order to evaluate this use, the present study proposed a series of tests that have been performed on cylindrical specimens (10 x 20 cm) of HPC with levels of cement substitution by the residue of 10%, 15% and 20% by mass. The tests evaluated the behavior of the concrete in its fresh state (workability) and in its hardened state (mechanical properties and durability). A pilot study performed the physico-chemical characterization of the HPC constituent materials, with emphasis on mineral admixture, and preliminary tests (slump test, modulus of elasticity and compressive strength) in specimens with plasticizer additive and higher water consumption in their production. In addition to the same tests carried out in the preliminary study, water absorption and nitrogen adsorption (B.E.T) were undertaken in the final study. The results showed that the workability of the fresh mixture was impaired as the ash content increased, but the mechanical and durability properties were improved. The exchange of chemical additives and the reduction of water consumption improved all properties analyzed. The best level of cement substitution by the residue is 15% and 10% by mass, regarding the compressive strength at 28 and 90 days, respectively.

**Key-Words:** durability, HPC, mechanical properties, mineral admixtures, RHA.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Microestrutura de CC e CAD .....  | 18 |
| Figura 2: Cinza da casca de arroz industrializada.....                                    | 41 |
| Figura 3: Aditivos químicos (plastificante à esq. e superplastificante à dir.) .....      | 41 |
| Figura 4: Difratoograma de raios-X da CCA.....  | 52 |
| Figura 5: Gráficos de absorvência (A) e transmitância (B) de ensaio de FTIR.....          | 53 |
| Figura 6: Curva granulométrica da CCA do ensaio de difração a laser. ....                 | 54 |
| Figura 7: Morfologia da CCA por MEV. Zoom de 500x (A) e 5.000x (B).....                   | 55 |
| Figura 8: Teor de saturação para o aditivo químico. ....                                  | 55 |
| Figura 9: Curvas granulométricas dos agregados graúdo e miúdo. ....                       | 57 |
| Figura 10: Abatimento do tronco de cone dos traços T10P (esquerda) e T10S (direita). .... | 58 |
| Figura 11: Resultado de resistência à compressão axial aos 28 dias. ....                  | 59 |
| Figura 12: Resultado de resistência à compressão axial aos 28 e 90 dias.....              | 61 |
| Figura 13: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias.....                | 63 |
| Figura 14: Resultado de absorção de água por imersão.....                                 | 64 |
| Figura 15: Resultado de absorção por capilaridade.....                                    | 65 |
| Figura 16: Resultado do ensaio de B.E.T:.....   | 66 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Classificação dos aditivos químicos segundo a NBR 11786:2011.....            | 25 |
| Tabela 2: Relação entre grau de resistência e o consumo de água.....                   | 38 |
| Tabela 3: Análise química do cimento utilizado.....                                    | 40 |
| Tabela 4: Características dos aditivos químicos.....                                   | 42 |
| Tabela 5: Proporções em massa entre os materiais cimentícios.....                      | 43 |
| Tabela 6: Consumo de materiais por m <sup>3</sup> . ....                               | 48 |
| Tabela 7: Quantidades de materiais para a produção dos CPs. ....                       | 48 |
| Tabela 8: Substituição volumétrica correspondente.....                                 | 48 |
| Tabela 9: Composição química da CCA por FRX semiquantitativa.....                      | 53 |
| Tabela 10: Características físicas da brita. ....                                      | 56 |
| Tabela 11: Características físicas da areia. ....                                      | 56 |
| Tabela 12: Resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone.....                    | 57 |
| Tabela 13: Resultado de resistência à compressão axial aos 28 dias.....                | 59 |
| Tabela 14: Resultado de resistência à compressão axial aos 90 dias.....                | 61 |
| Tabela 15: Relação entre resistência do concreto e consumo de cimento aos 90 dias..... | 62 |
| Tabela 16: Resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias.....                       | 62 |
| Tabela 17: Resultados de absorção por imersão.....                                     | 64 |
| Tabela 18: Resultado de absorção por capilaridade.....                                 | 65 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

ARI – Alta resistência inicial

a/c – água/cimento

B.E.T. - Brunauer Emmett e Teller

CAD – Concreto de alto desempenho

CAR – Concreto de alta resistência

CC – Concreto convencional

CCA – Cinza da casca de arroz

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CP – Cimento Portland

CPs – Corpos de prova

D.P – Desvio padrão

DRX – Difração de Raios-X

FRX – Fluorescência de Raios-X

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho

GPa – Gigapascal

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MIP - Mercury Intrusion Porosimetry

MPa – Megapascal

MTon – Megatonelada

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

Pa – Pascal

P.F. – Perda ao fogo

Ref. - Referência

RCPT - Rapid Chloride Permeability Test

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

µm - micrômetro

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 12 |
| 1.1. Pergunta de Pesquisa e Objetivos.....                | 14 |
| 1.1.1. Pergunta de pesquisa.....                          | 14 |
| 1.1.2. Objetivo geral.....                                | 15 |
| 1.1.3. Objetivos específicos.....                         | 15 |
| 1.2. Justificativa e Relevância.....                      | 15 |
| 1.3. Restrições e Limitações da Pesquisa.....             | 16 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                             | 17 |
| 2.1. Concreto de alto desempenho (CAD).....               | 17 |
| 2.1.1. Estrutura.....                                     | 18 |
| 2.1.2. Permeabilidade e porosidade.....                   | 19 |
| 2.2. Cimento.....   | 21 |
| 2.3. Agregados.....                                       | 22 |
| 2.4. Aditivos químicos.....                               | 24 |
| 2.4.1. Aditivos plastificantes e superplastificantes..... | 26 |
| 2.5. Adições Minerais.....                                | 28 |
| 2.5.1. Atividade pozolânica.....                          | 31 |
| 2.5.2. Cinza de casca de arroz.....                       | 32 |
| 2.6. Dosagem do concreto de alto desempenho.....          | 35 |
| 2.6.1. Métodos de dosagem.....                            | 36 |
| 2.6.2. Método de Mehta & Aitcin.....                      | 37 |
| 3. METODOLOGIA.....                                       | 38 |
| 3.1. Enquadramento Metodológico.....                      | 38 |
| 3.2. Materiais.....                                       | 40 |
| 3.2.1. Cimento.....                                       | 40 |
| 3.2.2. Agregados.....                                     | 40 |
| 3.2.3. Cinza da Casca de Arroz.....                       | 41 |
| 3.2.4. Aditivos Químicos.....                             | 41 |
| 3.2.5. Água.....  | 42 |
| 3.3. Métodos.....   | 42 |
| 3.3.1. Caracterização dos constituintes da mistura.....   | 43 |
| 3.3.2. Dosagem.....                                       | 47 |
| 3.3.3. Análise do concreto no estado fresco.....          | 49 |
| 3.3.4. Análise do concreto no estado endurecido.....      | 49 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                           | 52 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.1.   | Caracterização dos Constituintes da Mistura ..... | 52 |
| 4.1.1. | Cinza da casca de arroz .....                     | 52 |
| 4.1.2. | Aditivo químico .....                             | 55 |
| 4.1.3. | Agregados .....                                   | 56 |
| 4.2.   | Resultados dos ensaios no concreto .....          | 57 |
| 4.2.1. | Abatimento do tronco de cone .....                | 57 |
| 4.2.2. | Resistência à compressão axial.....               | 59 |
| 4.2.3. | Módulo de elasticidade .....                      | 62 |
| 4.2.4. | Absorção de água por imersão e capilaridade.....  | 64 |
| 4.2.5. | Adsorção de nitrogênio (B.E.T).....               | 66 |
| 5.     | Conclusões.....                                   | 67 |
| 5.1.   | Considerações finais .....                        | 67 |
| 5.2.   | Sugestões para trabalhos futuros .....            | 69 |
| 6.     | REFERÊNCIAS .....                                 | 69 |

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos materiais de construção utilizados pelo homem, o concreto é o principal e o mais presente nas obras, trabalhando em conjunto com o aço e formando o conhecido concreto armado. Com o passar do tempo, os projetistas estão especificando estruturas cada vez mais arrojadas devido principalmente às evoluções no cálculo estrutural, nos programas computacionais e ao maior conhecimento do comportamento mecânico do concreto armado (ISAIA *et al.*, 2011).

Concretos convencionais (CC) muitas vezes não conseguem atender aos requisitos de resistência e durabilidade e existe a necessidade de se utilizar concretos especiais, como por exemplo os concretos de alta resistência (CAR) e os concretos de alto desempenho (CAD) (ISAIA *et al.*, 2011). Mehta e Aitcin (1990) estabeleceram os princípios gerais que regem o CAD e as principais características que o diferenciam do, até então, denominado CAR. Este estudo é considerado um ícone, uma vez que, até hoje, são empregados, com poucas modificações, os fundamentos nele indicados (ISAIA *et al.*, 2011).

Se no passado a resistência à compressão do concreto era o principal critério de performance do material, com o passar do tempo a durabilidade assumiu essa posição de destaque ao se analisar o desempenho das peças estruturais (MEHTA; AÏTCIN, 1990; MEDEIROS *et al.*, 2011). Durabilidade que, de acordo com o comitê 201 do ACI (1991), quando se refere ao concreto de cimento Portland, é definida como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

Por ser um material composto, as propriedades do concreto dependem diretamente da proporção, características e interação de seus componentes, tornando-se necessário o cuidado com a escolha dos tipos de materiais e suas quantidades (NEVILLE, 2015). Dentre essas características, a durabilidade do concreto é afetada diretamente pela proporção dos componentes da mistura e pela qualidade desses componentes, uma vez que a microestrutura do material sofre influência de fatores como a composição química dos cimentos, a relação

água/aglomerante, tipos de adições minerais e a distribuição dos tamanhos das partículas (OH *et al.*, 2002).

O grande aumento na utilização do concreto como material de construção nos últimos anos e suas inúmeras aplicações estruturais tem por consequência um aumento na fabricação do cimento, fazendo com que esse material se tornasse o principal produto industrial consumido pela humanidade (ISAIA, 2011). Essa alta produção, aliada com a grande quantidade de emissão de dióxido de carbono no processo de fabricação, faz com que a indústria cimenteira seja considerada uma das maiores emissoras de  $CO_2$  do mundo (BENHELAL *et al.*, 2013). Em 2006, a emissão do dióxido de carbono pelas fábricas de cimento foi de 1,88 bilhões de toneladas e, caso esse aumento continue nos próximos anos, em 2050 a quantidade total de  $CO_2$  emitida pela indústria cimenteira será de 2,34 bilhões de toneladas (BENHELAL *et al.*, 2013).

Fica claro que a sustentabilidade deve ser considerada como fator preponderante na produção de concretos que atenda a demanda da construção civil nos próximos anos (JOHN, 2011). Sustentabilidade essa que está diretamente relacionada com a durabilidade desse material, uma vez que, estruturas em concreto devem ser projetadas para uma vida útil elevada. Caso essas estruturas não sejam duráveis, haverá aumento no consumo de matérias primas, na emissão de poluentes, nos gastos energéticos e nos gastos com manutenção (MEDEIROS *et al.*, 2011).

A utilização de adições minerais em conjunto com aditivos superplastificantes proporcionam ao CAD, sobretudo, elevadas resistências mecânicas (AÏTCIN, 2000). O aumento da resistência à compressão de um material possibilita a redução da seção transversal de uma peça estrutural, resultando em um menor consumo total de materiais. A baixa relação água/cimento do CAD gera um baixo consumo total de água na mistura, chegando a ser, muitas vezes, metade da quantidade de água consumida em concretos convencionais (NEVILLE, 2015).

Além de relacionar o viés sustentável do CAD com a sua maior durabilidade e menores seções transversais, a sustentabilidade desse material fica mais evidente ainda quando analisamos a substituição parcial do cimento por resíduos industriais, como por exemplo a sílica ativa e a escória de alto forno (JOHN, 2011). Os resíduos

utilizados como adições minerais, provenientes de outras indústrias, teriam grande risco de contaminação do meio ambiente, uma vez que seriam descartados em locais impróprios. A substituição parcial do clínquer ou do cimento por esses resíduos, além de reduzir o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado, diminui o consumo de recursos naturais limitados, reduzindo o volume de extração de matérias primas (MOLIN, 2011).

Além de resíduos industriais, o CAD pode utilizar em sua composição resíduos agrícolas, como a cinza da casca de arroz (CCA) e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (PRUSTY *et al.*, 2016). Nos últimos anos, muitos pesquisadores têm investigado a utilização desses materiais na composição do concreto. A partir de ensaios que avaliam resistências mecânicas e a durabilidade do CAD em seu estado endurecido, esses pesquisadores comprovam que a CCA traz benefícios ao concreto e suas vantagens são equiparáveis àquelas obtidas com adições já consolidadas como, por exemplo, a sílica ativa (SENSALE, 2010; VAN *et al.*, 2014; LE; NGUYEN; LUDWIG, 2014; XU *et al.*, 2016).

Dessa forma, o presente trabalho busca estudar a utilização da CCA na produção de CAD, ao avaliar os melhores teores de substituição do cimento pela cinza e a influência dessa substituição nas propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido. Foram estudados três teores de CCA (10%, 15% e 20% de massa do cimento), dois aditivos químicos (plastificante e superplastificante) e duas relações a/c diferentes (0,46 e 0,38). Os ensaios avaliaram trabalhabilidade, resistência à compressão, permeabilidade e porosidade do concreto.

## **1.1. Pergunta de Pesquisa e Objetivos**

### *1.1.1. Pergunta de pesquisa*

A utilização da cinza da casca de arroz na produção de concreto de alto desempenho resulta em alterações nas propriedades finais do concreto, tanto em seu estado fresco, quanto em seu estado endurecido. Essas alterações dependem de vários fatores, dentre eles pode-se citar a quantidade de cinza utilizada na mistura e suas características físico-químicas.

Dessa forma, surge a seguinte pergunta de pesquisa:

- De que maneira a cinza da casca de arroz pode ser utilizada como adição mineral na produção de concretos de alto desempenho (melhor teor de utilização), e quais são os efeitos de sua utilização na trabalhabilidade da mistura fresca e nas propriedades mecânicas e de durabilidade do material?

#### 1.1.2. *Objetivo geral*

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo sobre a utilização da cinza da casca de arroz como adição mineral de concretos em alto desempenho, analisando o melhor teor de utilização do material. Foram avaliadas propriedades do concreto em seu estado fresco (trabalhabilidade) e em seu estado endurecido (resistência mecânica, módulo de elasticidade, porosidade e permeabilidade) com a substituição parcial do cimento pela CCA.

#### 1.1.3. *Objetivos específicos*

Para que o objetivo geral seja alcançado, são objetivos específicos desse trabalho:

- estudar as características físico-químicas da CCA por meio de ensaios que investiguem sua composição química e mineralógica, granulometria, superfície específica, densidade e morfologia;
- avaliar as propriedades do CAD, em seu estado fresco e endurecido, com os diferentes teores de substituição do cimento pela adição mineral (10%, 15% e 20% da massa do cimento), dois aditivos químicos (plastificante e superplastificante) e duas relações água/cimento diferentes;
- investigar os efeitos da CCA na microestrutura de poros (porosidade) e na permeabilidade de agentes agressivos por meio de ensaios de adsorção de nitrogênio (B.E.T.) e absorção de água.

## 1.2. **Justificativa e Relevância**

Justifica-se o presente estudo e o grande número de pesquisas envolvendo a utilização da CCA como adição mineral em concretos especiais no lugar da sílica ativa o fato de a cinza ter maior disponibilidade mundial na atualidade do que a sílica. Enquanto a produção mundial de sílica ativa na década passada chegou a 1 milhão

de toneladas/ano, a produção da CCA pode chegar a 27 milhões de toneladas/ano nessa década (MOLIN, 2011). Ainda segundo a autora, estima-se que, somente no Brasil, na safra de 2010 foram geradas 440 mil toneladas de CCA.

A escolha da CCA para ser utilizada nesse trabalho como adição mineral no CAD foi feita, principalmente, por causa dos benefícios que, segundo o referencial teórico, ela traz para a mistura e pela grande disponibilidade deste resíduo agrícola no mundo e no Brasil. Além disso, a grande quantidade recente de trabalhos publicados sobre esse material motiva a investigação do tema e futuras comparações.

Embora muito se tenha investigado nos últimos anos sobre a CCA, ainda não se chegou a um consenso entre os pesquisadores sobre qual o melhor teor de substituição do cimento por esse resíduo que maximize os benefícios. Dessa forma, serão investigados três teores de substituição em massa do cimento pela cinza, 10%, 15% e 20%, teores esses situados na faixa de substituição em que alguns autores consideram estar o teor ótimo (LE *et al.*, 2014; XU *et al.*, 2016); .

### **1.3. Restrições e Limitações da Pesquisa**

A investigação foi realizada em concreto de alto desempenho, ficando excluída a realização de ensaios em argamassas, pasta cimentícia, concretos convencionais ou concretos de ultra alto desempenho. Foram avaliadas as propriedades do concreto em seu estado endurecido nas idades de 28 dias e 90 dias.

Quanto à CCA, não foram estudados processos de produção ou tratamento do resíduo, sendo utilizada um tipo de cinza no estudo, comercializada no mercado. Ainda no que diz respeito à CCA, foram utilizados 3 teores de substituição em massa do cimento pela cinza. Mesmo que a substituição tenha sido realizada em cima da massa do cimento, foi indicada a correspondente substituição volumétrica.

Outra limitação com relação a essa pesquisa é referente aos demais componentes da mistura, agregados e cimento. Foram utilizados areia quartzosa de granulação média, brita 0 de gnaiss e cimento CP V de alta resistência inicial. Materiais de outros tipos, composições, granulometrias ou origem mineralógica não foram estudados nem para efeito de comparação, uma vez que, o foco da pesquisa é na CCA e nos seus teores de utilização.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Concreto de alto desempenho (CAD)

Entendido como uma evolução tecnológica dos concretos convencionais, o CAD é fruto da pesquisa aplicada e resultado da introdução conjunta de adições minerais e aditivos químicos na mistura do concreto. A utilização desses materiais, destacando-se a ação dispersante dos aditivos químicos que permitem a redução de água em relação à quantidade de material cimentício, é diretamente responsável pelas elevadas resistências mecânicas dos concretos (AİTCIN, 2000). Segundo o autor, sua microestrutura mais densa, resultado dessas adições e da baixa relação água/cimento, proporcionam ao concreto características diferenciadas, dentre as quais pode-se citar baixa permeabilidade e porosidade, e elevadas resistências mecânicas.

Aİtcin (2003) ressalta que os estudos sobre o concreto de alto desempenho permitem considerar esse produto um material mais ecológico ou, como pode-se dizer hoje em dia, mais sustentável, uma vez que os componentes da mistura são utilizados em todo o seu potencial, resultando em um concreto com ciclo de vida muito mais longo. O autor ainda diz que aquele concreto que era conhecido como de alta resistência, hoje em dia tem em seu nome o alto desempenho, já que, além de proporcionar maiores resistências à compressão, ele garante uma durabilidade muito maior em comparação com concretos convencionais.

A baixa relação água/cimento, citada anteriormente, é essencial para a qualidade do CAD, pois diminui o efeito da retração e a porosidade, evitando, dessa forma, trincas e fissuras e proporcionando ao concreto uma baixa permeabilidade. Como consequência direta da diminuição da permeabilidade do material está a proteção da armadura contra a corrosão pela água e pelos agentes externos (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Porém, a microestrutura mais densa do CAD tem efeitos adversos em situações de aumento excessivo de temperatura, por exemplo, promovendo um acúmulo de poropressão e a ocorrência de lascamentos explosivos (REAL *et al.*, 2016).

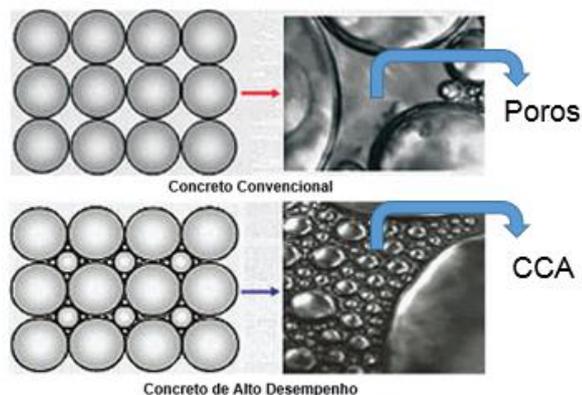
O CAD contém agregados graúdos e miúdos, brita e areia respectivamente, água e cimento Portland, assim como a maioria dos concretos convencionais. Porém o que difere a composição do CAD em relação aos concretos convencionais é o uso de adições minerais (sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, entre outras) e aditivos superplastificantes. O teor de superplastificante deve ser alto, o que permite a redução do uso de água na produção do concreto, levando a uma relação a/c muito baixa, inferior a 0,35, considerada pelo autor a máxima relação para concretos de alto desempenho (NEVILLE, 2015).

### 2.1.1. Estrutura

Mesmo que em uma análise macroscópica o concreto seja classificado como um material com apenas duas fases, existem complexidades em nível microscópico que não nos permite considerar o material como bifásico. Existe uma terceira fase que se situa na interface entre as partículas do agregado graúdo e a pasta de cimento, chamada de zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Se a estrutura do CAD pode ser dividida da mesma maneira que a dos demais concretos, o que difere ela das outras é sua microestrutura mais densa e homogênea. Essa microestrutura é alcançada, principalmente, por meio da incorporação de partículas muito finas, as chamadas adições minerais, e do menor volume de água utilizada na mistura. As adições minerais promovem na estrutura do CAD a diminuição dos tamanhos dos poros e das interconexões entre eles (AÏTCIN, 2000), como pode ser observado na Figura 1, que apresenta os poros da microestrutura sendo preenchidos pela CCA.

**Figura 1: Microestrutura de CC e CAD**



Fonte: (PET CIVIL UFJF, 2012) (adaptado)

A fase do concreto denominada de pasta de cimento, resultado das reações químicas entre o cimento e a água, constitui o meio aglomerante do concreto. Os dois fatores que definem a resistência da pasta de cimento é a relação água/cimento e a porosidade. Mehta e Monteiro (1994) dizem que na pasta de cimento são encontrados sólidos (silicato de cálcio, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e grão de clínquer não hidratados), vazios e água. Ainda segundo os autores, propriedades do concreto, como resistência, durabilidade e estabilidade dimensional, são diretamente influenciadas pela sua microestrutura. Embora o concreto seja constituído majoritariamente por agregados, o constituinte ativo da mistura é a pasta de cimento e a performance do concreto é amplamente determinada pelas propriedades dessa fase (RAMACHANDRAN; FELDMAN, 1996).

A fase do concreto referente aos agregados é considerada a mais forte da estrutura do material, uma vez que se está referindo aos concretos de resistências normais. Porém, quando se fala em CAD, em que a zona de transição é melhorada e as tensões são transferidas de forma mais eficaz, ela se torna o elo mais fraco, limitando a resistência do produto final. Propriedades do concreto, como massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional, são de responsabilidade predominante dos agregados e são determinadas mais por suas características físicas do que químicas (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A fase do concreto denominada de zona de transição ou zona de interface tem esse nome justamente por localizar-se na interface entre os agregados e a pasta de cimento. Propriedades como rigidez e o módulo de elasticidade do concreto, sofrem influência do volume de vazios e das microfissuras encontradas nessa fase. Se no CAD a zona de interface é fortalecida por meio da utilização de adições minerais na mistura, em concretos convencionais representa o elo mais fraco da corrente, considerada assim a fase de resistência limite desse tipo de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

### 2.1.2. *Permeabilidade e porosidade*

A porosidade ou o desenvolvimento da estrutura de poros da pasta de cimento hidratada é de grande importância e influencia diretamente o comportamento físico-químico do concreto em ambientes agressivos. Não somente os tamanhos dos poros,

mas também a conexão entre eles afeta o transporte desses agentes agressivos e, dessa forma, seu estudo é de amplo interesse da comunidade científica (BEAUDOIN; MARCHAND, 2000).

A durabilidade do concreto depende da sua habilidade de impedir ou dificultar o ingresso de agentes químicos agressivos e a permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de fluidos em um sólido com poros (ABBAS *et al.*, 1999). A permeabilidade do concreto pode ser considerada como a facilidade ou dificuldade que líquidos ou gases tem de ingressar e se deslocar no material e depende basicamente da estrutura da pasta de cimento hidratada.

Também relacionada com a taxa de movimentação de um fluido sob pressão dentro do concreto, a permeabilidade é muitas vezes considerada uma medida direta de durabilidade (RAMACHANDRAN; FELDMAN, 1996). A durabilidade do material é afetada diretamente pela permeabilidade no concreto de três fluidos principais: água, dióxido de carbono e oxigênio (NEVILLE, 2015).

Uma vez que existem poros de tamanhos diferentes e que estejam conectados ou não, é preciso que haja uma diferenciação entre a porosidade e a permeabilidade (NEVILLE, 2015). Segundo o autor, a porosidade é a proporção entre o volume de poros e o volume total do concreto. Caso a porosidade seja grande e, além disso, os poros estejam interconectados, a permeabilidade também será alta, visto que, o deslocamento de fluidos será modificado pelos poros.

Um dos métodos mais populares de se estudar a porosidade e a estrutura de poros de materiais de base cimentícia é por meio do ensaio de Porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) (LASKAR *et al.*, 1997). Segundo Ma (2014), essa técnica tem as suas limitações, porém, ainda apresenta grande capacidade de contribuir nas pesquisas sobre cimento e concreto. Segundo Beaudoin e Marchand (2000), uma das grandes desvantagens da técnica de MIP está no fato de que é assumido que os poros tem formato cilíndrico, porém, os autores afirmam que a pasta de cimento hidratada possui poros de formatos variados, alguns bem complexos.

Outro método muito utilizado na determinação da distribuição dos tamanhos de poros de uma material é o que utiliza a adsorção de nitrogênio, mais conhecido como

B.E.T. (TEIXEIRA *et al.*, 2001). Essa sigla faz referência às letras iniciais dos três autores do método: Brunauer, Emmett e Teller. Segundo Teixeira *et al.* (2001), utilizando a adsorção física de nitrogênio, a distribuição de tamanhos de poros pode ser calculada a partir da pressão relativa na qual os poros são preenchidos com um líquido proveniente da condensação do gás. O processo inverso, ou seja, a evaporação do líquido contido no poro, também pode ser utilizado.

Uma das causas do encurtamento do tempo de vida de estruturas de concreto é o ataque às armaduras através da penetração de cloretos. Essa penetração depende, principalmente, dos mecanismos de intrusão dos íons e da microestrutura da peça estrutural (ANDRADE, 1993). A durabilidade de estruturas de concreto, principalmente aquelas em ambientes marinhos e em climas tropicais, é afetada diretamente pelo ingresso de íons de cloreto no material, promovendo a corrosão das armaduras (NAIDU, 2011).

Para se avaliar a penetração de íons de cloreto em amostras de concreto, existem inúmeros ensaios, sendo que, o mais empregado dentre eles é o preconizado pela norma ASTM C1202 (2012), mais conhecido como ensaio de penetração acelerada de íons de cloreto (RCPT) (CORDEIRO, 2006). Segundo o autor, esse ensaio faz uma relação entre a capacidade de penetração de íons de cloreto com a carga elétrica que passa através de um disco de concreto em um intervalo de tempo.

## **2.2. Cimento**

A composição do cimento é proveniente da queima de uma mistura adequada de materiais contendo quatro óxidos principais:  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ . Essa queima tem como objetivo a produção do clínquer que, juntamente com o sulfato de cálcio, representa os ingredientes básicos necessários para fabricação do cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O clínquer, principal constituinte do cimento Portland, é resultado da calcinação de uma mistura de argila, calcário e corretivos químicos, empregados de modo que seja garantida certa proporção de determinados compostos químicos na mistura. Essa correta relação de compostos químicos proporciona a formação de compostos hidráulicos e garante ao cimento sua propriedade ligante (BATTAGIN, 2011).

O primeiro material escolhido para a produção do CAD deve ser o cimento, mesmo quando outros materiais cimentícios sejam utilizados. Isso porque o desempenho final do cimento em termos de reologia e de resistência torna-se cada vez mais crítico à medida que a resistência à compressão desejada aumenta (AİTCIN, 2000). Para a produção de CAD é preciso que se utilize cimentos com um maior grau de pureza, uma vez que serão adicionadas às misturas pozolanas com qualidade superior àquelas incorporadas em cimentos convencionais (ISAIA *et al.*, 2011). Dessa forma, o autor recomenda a utilização de cimentos tipo CP I ou CP V de alta resistência inicial.

A produção mundial de cimento em 2003 foi de 2.344 Mton e em 2013 chegou a 4.000 Mton, crescimento de mais de 70% em dez anos (CIMENTO.ORG, 2014). A grande emissão de dióxido de carbono e o elevado consumo energético na fabricação do cimento, fez com que esse segmento industrial buscasse alternativas sustentáveis na produção desse material. Dessa forma, têm se produzido cimentos com adições minerais, diminuindo a emissão de gases do efeito estufa e reutilizando materiais considerados como resíduos industriais (BATTAGIN, 2011). Outra maneira de reduzir os impactos ambientais gerados, não somente por causa das emissões de gases poluentes, mas também pelo consumo exagerado de matérias primas limitadas é através da substituição de parte do cimento da mistura por pozolanas (JOHN, 2011).

### **2.3. Agregados**

Os agregados ocupam de 60% a 80% do volume do concreto e desempenham um papel de grande importância na produção dos concretos de alto desempenho quando comparados com os concretos tradicionais. Isto acontece porque podem representar o elo fraco da mistura do concreto, quando este atingir resistências elevadas (PRICE, 2003).

O tamanho das partículas dos agregados tem papel significativo na garantia da coesão e da densidade da estrutura do concreto e essa influência aumenta ainda mais quando a quantidade de cimento diminui ou quando existe a exigência de uma trabalhabilidade maior. Além disso, não somente o tamanho das partículas, mas também os seus formatos, afetam a trabalhabilidade e as resistências mecânicas do produto final (SIMS; BROWN, 1998).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as características mais significativas dos agregados graúdos são: resistência à compressão, resistência à abrasão, módulo de elasticidade, massa específica e massa unitária, absorção, porosidade, composição granulométrica, forma, textura superficial e substâncias deletérias. As dimensões máximas dos agregados graúdos utilizados em CAD devem estar entre 10,0 e 14,0 mm, entretanto, se for utilizado material de boa qualidade, pode-se utilizar diâmetro de até 19,0 mm (PRICE, 2003).

Quanto menor o agregado, menor a superfície capaz de reter água durante a exsudação do concreto fresco, levando a uma zona de transição de menor espessura e, conseqüentemente, mais resistente. A forma dos agregados graúdos não deve ser alongada e a classificação deve ser uniforme, não havendo muita separação entre frações finas e grossas (NEVILLE, 2015).

É primordial que, após a escolha adequada do agregado miúdo, haja um rigoroso controle de qualidade, uma vez que pequenas variações no teor de umidade e/ou granulometria podem ocasionar mudanças significativas nas propriedades do concreto. Neville (2015) sugere que o teor de umidade seja verificado frequentemente numa obra de concreto, pois seu valor varia conforme o clima e a posição de uma amostra no monte de agregado em estoque.

É importante que exista o cuidado de se escolher de forma criteriosa o tamanho dos agregados com o objetivo de maximizar o desempenho da mistura. Le e Ludwig (2016) utilizaram tamanho máximo de agregados de 16 mm e obtiveram resistências de até 120 MPa aos 28 dias. Van *et al.* (2014) utilizaram como agregado, apenas areia, com tamanho médio de partículas de 0,17 mm, e obtiveram resistências a compressão de 180 MPa aos 28 dias. Tuan *et al.* (2011) também utilizaram como agregados somente areia, com partículas de tamanho médio de 0,23 mm, e obtiveram resistências a compressão de 180 MPa.

A distribuição dos tamanhos das partículas afeta a densidade de empacotamento das partículas o que, por sua vez, determina a quantidade de vazios que deverá ser preenchida pela pasta cimentícia. Essa densidade de empacotamento das partículas, juntamente com a superfície específica dos agregados tem papel importante nas propriedades do concreto (KWAN *et al.*, 2014)

Segundo De Larrard (2009), a densidade de empacotamento é a razão entre o volume de sólidos e o volume total e depende do processo de encaixe. Ainda segundo o autor, a densidade de empacotamento virtual é o maior valor alcançado ao se encaixar as partículas uma a uma, sem mudar seu formato. Porém, misturas como o concreto têm suas partículas posicionadas de forma aleatória e, por isso, o valor dessa densidade de empacotamento é menor

A densidade de empacotamento dos sólidos influencia de forma significativa o comportamento de concretos especiais como os concretos de alto desempenho e, por isso, recentemente muitos pesquisadores têm estudado maneiras de melhorar o desempenho desses concretos, maximizando a densidade de empacotamento das partículas (DE LARRARD, 2009; GHODDOUSI *et al.*, 2014; KWAN *et al.*, 2014). Um dos objetivos dessa maximização é a possibilidade de redução da relação água/cimento para que se tenham melhores resistências e maiores durabilidades (GHODDOUSI *et al.*, 2014).

Em estudo recente, Ghoddousi *et al.* (2014) chegaram à conclusão de que, uma vez que sempre existe uma combinação ótima de agregados graúdos e miúdos para reduzir o volume de vazios, o aumento de areia fina além dessa quantidade ótima gera uma diminuição na densidade de empacotamento.

Kwan *et al.* (2014) concluíram que, embora o aumento da densidade de empacotamento gera um aumento de pasta cimentícia disponível para cobrir os agregados, uma alta quantidade de finos aumentaria a superfície específica dos agregados que deverá ser encoberta pela pasta. Dessa forma, os autores dizem que deverá existir uma quantidade ótima de finos nos agregados que melhore a performance do concreto e que, mais do que a densidade de empacotamento das partículas, o que realmente governa o desempenho do concreto é a espessura da pasta de cimento que cobre os agregados.

#### **2.4. Aditivos químicos**

Aditivos químicos são produtos que, adicionados em pequena quantidade aos concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições (ABNT NBR 11768, 2011). Assim, o

uso de aditivos químicos proporciona ao concreto consideráveis melhorias físicas e econômicas.

A ASTM C 125-92 define aditivo como sendo um material, que não seja a água, agregados, aglomerantes e fibras, que é adicionado na mistura do concreto na betoneira, antes ou no meio dos outros materiais (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A dosagem do aditivo químico normalmente se situa na faixa de 0,05% e 5% da massa dos materiais cimentícios (HARTMANN *et al.*, 2011).

Os aditivos químicos abrangem uma grande quantidade de produtos, que variam de acordo com as características que eles atribuem ao concreto, quando adicionados na mistura. Eles podem ser aceleradores, retardadores, incorporadores de ar, redutores de reação álcali-agregados, redutores de água, plastificantes, superplastificantes, entre outros (RAMACHANDRAN, 1996b).

Os aditivos são classificados em virtude das alterações que causam nas propriedades do concreto fresco e/ou endurecido, a seguir é apresentada a classificação de aditivos químicos empregada no Brasil, segundo a NBR 11768: 2011 (Tabela 1).

**Tabela 1: Classificação dos aditivos químicos segundo a NBR 11786:2011.**

| <b>Tipo</b> | <b>Classificação</b>             |
|-------------|----------------------------------|
| P           | Plastificante                    |
| R           | Retardador                       |
| PR          | Plastificante Retardador         |
| SP          | Superplastificante               |
| SPR         | Superplastificante Retardador    |
| A           | Acelerador                       |
| PA          | Plastificante Acelerador         |
| IAR         | Incorporador de Ar               |
| SPA         | Superplastificante Plastificante |

Fonte: NBR 11768:2011.

Os principais aditivos químicos utilizados na produção do CAD são os superplastificantes, pois aumentam a fluidez do concreto a níveis muito elevados, sem alterar outras características, permitindo produzir, através da redução da relação água/aglomerante, concretos com alta resistência e maior durabilidade (AÏTCIN,

2000). Avanços significativos foram alcançados na produção e aplicação dos superplastificantes, aumentando ainda mais a sua importância na produção do CAD (RAMACHANDRAN, 1996b).

#### 2.4.1. *Aditivos plastificantes e superplastificantes*

No início do século XX na Inglaterra, o aditivo plastificante utilizado era à base de lignosulfonato. A partir do final dos anos 30, surgiu nos Estados Unidos o aditivo superplastificante tipo I, à base de naftaleno sulfonato ou melanina sulfonato, com características superiores àqueles utilizado até então. Com o passar dos anos, novos aditivos foram desenvolvidos, sempre com alteração em sua base química para promover melhores resultados na mistura. A partir dos anos 1990, foi desenvolvida uma nova classe (tipo II) de superplastificantes, à base de policarboxilatos, os quais são os mais utilizados hoje em dia na produção de concretos de alto desempenho (HARTMANN *et al.*, 2011).

Os superplastificantes são uma categoria especial de aditivos redutores de água, uma vez que são compostos por materiais que permitem uma redução muito maior de água e, dessa forma, melhoram a trabalhabilidade do concreto em que eles são incorporados (MAILVAGANAM; RIXOM, 2002).

O principal objetivo do uso de aditivos plastificantes e superplastificantes é melhorar a consistência e as condições de trabalhabilidade do concreto sem a adição de mais água. O uso desses aditivos proporciona um aumento das propriedades mecânicas e da durabilidade da mistura, além de reduzir o consumo de água, mantendo a consistência da mistura. A compatibilidade entre a composição do cimento e o aditivo adotado é um aspecto de extrema importância, visto que, para cada tipo existe um ponto de saturação para um dado cimento (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

A utilização desses aditivos químicos gera efeitos positivos no concreto tanto em seu estado fresco quanto em seu estado endurecido. No estado fresco, a utilização desse material permite a redução de água na mistura, evitando assim o fenômeno de segregação, e melhorando a trabalhabilidade do concreto. No estado endurecido, o

aditivo irá promover um concreto com microestrutura mais densa com melhores resistências mecânicas (ALSADEY, 2015).

Os aditivos plastificantes e superplastificantes têm como componentes ativos principais agentes tenso-ativos substâncias que são absorvidas pelas partículas de cimento. Essa absorção confere às partículas de cimento uma carga elétrica negativa, resultando em uma repulsão entre elas. Esse efeito de dispersão nas partículas cimentícias expõe uma maior superfície de cimento à hidratação, aumentando a resistência do concreto logo nas primeiras idades (NEVILLE, 2015).

Ainda segundo Neville (2015), a melhora da trabalhabilidade, adquirida com o uso desses aditivos, pode ser aproveitada de duas maneiras: com a produção de concretos com alta trabalhabilidade ou com alta resistência mecânica. Se for mantido o mesmo consumo de água e a mesma relação água/cimento, o uso do aditivo superplastificante aumenta a trabalhabilidade do concreto, resultando em um concreto fluido. Porém, se houver uma redução substancial da relação água/cimento, o resultado será um concreto com trabalhabilidade normal e uma resistência mecânica extremamente alta.

Nem todos os aditivos químicos comercializados apresentam a mesma eficiência dentro da mistura e, dessa forma, sua escolha deve ser feita de maneira minuciosa. Como uma simples avaliação visual das especificações dos superplastificantes não é suficiente para determinar seu comportamento reológico com o cimento, é necessário realizar experimentos para testar e observar as reações ocorridas (AÏTCIN, 2000).

A utilização de aditivos superplastificantes torna possível a redução da relação água/cimento para a faixa de 0,20 a 0,35, que é a faixa em que alguns autores dizem situar os concretos de alto desempenho. Essa redução de água explica como a resistência à compressão do concreto pode ser aumentada quatro ou cinco vezes. A ótima ação dispersante dos superplastificantes elimina a necessidade de certa quantidade de água para garantir a trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco e para deflocular as aglomerações de partículas de cimento (AÏTCIN, 1995).

Em estudo recente, Le e Ludwig (2016) concluíram que, ao se aumentar a dosagem de superplastificante, o resultado que se obtém é um concreto com maior fluidez e menor viscosidade plástica. Porém, dosagens maiores que o ponto de saturação já não influencia mais essas duas características e, além disso, resulta em segregação da pasta de cimento e do concreto.

O estudo da compatibilidade deve ser feito avaliando individualmente as combinações de cada cimento e aditivo disponível para uso, visto que os mesmos apresentam reações diferentes entre si. Sobretudo, o estudo deve ser direcionado aos aspectos desejados definidos previamente, bem como consistência, fluidez, dentre outros. A utilização de dosagens de superplastificantes maiores que a do ponto de saturação pode causar segregação da mistura, exsudação e retardo do tempo de pega (MELO *et al.*, 2009).

## **2.5. Adições Minerais**

Denomina-se adição mineral os materiais com atividade pozolânica, incluindo pozolanas naturais, cinzas volantes, escória básica granulada de alto-forno, cinza de casca de arroz (CCA), metacaulim, sílica ativa e outras. A inserção desses materiais na mistura promove a necessidade de retirada de parte de outros materiais, para que se mantenha a mesma unidade de volume (ISAIA *et al.*, 2011).

Pozolanas podem ser definidas como materiais silicosos e aluminosos que possuem por si só pouco ou nenhum valor cimentício, mas que, em sua forma dividida e na presença de umidade, reagem quimicamente com  $\text{Ca(OH)}_2$  à temperatura normal e formam compostos que possuem propriedades cimentícias (CHANDRASEKHAR *et al.*, 2002). Os efeitos dessas adições minerais devido a sua reação com o  $\text{Ca(OH)}_2$  resulta no concreto em maiores resistências mecânicas, baixa permeabilidade e melhor resistência ao ataque químico em ambientes agressivos (RAMACHANDRAN, 1996a).

A utilização de pozolanas, em combinação com o cimento Portland na obtenção de concretos de alto desempenhos visa, acima de tudo, melhorar a microestrutura do material. Portanto, a adição desses materiais na mistura resulta em um incremento nas resistências mecânicas e na durabilidade, quando comparados com os concretos convencionais (ISAIA *et al.*, 2003). Além de melhorar as propriedades do concreto,

essas partículas extremamente finas adicionadas à mistura proporcionam benefícios econômicos e ambientais, uma vez que, podem ser compostas por resíduos industriais ou agrícolas (LOHTIA; JOSHI, 1996).

Mehta e Gjørsv (1982) afirmam que, embora as pozolanas normais que estão disponíveis em grande quantidade não sejam altamente reativas, existem aquelas que apresentam uma reatividade alta e que chamam a atenção dos pesquisadores na área de cimento e concreto. Entre o segundo grupo de pozolanas estão a sílica ativa, um subproduto da indústria, e a cinza de casca de arroz, um subproduto agrícola.

A inserção de adição mineral nos concretos de alto desempenho é importante devido à ação química e física que exercem essas partículas. As adições pozolânicas mais utilizadas atualmente são a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz, por apresentarem grãos de pequena dimensão, além de possuírem o potencial pozolânico para consumir o  $\text{Ca(OH)}_2$  (ISAIA *et al.*, 2011).

De acordo com os procedimentos escolhidos na dosagem, a adição mineral pode ocorrer por adição ao cimento (com retirada de parte dos agregados) ou por substituição ao cimento (com retirada de parte do cimento), ressaltando que, ao adicionar novo material, outros deverão sair da mistura para manter a mesma unidade de volume (AÏTCIN, 2000).

Durante as últimas décadas, a sílica ativa, também chamada de microsílica, vem sendo utilizada de forma abrangente como adição mineral, principalmente em países como os Estados Unidos, França e Japão. Esse material é um subproduto industrial resultante do processo de obtenção do ferrosilício e silício-metálico e proporciona ao concreto significantes benefícios nas propriedades mecânicas (LOHTIA; JOSHI, 1996).

As partículas de sílica ativa são esféricas, com diâmetro variando de menos de 0,1  $\mu\text{m}$  até 2  $\mu\text{m}$ , de tal maneira que o diâmetro médio das partículas de sílica é cem vezes menor que a média das partículas de cimento. Os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto são devidos a suas características peculiares que tornam a sílica um material pozolânico muito reativo, devido ao seu elevado teor de  $\text{SiO}_2$ , seu estado amorfo e a sua extrema finura.

Suas partículas finas podem preencher os vazios entre as partículas maiores do cimento, quando estas estão defloculadas, na presença de uma dosagem adequada de superplastificantes (AİTCIN, 2000).

Chandraskhar *et al.* (2002) afirmam que as partículas ultrafinas da sílica ativa preenchem os espaços microscópicos entre as partículas de cimento, tornando a estrutura do concreto menos permeável. Ainda segundo o autor, a reação da sílica com  $\text{Ca(OH)}_2$  aprimora a ligação entre a pasta de cimento e os agregados, melhorando as propriedades mecânicas do concreto. O tamanho extremamente reduzido das partículas de sílica leva a uma considerável redução tanto da exsudação interna como superficial da mistura, devido ao tamanho extremamente pequeno de suas partículas (AİTCIN, 2000).

A utilização de nanossílica vem sendo estudada recentemente com objetivo de melhorar o desempenho dos concretos produzindo, principalmente ao mitigar problemas causados pela sílica ativa. A produção de concretos de alto desempenho com a adição desses nanomateriais, tais como a nanossílica, como adição mineral parece ser um enorme passo em direção à construção sustentável (JALAL *et al.*, 2015).

Em estudo recente, Oertel *et al.* (2014) analisaram a influência de três tipos de sílica amorfa no processo de hidratação em concretos de alto desempenho. O resultado foi que os tipos diferentes de sílica atuavam de formas diferentes em idades recentes (até 3 dias), porém, após essa idade os efeitos eram equalizados devido ao efeito filer e às reações pozolânicas. Oertel *et al.* (2013) chegaram à conclusão de que sílicas comerciais podem gerar melhorias nas resistências mecânicas caso haja uma dispersão das partículas menores e que a impurezas presentes nesses produtos parecem ter efeitos negativos nas resistências.

Ao avaliar a resistência e a durabilidade em ambientes agressivos de amostras de CAD, Marriaga e Yépez (2012) descobriram que o melhor teor de adição de sílica ativa para a resistência a compressão é de 10% e para a resistência a penetração de íons de cloreto é de 15%. Real *et al.* (2016) utilizaram um teor de 5% de sílica ativa em CAD e obtiveram resultados favoráveis à durabilidade do concreto submetido ao ataque químico com ácido sulfúrico.

### 2.5.1. Atividade pozolânica

O termo “atividade pozolânica” se refere às reações que ocorrem entre os constituintes ativos das pozolanas, hidróxido de cálcio e água. Embora essa definição seja aproximada, ela é aceitável dos pontos de vistas técnico e teórico. Dessa forma, a evolução das reações pozolânicas é avaliada através do monitoramento da diminuição do hidróxido de cálcio no sistema (MASSAZZA, 1993). O autor ainda diz que os dois parâmetros que regem a atividade pozolânicas incluem a quantidade máxima de hidróxido de cálcio que pode reagir com a adição mineral e a taxa de processamento dessa combinação. Os produtos gerados pela reação entre as pozolanas e o hidróxido de cálcio são, basicamente, os mesmos gerados pelas reações de hidratação do cimento Portland.

De acordo com Cordeiro (2006), a reação hidróxido de cálcio – pozolana, na presença de água, é influenciada pelos seguintes fatores: natureza das fases ativas da pozolana, teor de sílica ativa na pozolana e quantidade de pozolana e de hidróxido de cálcio na mistura. Da mesma forma, a taxa em que essa reação ocorre depende dos seguintes fatores: área superficial da adição mineral, relação sólido-água na mistura e temperatura. Massazza (1993) cita que essa taxa de ocorrência da reação é proporcional ao quadrado da superfície específica da pozolana.

Existem inúmeros métodos que podem ser aplicados para a avaliação da atividade pozolânica de determinado material. Dentre eles, um método químico que atrai o interesse de muitos pesquisadores pela sua formulação teórica e rapidez é o método proposto por J. Chapelle em 1958 e modificado por Raverdy *et al.* (1980), denominado de ensaio chapelle modificado (CORDEIRO, 2006). Esse ensaio é padronizado pela norma brasileira NBR 15895/2010 (ABNT, 2010).

Segundo Cordeiro (2006), após a realização dos procedimentos do Chapelle modificado, o resultado obtido é a quantidade de óxido de cálcio fixado em cada grama da adição mineral, sendo que, quanto maior essa fixação, mais reativa é a adição. Uma atividade pozolânica considerável é atingida quando o valor de consumo do óxido de cálcio obtido no ensaio é igual ou superior a 330 mg/g.

Outra maneira de se avaliar a atividade pozolânica de uma adição mineral é utilizando métodos de análise térmica, uma vez que, o material sofre mudanças físico-químicas quando submetido ao aquecimento (RAMACHANDRAN *et al.*, 2002). Os autores dizem que a termogravimetria, um dos métodos de análise térmica existentes, mede a perda de massa do material analisado em função do tempo, para temperaturas pré-determinadas ou para uma faixa de temperaturas. Basicamente, o equipamento é constituído por uma microbalança acoplada e um forno resistivo.

Ao se utilizar a termogravimetria, o material é caracterizado por uma curva termogravimétrica, relacionando a temperatura com a perda de massa no tempo (CORDEIRO, 2006). Ao se analisar essa curva, a conclusão mais importante é em relação à perda de massa referente ao compósito CH, que indica a pozolanicidade do material, uma vez que, uma perda pequena desse compósito sugere que houve uma reação dele com a sílica e com o C-S-H. Segundo Taylor (1997), a faixa de decomposição do CH está situada entre 425 °C e 550 °C. Já Ramachandran *et al.* (2002) sugerem uma faixa um pouco menor, entre 450 °C e 550 °C.

#### 2.5.2. Cinza de casca de arroz

A casca do arroz é um resíduo agroindustrial obtido do revestimento externo dos grãos do arroz, após o processo de moagem. A sua queima dá origem a uma cinza com alto grau de pozolonicidade. Quando esse processo de queima da casca de arroz é feito de forma não controlada, a quantidade de carbono presente na cinza faz com que o efeito seja adverso e seu uso, restrito. Porém quando a queima é feita de forma controlada, entre 500 °C e 700 °C, o produto é uma cinza com grande quantidade de sílica em seu estado amorfo e com alta reatividade (GANESAN *et al.*, 2008).

A cinza de casca de arroz (CCA) é um produto obtido por meio da combustão controlada da casca de arroz, um rejeito agrícola. A porcentagem final de sílica em uma forma amorfa no produto pode chegar a 96%. Dessa forma, esse produto tem uma característica pozolânica muito forte e representa um excelente material cimentício suplementar (TUAN *et al.*, 2011).

Desde a década de 1970, países como Índia e Estados Unidos vêm investigando a utilização da CCA, mas somente a partir do desenvolvimento do concreto de alto desempenho nos anos 1980 é que houve a preocupação de se obter o máximo desempenho pozolânico da cinza, permitindo assim o seu uso no lugar da sílica ativa como adição mineral (DAFICO, 2001).

Embora a sílica ativa seja mais fina que a cinza de casca de arroz, a CCA apresenta uma maior área específica devido a sua porosidade interna. É justamente por causa dessa porosidade interna e maior área específica que, segundo os autores, a CCA tende a se comportar diferente da sílica ativa, melhorando o processo de hidratação e o desenvolvimento da microestrutura do concreto utilizando menores relações água/cimento, em uma faixa de 0,10 a 0,25 (TUAN *et al.*, 2011).

Com uma estrutura de mesoporos, a CCA possui maior capacidade de absorção de água do que a sílica ativa e consegue absorver uma quantidade significativa de água livre no processo de hidratação na mistura de concreto de cimento Portland, aumentando a resistência mecânica do produto final. Além disso, a CCA desempenha um importante papel no combate à retração do concreto em seu processo de endurecimento, funcionando como um agente de cura interna (VAN *et al.*, 2014).

Outra questão importante abordada por Tuan *et al.* (2011) foi sobre a quantidade de aditivos superplastificantes. Segundo os autores, a sílica ativa proporciona uma menor utilização desse aditivo em relação aos concretos sem adição mineral, visto que, a superfície arredondada da sílica age como lubrificante, melhorando a trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco. Em contrapartida, a cinza de casca de arroz, por apresentar sua forma angular e alta porosidade interna, absorve uma certa quantidade de água e necessita de uma maior quantidade de superplastificante para manter a trabalhabilidade com a mesma relação água/cimento.

Chandrasekhar *et al.* (2002) afirmam que a cinza de casca de arroz, quando preparada sob condições controladas, passa a ter propriedades químicas similares às da sílica ativa. Além disso, o autor cita que o uso desses dois subprodutos, agrícola e industrial, podem resultar em benefícios tanto econômicos quanto ambientais. Para exemplificar os benefícios ambientais, os autores citam que na Índia

a casca de arroz é utilizada como fonte barata de energia e que sua queima parcial produz um rejeito que representa uma poluição para o meio ambiente.

Mehta (1992) diz que, dentre os materiais pozolânicos, somente a CCA consegue proporcionar um aumento na resistência mecânica do concreto em idades de 1 a 3 dias, por exemplo, fazendo com que esse material possa ser utilizado como acelerador de resistência no uso conjunto com outras adições minerais.

Esse aumento de resistência nas idades iniciais do concreto é comprovado nos ensaios realizados por (TUAN *et al.*, 2011), onde os autores descobrem que a resistência à compressão de amostras com substituição total da sílica ativa por CCA é maior na idade de 3 dias, em comparação com amostras que utilizam a sílica ativa como aditivo mineral único.

Uma substituição de apenas 20% do cimento por CCA faz com que haja um notório aumento na resistência mecânica do concreto e uma grande diminuição de sua permeabilidade quando em contato com cloretos, sulfatos e outras substâncias (MEHTA, 1992).

Recentemente, muitos estudos têm sido empreendidos buscando os melhores teores de CCA na substituição do cimento em concretos de alto e ultra alto desempenho. (XU *et al.*, 2016) chegaram à conclusão de que o melhor teor de substituição seria de 15% e que, utilizando uma cinza com maior reatividade, os resultados poderiam ser superiores ao da sílica ativa. Em seus resultados de ensaios, Tuan *et al.* (2011) descobriram que teores de substituição de cimento por até 30% de CCA resultavam em resistências próximas as de concretos com sílica ativa.

Van *et al.* (2014) chegaram à conclusão de que, para uma mesma quantidade de água na mistura e dosagem de superplastificante, concretos com adição de CCA possuíam resistências à compressão equiparáveis aos concretos com sílica ativa. Além disso, o grande problema que a sílica ativa causava durante o processo de hidratação, a retração, é mitigado pela utilização da CCA como adição mineral na mistura.

Le *et al.* (2014) descobriram, em ensaios de penetração de íons de cloreto, que o desempenho de concretos com teores de 10% a 15% de CCA eram equiparáveis

com a utilização de 10% de sílica ativa e que os melhores resultados foram encontrados para uma substituição de 20% do cimento pela CCA. No que se refere ao melhor valor de resistência à compressão, os autores concluíram que, aos 28 dias, existe um valor ótimo de substituição de 10% a 20% de cimento pela CCA. Sensale (2010) descobriu que, utilizando valores de relação água/cimento de 0,5, 0,4 e 0,32, o teor de substituição de cimento por CCA que apresentou melhores resultados no que diz respeito à resistência à penetração de íons de cloreto foi de 15%. Huang *et al.* (2017), ao realizar ensaio de MIP, concluíram que a CCA promove um refinamento na estrutura de poros do concreto.

Além da melhora das resistências mecânicas e da durabilidade do concreto, a substituição de parte do cimento pela cinza da casca de arroz faz com que seja produzido menos dióxido de carbono, proveniente da produção de cimento. Além disso, o carbono remanescente na cinza e que iria certamente para a atmosfera passaria a ficar preso no concreto (CORDEIRO *et al.*, 2009).

## **2.6. Dosagem do concreto de alto desempenho**

A dosagem de concretos se refere ao conjunto de procedimentos que são realizados para se obter a melhor proporção entre os materiais que constituem o concreto. Também conhecida como o traço do material, a dosagem deve ser expressa em massa seca de materiais, porém, ela pode ser expressa em volume (ISAIA *et al.*, 2011). Ainda segundo os autores, pelo fato de o concreto de alto desempenho ser utilizado em peças estruturais de grande importância nas edificações e de sua produção englobar um maior número de materiais em comparação aos concretos convencionais, a dosagem desse material torna-se mais complexa. Além disso, existe a necessidade de se seguir um procedimento mais detalhado e cuidadoso.

Díaz (1998) afirma que as limitações tecnológicas que muitos países possuem na produção de concretos resultam em um consumo excessivo de cimento, fator esse que se reflete nos indicadores de produção e nas propriedades mecânicas desses indicadores. Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que uma das finalidades da dosagem é a obtenção de concretos com desempenhos que atendam aos requisitos estabelecidos previamente. Dentre esses requisitos, os autores afirmam que a trabalhabilidade no estado fresco e a resistência no estado endurecido em uma certa

idade são os mais importantes. Os autores ainda falam que outra propriedade importante e que é resultado direto da dosagem é a durabilidade, mas que esta está diretamente ligada ao atendimento das resistências estabelecidas.

Tutikian e Helene (2011) afirmam ainda que, além de se obter a mistura ideal, é necessário que se obtenha aquela mais econômica em uma determinada região e com os materiais ali disponíveis. Hoje em dia, o mercado da construção e as técnicas construtivas exigem a utilização de concretos especiais, tais como os de alta resistência, alto desempenho, autoadensável, concretos coloridos, brancos, duráveis, com agregados recicláveis, entre outros. Essa infinidade de ofertas de concretos está transformando a atividade de dosagem em uma atividade específica, complexa e dispendiosa.

Apesar de cada componente do concreto obedecer a parâmetros de aceitação definidos por normas, dificilmente haverá uma dosagem universal (AÏTCIN, 2000). Mehta e Monteiro (2008) recomendam que o CAD seja produzido em centrais dosadoras de concreto acompanhado pela realização de testes de laboratório, a fim de garantir resultados satisfatórios.

Uma das grandes questões que geram conflitos no atendimento da fluidez do concreto e da sua resistência é a quantidade de água na mistura, principalmente em concretos de alto desempenho, onde a baixa relação água/cimento é fator preponderante (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A adição de água no concreto fresco, mantendo-se o consumo de cimento, o tornará mais trabalhável, porém, terá consequência direta no decréscimo de sua resistência. Dessa forma, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o processo de dosagem pode ser entendido como a arte de balancear esses efeitos conflitantes.

#### 2.6.1. *Métodos de dosagem*

A maioria dos métodos de dosagem para CAD é caracterizada por baixas relações água/cimento, o uso de aditivos minerais tais como sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno, entre outras, e o uso de aditivos químicos, em especial os plastificantes ou superplastificantes (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O método para a dosagem do CAD não necessita preconizar altas resistências, porém, a proporção dos materiais deve ser tal que a permeabilidade do produto final seja tão baixa quanto a necessária para determinado uso. Considerando que a relação água/cimento desse material é baixa e existe a necessidade de se utilizar adições minerais e aditivos superplastificantes, os procedimentos para se determinar as proporções dos materiais na mistura são diferentes de concretos convencionais (LASKAR, 2011).

#### 2.6.2. *Método de Mehta & Aitcin*

Como foi utilizado na parte experimental dessa pesquisa, o método proposto por Mehta e Aitcin (1990) está apresentado de forma mais detalhada nesta dissertação. Trata-se de um método de fácil desenvolvimento e execução, devido, principalmente, à facilidade na definição do traço. É aconselhável a sua utilização quando se objetiva amostras com resistência à compressão na faixa entre 65 MPa e 120 MPa, sendo que, essa faixa é dividida em cinco graus de resistência: A, B, C, D e E. As resistências médias desses cinco graus são, respectivamente, 65, 75, 90, 105 e 120 MPa, como mostra a Tabela 2.

De acordo com o estudo realizado pelos autores desse método, além da divisão da faixa de resistência utilizada pelo método (65 a 120 MPa) em vários graus de resistência, algumas considerações gerais foram feitas para o desenvolvimento do procedimento:

- relação pasta de cimento/agregados na faixa de 35% a 65% por volume;
- com um volume de pasta de cimento de 35% e conhecidos os volumes de água e ar incorporado, o volume de material cimentício é calculado pela diferença;
- a proporção ótima de agregados na mistura é de 65% por volume. A relação volumétrica entre agregados miúdos e graúdos em uma primeira tentativa deve ser de 2:3 ( $0,26 m^3 : 0,39 m^3$ );
- a relação inversa entre quantidade de água e resistência do concreto pode ser explorada para predição e controle da resistência à compressão do material.

Após essas considerações, os autores apresentam o procedimento que deve ser utilizado para se chegar à massa dos materiais constituintes de  $1 m^3$  de concreto.

O passo a passo inclui: escolha da resistência, estimativa da quantidade de água, fração volumétrica dos componentes da pasta cimentícia, estimativa dos agregados, cálculo das massas totais, dosagem do superplastificante, correção na umidade e ajustes na dosagem.

Mehta e Aitcin, autores desse método, afirmam que, de acordo com o grau de resistência escolhido, a quantidade máxima de água na mistura varia de 120 a 160  $\text{kg}/\text{m}^3$  (Tabela 2). Quando se determinam as quantidades de superplastificante e a umidade nos agregados, a quantidade de água adicionada na mistura será calculada na etapa de correção da umidade.

**Tabela 2: Relação entre grau de resistência e o consumo de água.**

| Grau de Resistência | Resistência Média (MPa) | Consumo de Água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |
|---------------------|-------------------------|--|
| A                   | 65                      | 160  |
| B                   | 75                      | 150  |
| C                   | 90                      | 140  |
| D                   | 105                     | 130  |
| E                   | 120                     | 120  |

Fonte: (MEHTA; AITCIN 1990) (adaptado).

Após terem sido estimadas as frações volumétricas dos componentes na pasta de cimento ( $0,35 \text{ m}^3$ ) e nos agregados ( $0,65 \text{ m}^3$ ), as massas de cada componente são calculadas de acordo com suas massas específicas. É importante lembrar que o total de água inclui a água presente no aditivo superplastificante e a umidade presente nos agregados (MEHTA; AITCIN, 1990).

O método de dosagem em questão é muito bem comparável com a experiência, em campo e laboratorial, de muitos pesquisadores. Esse procedimento pode não ser perfeito, porém, é simples e fornece uma abordagem prática (MEHTA; AITCIN, 1990).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Enquadramento Metodológico

O enquadramento metodológico de uma pesquisa científica pode ser realizado de várias maneiras e depende principalmente do assunto abordado, dos objetivos do estudo e dos meios que serão utilizados para que os dados sejam alcançados (KAUARK *et al.*, 2010).

A pesquisa pode ser classificada de acordo com sua natureza (Básica e aplicada), abordagem (qualitativa e quantitativa), objetivo (exploratória, descritiva, e explicativa) e finalmente de acordo com os procedimentos técnicos utilizados (bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, *expost-facto*, ação e participante) (KAUARK *et al.*, 2010).

Do ponto de vista da sua natureza, esta pesquisa pode ser classificada como aplicada, uma vez que, tem como objetivo a geração de conhecimento para uma aplicação prática com foco na solução de problemas específicos. A aplicação prática é a produção de concreto de alto desempenho com a inserção de um resíduo agrícola em sua mistura e o problema específico é a influência dessa inserção nas propriedades finais do concreto.

Com relação à forma de abordagem, o mais correto seria classificar este estudo como quantitativo, porém, sem deixar de considerar que ele analisa aspectos qualitativos e semiquantitativos em algumas situações. A classificação principal é quantitativa, pois as propriedades são analisadas quase sempre na forma de números e gráficos, valendo-se de recursos estatísticos para o tratamento dos dados.

Do ponto de vista de seus objetivos, pode ser classificada principalmente como explicativa, já que identifica os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos e para a avaliação da influência da utilização do resíduo nas propriedades do concreto. Esta pesquisa busca explicar a razão dos resultados encontrados de forma experimental pelos pesquisadores ao se alterar as variáveis.

Finalmente, com relação aos procedimentos técnicos, esta investigação pode ser considerada como bibliográfica e experimental. A parte bibliográfica deste estudo busca conhecer o estado da arte do tema tratado e os conceitos mais importantes que devem ser explorados. A parte experimental determina um objeto de estudo, analisa as variáveis que podem influenciá-lo e as formas de controle e observação dos efeitos dessas variáveis no objeto. Para a discussão dos resultados foram selecionados artigos publicados nos últimos 10 anos em revistas reconhecidas cientificamente. A seleção dos artigos foi feita de acordo com a metodologia ProKnow-C (ENSSLIN, 2010) e está detalhada por (REAL *et al.*, 2017).

## 3.2. Materiais

### 3.2.1. Cimento

O cimento utilizado na fabricação do concreto foi o CP V ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial) da empresa Lafarge/Holcim. A escolha desse cimento para esta pesquisa se baseia no fato de ele representar um cimento mais puro, mais indicado quando se pretende estudar os efeitos das adições minerais incluídas na mistura. Além disso, a maior parte das propriedades analisadas foram aos 28 dias de idade, havendo assim a necessidade de um cimento que proporcione ao concreto uma alta resistência inicial.

A análise química do cimento, fornecida pelo fabricante Lafarge/Holcim, está apresentada na Tabela 3. Nesta composição química, pode-se perceber a presença dos 4 principais óxidos desse material:  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ .

**Tabela 3: Análise química do cimento utilizado.**

| Análise Química - Cimento CP V ARI |               |                   |
|------------------------------------|---------------|-------------------|
| Composição Química                 | Norma         | Teor em Massa (%) |
| $SiO_2$                            | NBR 14656     | 18,93             |
| $Al_2O_3$                          | NBR 14656     | 5,23              |
| $Fe_2O_3$                          | NBR 14656     | 2,94              |
| $CaO$                              | NBR 14656     | 64,16             |
| $MgO$                              | NBR 14656     | 0,74              |
| $SO_3$                             | NBR 14656     | 2,87              |
| $CO_2$                             | NBR NM 20     | 2,9               |
| $K_2O$                             | NBR 14656     | 0,87              |
| $C_3A$                             | Equação Bogue | 7,81              |
| P.F. 500°C                         | IT Holcim     | 0,74              |
| P.F. 1000°C                        | NBR NM 18     | 3,84              |
| Resíduo Insolúvel                  | NBR NM 15     | 0,9               |

Fonte: Fabricante (adaptado).

### 3.2.2. Agregados

O agregado miúdo utilizado na mistura é a areia quartzosa de rio de granulação média, peneirada na peneira com abertura de 3 mm. O agregado graúdo utilizado na mistura é a brita 0 de gnaiss. Antes de ser utilizado, o agregado graúdo foi passado pela peneira de 1,18 mm para retirada dos finos.

### 3.2.3. Cinza da Casca de Arroz

A CCA utilizada nesta pesquisa é a *Silcca Nobre* da empresa *Pilecco Nobre*, proveniente de combustão controlada (Figura 2).

**Figura 2: Cinza da casca de arroz industrializada.**



Fonte: Arquivo pessoal.

### 3.2.4. Aditivos Químicos

Foram utilizados dois tipos de aditivos químicos na produção do CAD, sendo um aditivo plastificante para o estudo piloto e um superplastificante para o estudo final. O aditivo superplastificante é o *Fluxer PC 3505*, à base de policarboxilatos e com foco em corte de água e alta resistência inicial. O aditivo plastificante é o *Plastofluid PAV 139*, à base de policarboxilatos e outras matérias primas secundárias e que proporciona alta resistência inicial e boa trabalhabilidade. Ambos os aditivos foram fornecidos pela empresa *ERCA* e podem ser observados na Figura 3.

**Figura 3: Aditivos químicos (plastificante à esq. e superplastificante à dir.).**



Fonte: Arquivo pessoal.

As características dos dois aditivos, fornecidas pelo fabricante, podem ser visualizadas na Tabela 4.

**Tabela 4: Características dos aditivos químicos.**

| <b>Tipo</b>        | <b>Aditivo</b>      | <b>Dosagem sugerida (%)</b> | <b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|--------------------|---------------------|-----------------------------|--|
| Plastificante      | PlastoFluid PAV 139 | 0,4 a 0,8                   | 1,05 a 1,09                                |
| Superplastificante | Fluxer PC 3505      | 0,6 a 1,0                   | 1,07 a 1,11                                |

Fonte: Fabricante ERCA (adaptado).

### 3.2.5. Água

Foi utilizada água do laboratório do departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG, da linha de abastecimento da COPASA de Belo Horizonte - MG.

### 3.3. Métodos

Foi utilizado como método de dosagem dos corpos de prova de CAD para as misturas do estudo final (traços TrefS, T10S, T15S e T20S) o proposto por Mehta & Aïtcin (1990). Essa escolha foi feita devido a sua facilidade de aplicação e devido à bibliografia referente a esse método, que é mais completa e acessível. Para o estudo piloto (traços TrefP, T10P, T15P e T20P) foi utilizado o mesmo método, porém, adaptado para o uso de aditivo plastificante, ao invés do superplastificante, e com um consumo de água maior.

Dentre os cinco graus de resistência que o método apresenta, foi escolhido o grau A, de 65 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Essa escolha foi realizada por dois motivos. O primeiro motivo é que representa uma resistência alta, porém, a menor na faixa que o método cobre. O segundo é que nesse grau existe a possibilidade de não se utilizar adição mineral na mistura.

Para o estudo piloto, foram moldados corpos de prova utilizando quatro traços diferentes. O primeiro sem a utilização de adição mineral, o segundo com a substituição de 10% do cimento por CCA, o terceiro com a utilização de 15% da adição, e o quarto com a substituição de 20% do cimento por CCA. Essas porcentagens foram aplicadas sobre a massa de cimento utilizado no primeiro traço. Como aditivo químico, foi utilizado um plastificante.

No estudo final foram produzidos outros quatro traços, com os mesmos teores de substituição do cimento pela CCA. Nessa etapa, foi utilizado um aditivo superplastificante e o consumo de água proposto pelo método de dosagem, ou seja,

menor do que o utilizado no estudo piloto. A proporção de materiais cimentícios dos oito traços produzidos nessa pesquisa está resumida na Tabela 5.

**Tabela 5: Proporções em massa entre os materiais cimentícios.**

| Estudo | Traço | Cimento (%) | Cinza da casca de arroz (%) | Aditivo químico    |
|--------|-------|-------------|-----------------------------|--------------------|
| Piloto | TrefP | 100         | -                           | Plastificante      |
|        | T10P  | 90          | 10                          |                    |
|        | T15P  | 85          | 15                          |                    |
|        | T20P  | 80          | 20                          |                    |
| Final  | TrefS | 100         | -                           | Superplastificante |
|        | T10S  | 90          | 10                          |                    |
|        | T15S  | 85          | 15                          |                    |
|        | T20S  | 80          | 20                          |                    |

Fonte: Autor.

O aditivo químico plastificante utilizado foi o Plastofluid PAV 139, de baixo retardo. Já o aditivo superplastificante utilizado foi o Fluxer PC 3505, de última geração e com propriedades mais elevadas. Na mudança de aditivos, de plastificante para superplastificante, houve uma diminuição na relação água/cimento, com a intenção de melhorar as propriedades do concreto no estado endurecido.

Nos quatro primeiros traços (TrefP, T10P, T15P e T20P), foram executados ensaios de abatimento de tronco de cone, resistência à compressão axial aos 28 dias e módulo de elasticidade, também aos 28 dias. Nos quatro últimos (TrefS, T10S, T15S e T20S), foram executados ensaios de abatimento de tronco de cone, módulo de elasticidade aos 28 dias, compressão axial aos 28 e aos 90 dias. Foram também empreendidos nos traços TrefS, T10S, T15S e T20S, ensaios indicativos de durabilidade, tais como absorção de água por imersão e capilaridade (28 dias) e adsorção de nitrogênio (B.E.T.). Para cada traço da pesquisa, foram moldadas as quantidades necessárias de corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm<sup>2</sup>). Para o ensaio de B.E.T. não houve a necessidade de moldar CPs, pois foram utilizados fragmentos daqueles já rompidos por compressão axial.

### 3.3.1. Caracterização dos constituintes da mistura

#### 3.3.1.1. Cinza da casca de arroz

Os seguintes ensaios foram realizados para a caracterização físico-química da CCA:

- Difração de Raios X (DRX);
- Fluorescência de Raios X (FRX);
- Espectroscopia no Infravermelho (FTIR);
- Perda ao Fogo (NBR NM 18);
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Difração a Laser;
- Picnometria de Hélio;
- Adsorção de Nitrogênio (B.E.T.).

O ensaio de Difração de Raios X (DRX) foi realizado para a determinação da composição mineralógica da estrutura cristalina da CCA. A análise do resultado desse ensaio permite avaliar se a cinza possui uma estrutura cristalina ou amorfa e ainda permite identificar os cristais que, por ventura, estejam presentes nessa composição. O DRX foi realizado no Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG com o Difratorômetro Raios X Shimadzu MAXima XRD-7000. Os parâmetros utilizados para o teste foram os seguintes: min de  $5^{\circ}$ , max de  $80^{\circ}$ , step de 0,02, velocidade de  $1^{\circ}/\text{min}$ , tensão de 40 V, corrente de 30 A e comprimento de onda  $2\theta$ .

A análise química da CCA foi realizada utilizando os ensaios de espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX), Espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) e perda ao fogo. O ensaio semiquantitativo de FRX foi realizado no laboratório de Controle de Processos e Medição de Partículas do Instituto SENAI de Inovação em Processamento Mineral em Belo Horizonte, com o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX) Shimadzu EDX 720. Para esse ensaio, a cinza foi prensada para que ficasse na forma de pastilha. O resultado dessa análise permite ao pesquisador conhecer a composição química do material, identificando a presença e a proporção de compostos, tais como,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ , entre outros.

O ensaio de FTIR foi realizado no Departamento de Química do CEFET-MG e os dados resultantes foram referentes a dois tipos de gráficos: absorvância *versus* comprimento de onda e transmitância *versus* comprimento de onda. A análise dos picos presentes nesses gráficos e a comparação desses picos com a bibliografia existente permitem a identificação dos compostos químicos do material, tais como,  $SiO_2$  e  $SiOH$ .

O ensaio de perda ao fogo foi realizado segundo a NBR NM 18, no laboratório de análise química do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG. O ensaio consiste basicamente na queima da amostra em forno mufla à temperatura de  $950 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante 50 minutos. O objetivo do ensaio foi descobrir a porcentagem de carbono na cinza, uma vez que, em adições minerais, a massa perdida nessa faixa de temperatura corresponde à massa de matéria orgânica na forma de carbono.

Utilizando o recurso de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi possível investigar, por meio de análise visual, a estrutura e a geometria da CCA. O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG, com o microscópio eletrônico de mesa TM3000 da *Hitachi*.

A granulometria da CCA foi analisada por meio do ensaio de Difração a Laser utilizando o equipamento *CILAS Particle Size Analyzer 1090* do laboratório de análise química do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG. O ensaio foi realizado por via úmida e, além do banho ultrassônico de 60 segundo do próprio aparelho, a amostra foi submetida a um banho ultrassônico externo, de 400 segundos, com o objetivo de melhorar a dispersão das partículas.

A massa específica da adição mineral foi obtida por meio do ensaio de Picnometria com gás hélio, utilizando o equipamento *Quantachrome Multipycnometer* do Laboratório de análises térmicas do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG. O procedimento do ensaio foi realizado 20 vezes, até que os resultados apresentassem uma maior estabilidade.

A área superficial da CCA foi obtida com a realização do ensaio de BET, que utiliza o princípio da adsorção de partículas de Nitrogênio. O equipamento utilizado foi o NOVA 2200e da *Quantachrome Instruments*, no laboratório de análises térmicas do Departamento de Engenharia Civil. O mesmo ensaio foi utilizado em fragmentos dos CPs de concreto para a avaliação da porosidade do concreto.

#### 3.3.1.2. Agregados

Para a caracterização física dos agregados foram realizados os seguintes ensaios:

- Composição Granulométrica (NBR NM 248:2003);
- Absorção de água, massa específica seca, saturada e aparente, para o agregado graúdo (NBR NM 53:2009);
- Massa específica seca para o agregado miúdo (NBR 9776:1987)
- Massa unitária e volume de vazios (NBR NM 45:2006);
- Abrasão "Los Angeles" para o agregado graúdo (NBR NM 51:2001);

A análise granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram utilizadas peneiras com vibração mecânica durante 5 minutos e, após o tempo estipulado, foram pesadas as quantidades de amostras retidas em cada peneira. Os resultados obtidos representam a média de duas amostras de cada material. Para o agregado graúdo, foram utilizados 3 kg para cada amostra e para o agregado miúdo, 500 g para cada amostra.

Os ensaios de massa específica, na condição seca e saturada, massa específica aparente e absorção de água, para o agregado graúdo, foram realizados em conformidade com a norma NBR NM 53 (ABNT, 2009). Foram ensaiadas duas amostras e o resultado é a média dos resultados dos ensaios. Para que pudessem ser verificadas as massas, seca e saturada, o material ficou submerso durante 24 h e depois em estufa durante outras 24 h a uma temperatura de 110 °C. Para que a massa em água pudesse ser verificada, as amostras foram pesadas em um cesto de arame imerso em água.

O ensaio de massa específica seca do agregado miúdo foi realizado de acordo com a norma NBR 9776 (ABNT, 1987), em sua versão corrigida de 1988. Essa norma utiliza o método do Frasco de Chapman para se determinar o volume real ocupado pelos grão de areia. Foram ensaiadas duas amostras de 500 g do material e o resultado é a média dos resultados dos ensaios. Para que o material fosse pesado seco, ele permaneceu em estufa durante 24 h, à temperatura de 110 °C ± 5° C.

A determinação da massa unitária (densidade a granel) e do índice de volume de vazios dos agregados foi realizada em concordância com o "método C" da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), método esse que utiliza o material em seu estado solto, sem compactação. Para a realização do ensaio as amostras foram secas em estufa durante 24 h à temperatura de 110 °C ± 5° C. O ensaio do agregado graúdo foi

realizado à temperatura ambiente de 27,25 °C e do agregado miúdo, 25,65 °C. Nessa temperaturas ambientes, a massa específica da água é de 996,44  $kg/m^3$  e 996,87  $kg/m^3$ , respectivamente, conforme a mesma norma.

A determinação do desgaste superficial do agregado graúdo pelo método de abrasão “Los Angeles” foi realizada de acordo com os procedimentos da norma NBR NM 51 (ABNT, 2001), em uma amostra de 5 kg do material. Foi utilizado o equipamento de abrasão do Laboratório de Tecnologia dos Pavimentos e de Ferrovias do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG.

#### 3.3.1.3. Aditivo químico

Para se determinar o teor de aditivo químico superplastificante que seria utilizado na dosagem do traço referência (traço TrefS) no estudo final, foi realizado o ensaio de índice de consistência em argamassa, normatizado pela NBR 13276 (ABNT, 2016). O ensaio utiliza uma mesa de abatimento conhecida como “Flow Table”. Foram testados teores de 0,6% a 1,0%, valores que correspondem à faixa de uso indicada pelo fabricante.

O aditivo plastificante, utilizado nos quatro primeiros traços, não foi caracterizado quanto ao teor de saturação, pois optou-se por seu uso no maior teor especificado pelo fabricante, 0,8% para o traço referência (traço TrefP).

#### 3.3.2. *Dosagem*

O método de dosagem utilizado para as quatro últimas misturas (traços TrefS, T10S, T15S e T20S) foi o proposto por Mehta e Aitcin (1990). Uma adaptação desse método foi utilizada no desenvolvimento das quatro primeiras misturas (traços TrefP, T10P, T15P e T20P). Para o estudo final, foi escolhida a “faixa A” do método, cuja resistência prevista é de 65 MPa. O volume total do concreto foi dividido em 35% para a pasta cimentícia e 65% para os agregados, e a relação volumétrica entre agregados miúdos e graúdos é de 2:3 (0,26  $m^3$  : 0,39  $m^3$ ). O consumo de materiais por metro cúbico e a quantidade de materiais necessária para a produção dos CPs, nos oito traços estudados, estão apresentadas nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6: Consumo de materiais por m<sup>3</sup>.

| Traço | Teor de substituição em massa | Cimento (kg) | Cinza da casca de arroz (kg) | Água total (kg) | Agregado graúdo (kg) | Agregado miúdo (kg) | a/c  |
|-------|-------------------------------|--------------|------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|------|
| TrefP | 0%                            | 416,2        | -                            |                 |                      |                     |      |
| T10P  | 10%                           | 374,6        | 41,6                         | 190             | 1040                 | 670                 | 0,46 |
| T15P  | 15%                           | 353,8        | 62,4                         |                 |                      |                     |      |
| T20P  | 20%                           | 333,0        | 83,2                         |                 |                      |                     |      |
| TrefS | 0%                            | 416,2        | -                            |                 |                      |                     |      |
| T10S  | 10%                           | 374,6        | 41,6                         | 160             | 1040                 | 670                 | 0,38 |
| T15S  | 15%                           | 353,8        | 62,4                         |                 |                      |                     |      |
| T20S  | 20%                           | 333,0        | 83,2                         |                 |                      |                     |      |

Fonte: Autor.

Tabela 7: Quantidades de materiais para a produção dos CPs.

| Traço | Cimento (kg) | Cinza da casca de arroz (kg) | Água total (kg) | Agregado graúdo (kg) | Agregado miúdo (kg) | Plast. (g) | Superplast. (g) | Nº de Cps |
|-------|--------------|------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|------------|-----------------|-----------|
| TrefP | 7,82         | 0                            |                 |                      |                     | 62,6       |                 |           |
| T10P  | 7,04         | 0,78                         | 3,57            | 19,55                | 12,60               | 66,5       | -               | 10        |
| T15P  | 6,65         | 1,17                         |                 |                      |                     | 70,4       |                 |           |
| T20P  | 6,26         | 1,56                         |                 |                      |                     | 74,3       |                 |           |
| TrefS | 17,07        | 0,0                          |                 |                      |                     |            |                 |           |
| T10S  | 15,36        | 1,71                         | 6,56            | 42,64                | 27,47               | -          | 119,5           | 23        |
| T15S  | 14,51        | 2,56                         |                 |                      |                     |            |                 |           |
| T20S  | 13,65        | 3,41                         |                 |                      |                     |            |                 |           |

Fonte: Autor.

A Tabela 8 apresenta qual o teor de substituição em volume do cimento pela CCA correspondente para cada teor de substituição em massa. Para esse cálculo, foram levadas em conta as diferenças de densidade entre os dois materiais.

Tabela 8: Substituição volumétrica correspondente.

| Traço | Substituição em massa | Substituição correspondente em volume |
|-------|-----------------------|---------------------------------------|
| TrefP | 0%                    | 0%                                    |
| T10P  | 10%                   | 13,8%                                 |
| T15P  | 15%                   | 20,6%                                 |
| T20P  | 20%                   | 27,5%                                 |
| TrefS | 0%                    | 0%                                    |
| T10S  | 10%                   | 13,8%                                 |
| T15S  | 15%                   | 20,6%                                 |
| T20S  | 20%                   | 27,5%                                 |

Fonte: Autor.

### 3.3.3. *Análise do concreto no estado fresco*

Para a análise do concreto no estado fresco (trabalhabilidade) foi executado, em todas as misturas, o ensaio de Abatimento do tronco de cone. O método utilizado para a determinação do abatimento foi o *Slump Test*, normatizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), onde uma massa de concreto é inserida dentro de uma forma tronco-cônica, em três camadas igualmente adensadas, cada uma com 25 golpes. Posteriormente o molde é lentamente retirado, levantando-o verticalmente, e então é feita a leitura da diferença entre a altura do molde e a altura da massa de concreto depois de assentada.

### 3.3.4. *Análise do concreto no estado endurecido*

O comportamento do concreto em seu estado endurecido foi avaliado por meio da realização dos seguintes ensaios:

- resistência à Compressão Axial (NBR 5739:2007);
- módulo de elasticidade (NBR 8522:2008);
- absorção de água por Imersão (NBR 9778:2009);
- absorção de água por Capilaridade (NBR 9779:2013);
- adsorção de Nitrogênio (B.E.T).

#### 3.3.4.1. Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

O ensaio de resistência à compressão axial consiste na determinação da carga máxima de ruptura suportada pelo CP, que nesse caso foi realizado nas idades de 28 e 90 dias do concreto. As faces de contato dos CPs com os pratos da prensa foram capeadas com enxofre, a fim de evitar uma resposta de carga de ruptura não condizente com a carga real. O ensaio foi realizado como prescreve a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando a prensa hidráulica de EMIC do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG, que atende aos valores máximos admissíveis pela NBR NM ISO 7500-1 (ABNT, 2016).

O comportamento tensão versus deformação foi obtido com o emprego de extensômetros elétricos para a medição dos deslocamentos longitudinais. O módulo de elasticidade foi calculado como prescreve a norma NBR 8522 (ABNT, 2008) e o

ensaio, realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG.

#### 3.3.4.2. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão consiste na determinação da absorção da água em CPs de concreto, conforme NBR 9778 (ABNT, 2009). Os aparelhos utilizados incluem a balança hidrostática, estufa e recipiente para imersão da amostra. Os seguintes procedimentos foram executados:

- secagem da amostra em estufa na temperatura de 100°C a 110°C por 3 dias;
- resfriamento ao ar até a temperatura ambiente e determinação da massa;
- imersão da amostra em água e manutenção da mesma saturada durante 72h nessa condição;
- secagem da superfície da amostra
- determinação da massa da amostra imersa em água após a saturação utilizando a balança hidrostática.

Os resultados foram calculados por meio da equação 1 e a média dos CPs, obtida:

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

- $M_{sat}$  é a massa do CP saturado [g];
- $M_s$  é a massa do CP seco em estufa [g].

#### 3.3.4.3. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade tem por objetivo a determinação da absorção de água, através da ascensão capilar, em CPs de concreto endurecidos. Os CPs foram mantidos em contato com a água em um nível constante e foi averiguada a massa de água absorvida por cada CP nos intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h após o início do ensaio. Além disso, foi realizado o rompimento dos CPs através do ensaio de tração por compressão diametral, a fim de poder-se analisar a distribuição de água na estrutura interna ao final das 72h. A aparelhagem utilizada, conforme descrito na NBR 9779 (ABNT, 2013), foi:

- estufa com dimensões apropriadas com capacidade de manter a temperatura de  $(105 \pm 5)$  °C;
- recipiente com dimensões apropriadas para acomodação dos CPs e capaz de mantê-los suspensos;
- balança com resolução igual a 0,025% da massa do CPs.

O cálculo da absorção, segundo a NBR 9779:2013, é dado pela Equação 2:

$$C = \frac{M_{sat} - M_s}{S} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

- C é absorção de água por capilaridade [g/cm<sup>2</sup>];
- M<sub>sat</sub> é massa do CP durante um período de tempo especificado [g];
- M<sub>s</sub> é a massa do CP seco em estufa [g];
- S é a área da seção transversal do CP [cm<sup>2</sup>].

#### 3.3.4.4. Adsorção de nitrogênio (B.E.T)

Nessa pesquisa, o método B.E.T. foi utilizado para avaliar a área superficial da cinza da casca de arroz e a estrutura de poros (porosidade) da matriz cimentícia de amostras de concreto de alto desempenho. Segundo Teixeira *et al.* (2001), o fenômeno de condensação capilar, utilizado pelo método, auxilia na determinação da distribuição do tamanho de poros através da equação de Kelvin:

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -(2\gamma M_v \cos \theta / RT r_m) \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

- P = pressão crítica de condensação;
- $\gamma$  = tensão superficial do líquido;
- M<sub>v</sub> = volume molar do adsorvato;
- $\theta$  = ângulo de contato entre o sólido e a fase condensada;
- r<sub>m</sub> = raio de curvatura médio do menisco do líquido.

Os valores de raio dos poros (r<sub>k</sub>) podem ser convertidos a partir dos valores do raio de curvatura médio do menisco líquido (r<sub>m</sub>), utilizando o cosseno do ângulo de contato entre o sólido e a fase condensada ( $\theta$ ).

O equipamento utilizado para o ensaio de adsorção de nitrogênio foi o NOVA 2200e da *Quantachrome Instruments*, no laboratório de análises térmicas do Departamento de Engenharia Civil.

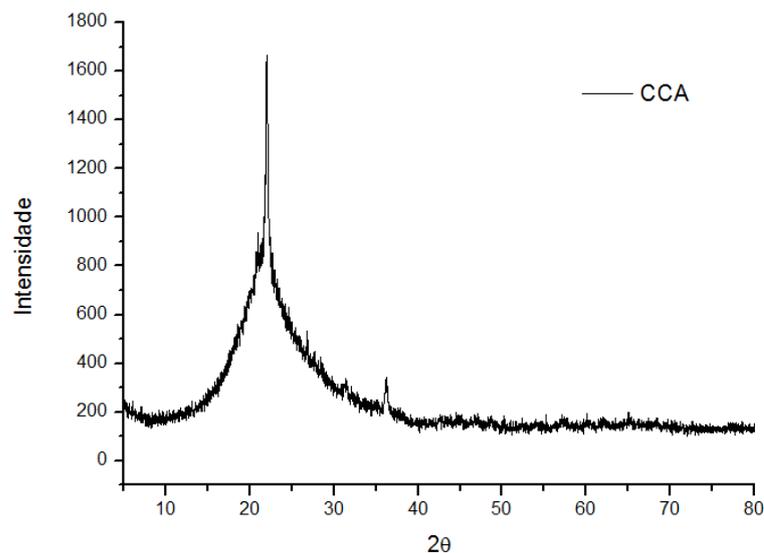
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Caracterização dos Constituintes da Mistura

#### 4.1.1. Cinza da casca de arroz

O espectro de difração de Raios X da CCA, apresentado na Figura 4, não apresenta, em sua grande maioria, picos muito bem definidos, característica de um material com estrutura mineral interna amorfa. O resultado desse ensaio já era esperado pelo autor, uma vez que a estrutura interna não cristalina da adição mineral é um dos fatores que sugerem a alta reatividade do material. O pico que está bem definido no espectro, entre os ângulos de  $20^\circ$  e  $25^\circ$ , é referente à ocorrência de sílica sob a forma de  $\alpha$ -cristobalita (CORDEIRO, 2006). Em estudos anteriores, Cordeiro (2006) e Collatto *et al.* (2011) obtiveram resultados semelhantes, ao estudarem a mesma adição mineral.

Figura 4: Difratoograma de Raios X da CCA.



Fonte: Resultado de ensaio.

A composição química da CCA (Tabela 9), obtida pela análise semiquantitativa de FRX, destaca a presença predominante de dióxido de silício (cerca de 90%). Resultados semelhantes foram encontrados por Collatto *et al.* (2011) que analisaram

a mesma CCA utilizada nesse estudo. Essa análise sugere que os teores de  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  e  $SiO_2$ , quando somados, estão acima de 70%, limite inferior da classificação de materiais pozolânicos da norma NBR 12653 (ABNT, 2014).

**Tabela 9: Composição química da CCA por FRX semiquantitativa.**

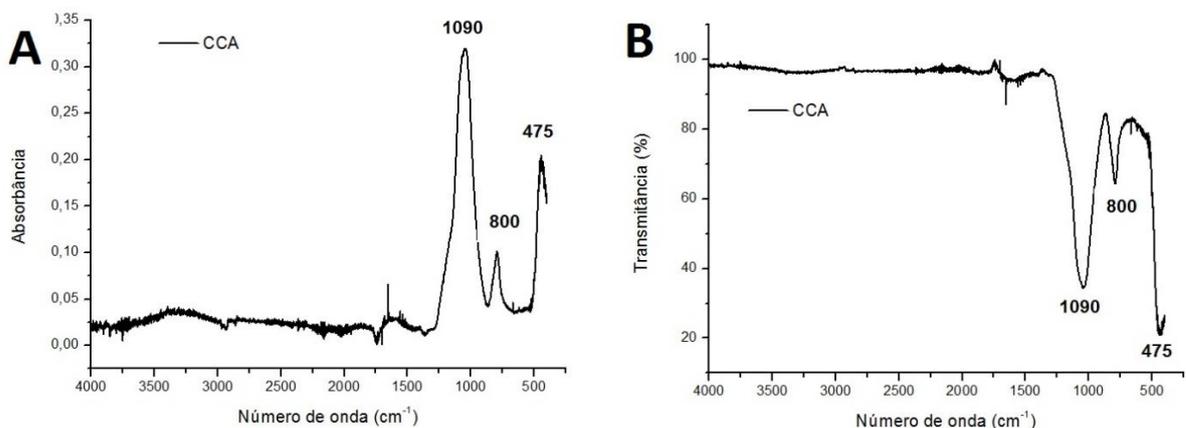
| Composição Química | Teor em Massa (%) |
|--------------------|-------------------|
| $SiO_2$            | Cerca de 90%      |
| $Al_2O_3$          | 1% - 10%          |
| $K_2O$             | 1% - 10%          |
| $CaO$              | Menor que 1%      |
| $P_2O_5$           | Menor que 1%      |
| $MnO$              | Menor que 1%      |
| $Fe_2O_3$          | Menor que 1%      |
| $ZnO$              | Menor que 1%      |

Fonte: Resultado de ensaio.

Com relação ao ensaio de perda ao fogo, o resultado obtido foi uma diminuição na massa da amostra de 10,4%. Esse valor sugere que a CCA utilizada tem um elevado teor de carbono em sua composição, uma vez que se encontra um pouco acima do limite superior da classificação de materiais pozolânicos da norma NBR 12653 (ABNT, 2014), que é de 10% no ensaio de perda ao fogo. Segundo Priya *et al.* (2017), adições minerais com alto teor de carbono provocam efeitos adversos na trabalhabilidade e na resistência do concreto.

A presença significativa do dióxido de silício pode ser confirmada por meio dos gráficos resultantes da análise química utilizando a técnica de Espectroscopia na região do infravermelho (FTIR), como apresentado a Figura 5.

**Figura 5: Gráficos de absorvância (A) e transmitância (B) de ensaio de FTIR.**

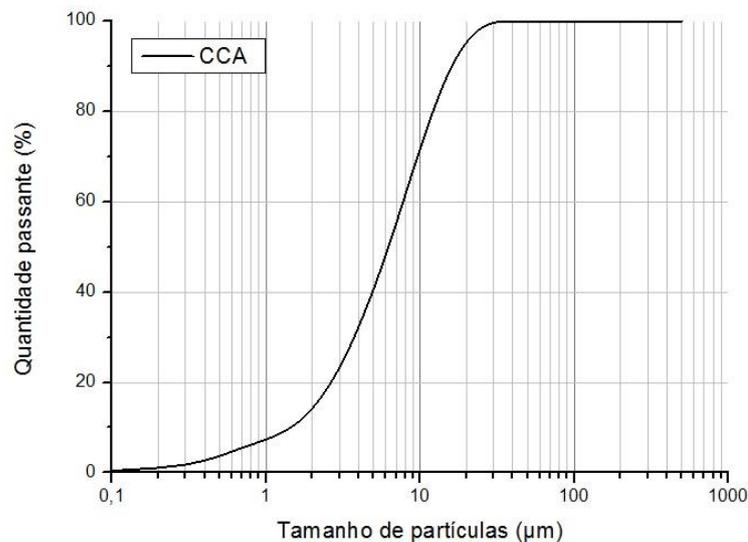


Fonte: Resultado de ensaio.

Segundo a literatura existente, as bandas presentes nos comprimentos de onda 1090 e 800  $cm^{-1}$  são referentes a ligação O-Si-O. Existe ainda a banda presente no comprimento de onda 475  $cm^{-1}$ , referente à vibração angular de deformação da ligação Si-O-Si. (CHANDRASEKHAR; PRAMADA, 2006; TASHIMA, 2006; COSTA *et al.*, 1997; MANIQUE, 2011).

A distribuição de tamanho de grãos do material é bem variada, com partículas maiores que 10  $\mu m$  e menores que 1  $\mu m$ , como pode ser visualizado na curva granulométrica resultante do ensaio de difração a laser (Figura 6). O diâmetro médio de partículas encontrado foi de 7,7  $\mu m$ , inferior ao diâmetro de 14,1  $\mu m$  encontrado por Collatto *et al.* (2001), que analisou a mesma CCA utilizada neste estudo. Uma provável justificativa para essa diferença de resultados é a possibilidade de os autores do estudo anterior não terem utilizado o banho ultrassônico externo de 400 segundos que foi utilizado no presente estudo e que ajuda a dispersar as partículas do material.

**Figura 6: Curva granulométrica da CCA do ensaio de difração a laser.**



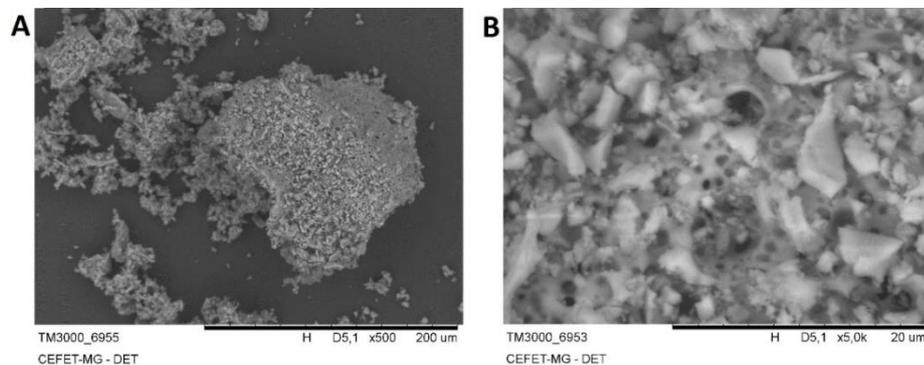
Fonte: Resultado de ensaio.

A massa específica da CCA, resultado de ensaio de picnometria de He, e sua área superficial específica, resultado de ensaio de BET, foram, respectivamente, 2.161  $Kg/m^3$  e 21.150  $m^2/Kg$ . Para efeito de comparação, foram realizados os mesmos ensaios no cimento CP-V ARI utilizado nessa pesquisa e os resultados de massa específica e área superficial específica foram, respectivamente, 2.973  $Kg/m^3$  e 473  $m^2/Kg$ . Enquanto a CCA apresentou massa específica inferior à do cimento, sua área superficial específica é cerca de 40 vezes maior que a do cimento.

As massas específicas dos dois materiais foram utilizadas no cálculo dos teores de substituição volumétrica do cimento pela CCA correspondentes aos teores de substituição em massa, como já apresentado na Tabela 8 do item 3.3.2.

A Figura 7, proveniente do ensaio de MEV, retrata a morfologia da CCA. Observa-se que, mesmo após a moagem realizada pelo fabricante, as partículas continuam angulares (TUAN *et al.*, 2011). Além disso, é visível que os grãos apresentam uma estrutura celular e porosa, resultado da remoção dos constituintes orgânicos da casca de arroz. Sua estrutura porosa é responsável pela grande área superficial específica da cinza (CORDEIRO *et al.*, 2009).

**Figura 7: Morfologia da CCA por MEV. Zoom de 500x (A) e 5.000x (B).**

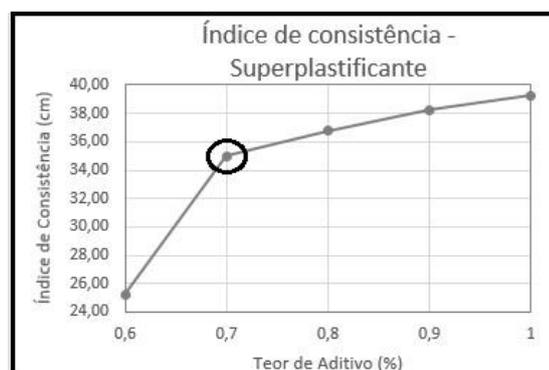


Fonte: Resultado de ensaio.

#### 4.1.2. Aditivo químico

O teor de superplastificante que proporcionou maior aumento no índice de consistência com relação ao anterior foi de 0,7% da massa do material cimentício, como apresentado na Figura 8. Dessa forma, esse teor foi utilizado no traço referência do estudo final (traço TrefS).

**Figura 8: Teor de saturação para o aditivo químico.**



Fonte: Resultado de ensaio.

#### 4.1.3. Agregados

As características físicas do agregado graúdo, provenientes dos ensaios realizados, estão resumidas na Tabela 10. A massa específica seca foi utilizada na dosagem do concreto, uma vez que o material utilizado na produção dos corpos de prova foi seco em estufa durante 24 h. O desgaste superficial da brita pelo ensaio de abrasão “Los Angeles” foi de 23,2%.

**Tabela 10: Características físicas da brita.**

| <b>Característica física</b>                   | <b>Valor</b> |
|--|--------------|
| Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> )     | 2670         |
| Massa específica saturada (kg/m <sup>3</sup> ) | 2630         |
| Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> ) | 2610         |
| Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )            | 1475,8       |
| Absorção de água (%)                           | 0,8          |
| Índice de vazios (%)                           | 44,7         |
| Desgaste superficial (%)                       | 23,2         |

Fonte: Resultado de ensaio.

As características físicas do agregado miúdo, obtidas por meio dos ensaios realizados, estão resumidas na Tabela 11. Assim como na brita, a massa específica seca foi utilizada na dosagem do concreto.

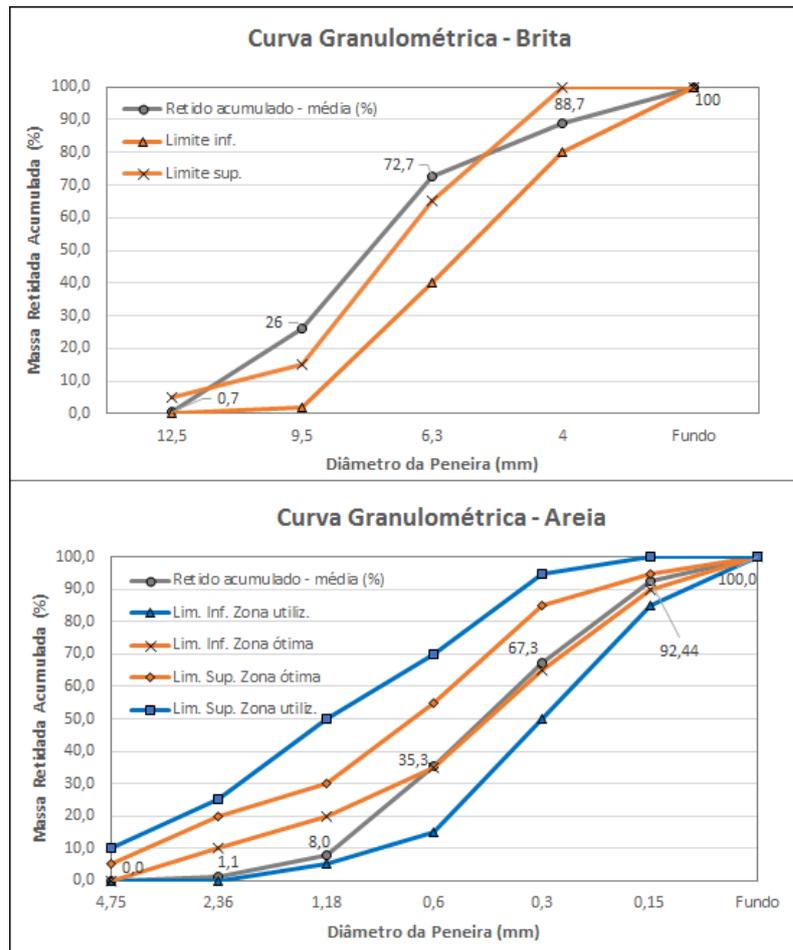
**Tabela 11: Características físicas da areia.**

| <b>Característica física</b>               | <b>Valor</b> |
|--|--------------|
| Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> ) | 2580         |
| Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )        | 1393,7       |
| Índice de vazios (%)                       | 46,0         |

Fonte: Resultado de ensaio.

A distribuição de tamanhos dos grãos de ambos os agregados pode ser visualizada na Figura 9. O diâmetro máximo característico da brita é de 12,5 mm e o da areia é 2,36 mm. O módulo de finura da brita é 1,15 e o da areia é 2,04. As curvas granulométricas apresentam também os limites de distribuição granulométrica especificados pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 9: Curvas granulométricas dos agregados graúdo e miúdo.



Fonte: Resultado de ensaio.

## 4.2. Resultados dos ensaios no concreto

### 4.2.1. Abatimento do tronco de cone

Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone para as oito misturas estudadas estão apresentados na Tabela 12:

Tabela 12: Resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone.

| Traço | Teor de CCA (%) | Relação a/c | Abatimento (mm) |
|-------|-----------------|-------------|-----------------|
| TrefP | 0               | 0,46        | 20              |
| T10P  | 10              |             | 10              |
| T15P  | 15              |             | 10              |
| T20P  | 20              |             | 5               |
| TrefS | 0               | 0,38        | 260             |
| T10S  | 10              |             | 60              |
| T15S  | 15              |             | 45              |
| T20S  | 20              |             | 35              |

Fonte: Resultados de ensaios.

O ensaio de abatimento de tronco de cone apresentou valores menores nos quatro primeiros traços, em que foi utilizado um aditivo químico de menor eficiência. Nota-se que com a troca de aditivos, de plastificante para superplastificante, houve um aumento na trabalhabilidade, mesmo com a diminuição do consumo de água. Essa diferença na trabalhabilidade do concreto pode ser percebida na Figura 10, onde estão apresentados os abatimentos dos traços T10P e T10S, que utilizam o mesmo teor de CCA.

**Figura 10: Abatimento do tronco de cone dos traços T10P (esquerda) e T10S (direita).**



Fonte: Arquivo pessoal.

Tanto nas quatro primeiras misturas, quanto nas quatro últimas, nota-se que o acréscimo no teor de utilização da CCA proporcionou ao concreto uma redução na sua trabalhabilidade em seu estado fresco. Nos traços TrefP e T20P, o valor do abatimento caiu de 20 mm para 5 mm e, nos traços TrefS e T20S, caiu de 260 mm para 35 mm. Essa diminuição no valor do *slump* ocorre devido à alta área superficial específica da cinza e ao seu elevado teor de carbono (CORDEIRO *et al.*, 2009).

Segundo Cordeiro *et al.* (2009), que obtiveram o mesmo decréscimo de abatimento em seus estudos, é necessário que se aumente ainda mais a dosagem do aditivo químico para se alcançar as mesmas consistências em todos os traços. Xu *et al.* (2016) também obtiveram um decréscimo na trabalhabilidade e fluidez de concretos de alto desempenho, conforme o acréscimo de CCA. Os autores concluíram que a inclusão dessas partículas muito finas na mistura aumenta a demanda de água por modificar a distribuição de tamanhos de partículas (XU *et al.*, 2016; HUANG *et al.*, 2017).

Após os procedimentos de moldagem e adensamento em mesa vibratória, o adensamento do material foi considerado satisfatório. Mesmo apresentando baixos valores de abatimento em quase todos os traços, Os CPs não tiveram grandes falhas na superfície.

#### 4.2.2. Resistência à compressão axial

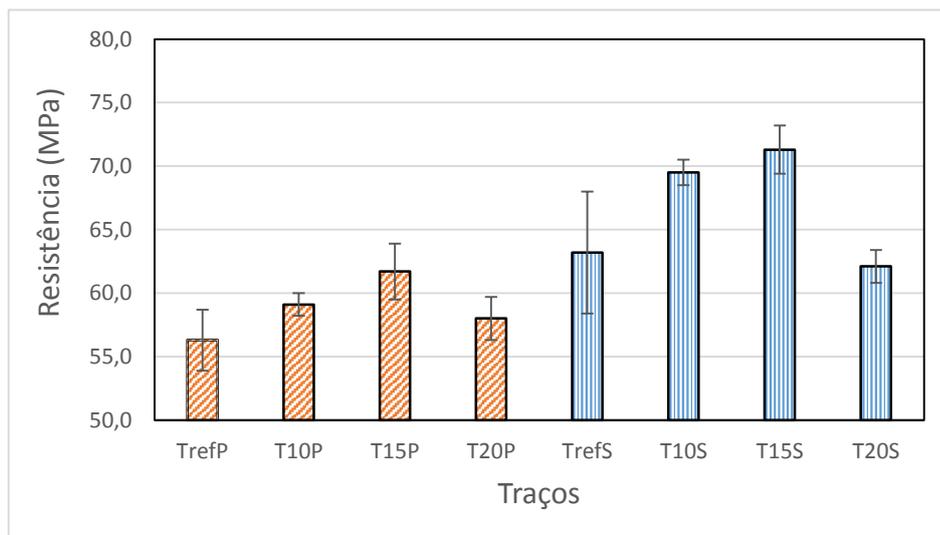
Os resultados para o ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias para as oito misturas estudadas, estão apresentados na Tabela 13 e na Figura 11.

**Tabela 13: Resultado de resistência à compressão axial aos 28 dias.**

| Traço | Teor de CCA (%) | Relação a/c | 28 dias     |             |
|-------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
|       |                 |             | Média (MPa) | D. P. (MPa) |
| TrefP | 0               | 0,46        | 56,3        | 2,4         |
| T10P  | 10              |             | 59,1        | 0,9         |
| T15P  | 15              |             | 61,7        | 2,2         |
| T20P  | 20              |             | 58,0        | 1,7         |
| TrefS | 0               | 0,38        | 63,2        | 4,8         |
| T10S  | 10              |             | 69,5        | 1,0         |
| T15S  | 15              |             | 71,3        | 1,9         |
| T20S  | 20              |             | 62,1        | 1,3         |

Fonte: Resultados de ensaios.

**Figura 11: Resultado de resistência à compressão axial aos 28 dias.**



Fonte: Resultados de ensaios.

Pode-se notar que, com exceção do traço T20S, a utilização da CCA em substituição parcial ao cimento resultou em um ganho de resistência do concreto, tanto

nos quatro primeiros traços, quanto nos quatro últimos. Os traços T15P e T15S, que possuem teor de substituição em massa de 15% (20,6% em volume), apresentaram as maiores resistências dentre as misturas com relação a/c de 0,46 e 0,38, respectivamente. Além disso, é notável também que o comportamento dos quatro últimos traços é equivalente ao dos quatro primeiros, no que diz respeito ao acréscimo ou decréscimo de resistência. Ou seja, as resistências mecânicas aumentaram nos dois traços seguintes aos de referência e nos últimos (T20P e T20S) tiveram uma queda.

O efeito do uso do superplastificante em conjunto com o decréscimo de água na mistura pode ser notado ao se analisar os dois traços referência (TrefP e TrefS), onde a resistência aumentou em cerca de 12%. O efeito do uso da CCA pode ser notado na comparação entre os traços TrefP e T15P e entre os traços TrefS e T15S, onde as resistências aumentaram cerca de 10% e 13%, respectivamente. Observa-se ainda o efeito da troca de aditivos químicos e do uso da CCA ao se comparar as resistências dos traços TrefP e T15S, onde o aumento foi de quase 27%.

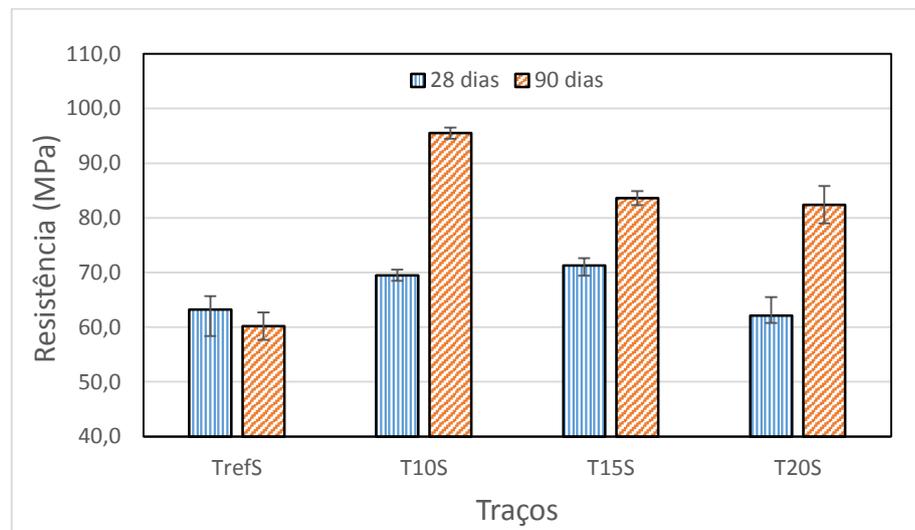
Esse aumento na resistência à compressão axial do CAD também foi encontrado por Cordeiro *et al.* (2009), Van Tuan *et al.* (2011), Xu *et al.* (2016) e HUANG *et al.* (2017) que utilizaram a CCA como adição mineral em substituição parcial ao cimento. Ao utilizar os mesmos teores de utilização da CCA, Le *et al.* (2014) obtiveram também resistências mecânicas maiores do que a mistura referência e concluíram que existe um teor ótimo de substituição em massa do cimento pela cinza em ter 10% e 20%. Segundo os autores, o efeito positivo da CCA na resistência mecânica do concreto acontece devido à sua elevada superfície específica e a sua alta pozolonicidade, que permite à cinza interagir de forma intensa com a água e o hidróxido de cálcio, produzindo composto adicionais de C-S-H (LE *et al.*, 2014).

A Tabela 14 apresenta o resultado para o ensaio de resistência à compressão axial realizado na idade de 90 dias para as misturas com relação a/c de 0,38. A Figura 12 ilustra a variação das resistências nas duas idades ensaiadas para os mesmos traços.

**Tabela 14: Resultado de resistência à compressão axial aos 90 dias.**

| Traço | Teor de CCA (%) | Relação a/c | 90 dias     |             |
|-------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
|       |                 |             | Média (MPa) | D. P. (MPa) |
| TrefS | 0               | 0,38        | 60,2        | 2,5         |
| T10S  | 10              |             | 95,5        | 1,0         |
| T15S  | 15              |             | 83,6        | 1,3         |
| T20S  | 20              |             | 82,4        | 3,4         |

Fonte: Resultados de ensaios.

**Figura 12: Resultado de resistência à compressão axial aos 28 e 90 dias.**

Fonte: Resultados de ensaios.

Pode-se notar que o traço referência apresentou resultados para resistência aos 28 e 90 dias muito próximos, dentro do desvio padrão. Em contrapartida, todos os traços que utilizam a CCA em sua composição (T10S, T15S e T20S) apresentaram ganhos consideráveis de resistência entre as duas idades, respectivamente 38%, 17% e 32%. Estudos anteriores corroboram o efeito positivo da CCA na resistência à compressão do concreto em idades mais avançadas (CORDEIRO *et al.*, 2009; TUAN *et al.*, 2011; LE *et al.*, 2012). Em um estudo recente e utilizando a mesma CCA usada nesta pesquisa, Batista (2016) avaliou o efeito da cinza em idades avançadas e também encontrou acréscimos significativos de resistência, inclusive aos 180 dias.

Se aos 28 dias os traços T10S e T15S apresentaram resistências muito próximas, dentro do desvio padrão, aos 90 dias essa diferença foi muito mais acentuada. Nessa idade, porém, o teor de substituição do cimento pela cinza que proporcionou melhor resistência ao concreto foi de 10% em massa (13,8% em volume). Xu *et al.* (2016) também obtiveram aos 90 dias, como melhor teor de

utilização da CCA, o valor de 10% em massa. Os autores dizem que esses resultados sugerem que a contribuição da CCA para o ganho de resistência em idades avançadas é devido à sua reação com o hidróxido de cálcio liberado do processo de hidratação do cimento (XU *et al.*, 2016).

Uma avaliação importante de se fazer é relacionar a resistência alcançada no concreto e o consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto em cada traço do estudo final, para se observar a contribuição de cada kg de cimento na resistência do concreto. A Tabela 15 apresenta essa relação para a idade de 90 dias. Percebe-se que, com a utilização da CCA em substituição parcial ao cimento, o acréscimo de resistência por kg de cimento é maior, mesmo quando houve decréscimo na resistência.

**Tabela 15: Relação entre resistência do concreto e consumo de cimento aos 90 dias**

| Traço | Consumo de cimento (kg) | Resistência (MPa) | Resistência / kg de cimento (MPa/kg) |
|-------|-------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| TrefS | 416,2                   | 60,2              | 0,14                                 |
| T10S  | 374,6                   | 95,5              | 0,25                                 |
| T15S  | 353,8                   | 83,6              | 0,24                                 |
| T20S  | 333,0                   | 82,4              | 0,25                                 |

Fonte: Resultados de ensaios.

#### 4.2.3. Módulo de elasticidade

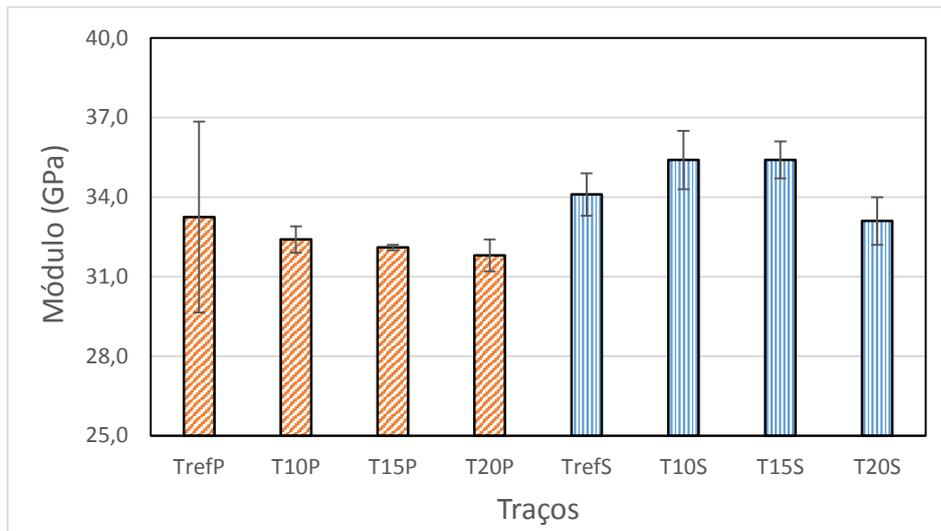
Os resultados para o ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias para as oito misturas estudadas, estão apresentados na Tabela 16 e ilustrados na Figura 13.

**Tabela 16: Resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias.**

| Traço | teor de CCA (%) | Relação a/c | Módulo de elasticidade (GPa) |             |
|-------|-----------------|-------------|------------------------------|-------------|
|       |                 |             | Média (GPa)                  | D. P. (GPa) |
| TrefP | 0               | 0,46        | 33,3                         | 3,6         |
| T10P  | 10              |             | 32,4                         | 0,5         |
| T15P  | 15              |             | 32,1                         | 0,1         |
| T20P  | 20              |             | 31,8                         | 0,6         |
| TrefS | 0               | 0,38        | 34,1                         | 0,8         |
| T10S  | 10              |             | 35,4                         | 1,1         |
| T15S  | 15              |             | 35,4                         | 0,7         |
| T20S  | 20              |             | 33,1                         | 0,9         |

Fonte: Resultados de ensaios.

**Figura 13: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias.**



Fonte: Resultados de ensaios.

Observa-se que, quando o consumo de água foi superior, houve um decréscimo nos valores de módulo de elasticidade, não condizente com o aumento de resistência nos resultados de compressão axial. Porém, a variação entre um traço e outro foi muito pequena e os valores de desvio padrão elevados, fazendo com que os resultados dessas misturas se apresentassem pouco conclusivos quanto a essa propriedade. Cordeiro *et al.* (2009) também encontraram valores muito próximos nos resultados de ensaio de módulo de elasticidade, ao analisar a influência da CCA nas propriedades do CAD.

Em contrapartida, quando o consumo de água foi inferior, o comportamento do módulo de elasticidade foi semelhante ao da resistência à compressão, mesmo se observando os desvios padrões. Nota-se que as misturas que apresentaram maiores valores de módulo de elasticidade foram T10S e T15S, com teores de substituição em massa de 10% e 15% (13,8% e 20,6% em volume), respectivamente. Um comportamento semelhante entre módulo de elasticidade e resistência à compressão axial também foi encontrado por Salas *et al.* (2009), ao analisar a influência de dois tipos diferentes de CCA nas propriedades mecânicas do CAD. Os autores descobriram que os traços em que foram utilizados os dois tipos de cinza tiveram valores de módulo maiores do que o traço referência (SALAS *et al.*, 2009).

#### 4.2.4. Absorção de água por imersão e capilaridade

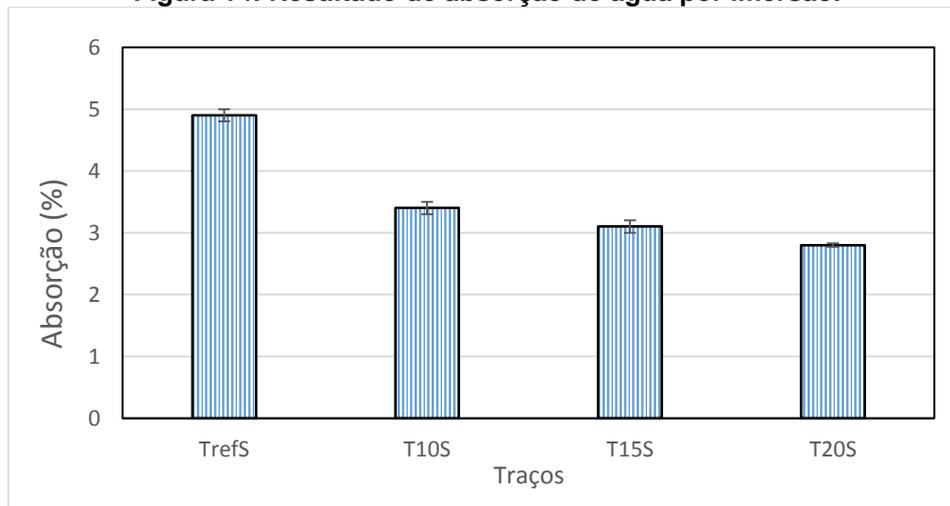
Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão, na idade de 28 dias, estão apresentados na Tabela 17 e na Figura 14.

**Tabela 17: Resultados de absorção por imersão.**

| Traço | teor de CCA (%) | Absorção por imersão |           |
|-------|-----------------|----------------------|-----------|
|       |                 | Média (%)            | D. P. (%) |
| TrefS | 0               | 4,9                  | 0,1       |
| T10S  | 10              | 3,4                  | 0,1       |
| T15S  | 15              | 3,1                  | 0,1       |
| T20S  | 20              | 2,8                  | 0,03      |

Fonte: Resultados de ensaios.

**Figura 14: Resultado de absorção de água por imersão.**



Fonte: Resultados de ensaios.

Como era esperado, a utilização da CCA no concreto fez com que as taxas de absorção de água do material diminuíssem de tal modo que o traço que apresentou a menor absorção foi o T20S, com substituição em massa de 20% (27,5% em volume) do cimento pela CCA. Uma redução na absorção de água por imersão com a utilização da CCA também foi alcançada por Salas *et al.* (2009), que estudaram dois tipos diferentes da cinza na produção de CAD.

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias, estão apresentados na Tabela 18 e na Figura 15, que apresentam os resultados nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas após o início de contato com a água. A Tabela 17

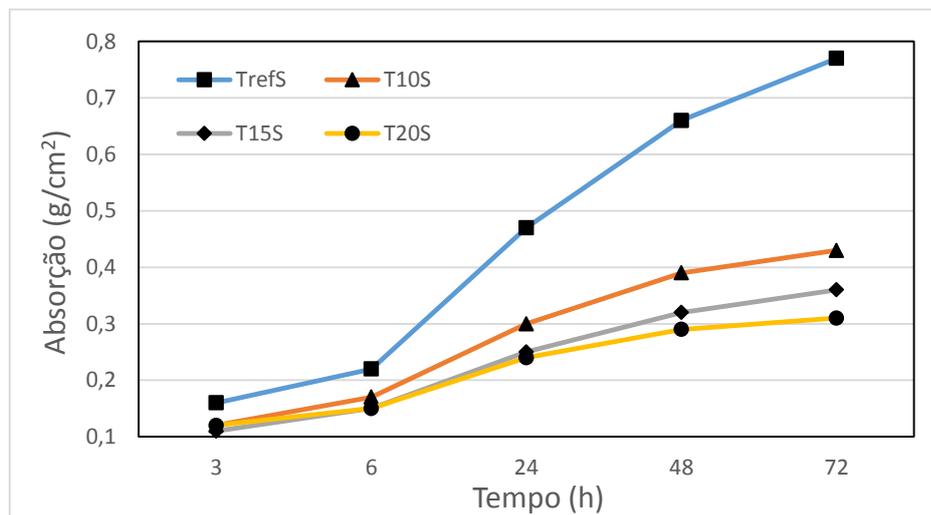
apresenta ainda a altura de ascensão capilar da água após o rompimento dos CPs por compressão diametral ao fim do ensaio.

**Tabela 18: Resultado de absorção por capilaridade.**

| Traço | Absorção por capilaridade ( $g/cm^2$ ) |      |      |      |      |             |            |
|-------|--|------|------|------|------|-------------|------------|
|       | 3h                                     | 6h   | 24h  | 48h  | 72h  | Altura (cm) | D. P. (cm) |
| TrefS | 0,16                                   | 0,22 | 0,47 | 0,66 | 0,77 | 7,3         | 0,1        |
| T10S  | 0,12                                   | 0,17 | 0,30 | 0,39 | 0,43 | 4,4         | 0,1        |
| T15S  | 0,11                                   | 0,15 | 0,25 | 0,32 | 0,36 | 3,5         | 0,2        |
| T20S  | 0,12                                   | 0,15 | 0,24 | 0,29 | 0,31 | 3,4         | 0,1        |

Fonte: Resultados de ensaios.

**Figura 15: Resultado de absorção por capilaridade.**



Fonte: Resultados de ensaios.

A ascensão capilar da água no interior dos CPs de concreto, pode ser explicada pelo princípio físico do fenômeno da capilaridade. A capilaridade ocorre quando as forças de adesão superam as forças de coesão de determinado fluido e fazem com que os mesmos ascendam pelas paredes de um recipiente (GASPAR, 2005). Segundo o autor, se o espaço entre as paredes for muito pequeno, como por exemplo em tubos capilares, o fluido pode subir a alturas consideráveis. Da mesma forma que os tubos capilares, a microestrutura de poros do concreto também promove o fenômeno de capilaridade, ainda mais com a conexão entre esses poros.

Assim como no ensaio de absorção por imersão, os resultados de absorção por capilaridade mostram que, conforme o acréscimo de teor de CCA, menores são as taxas de absorção de água. A altura de ascensão capilar também seguiu essa

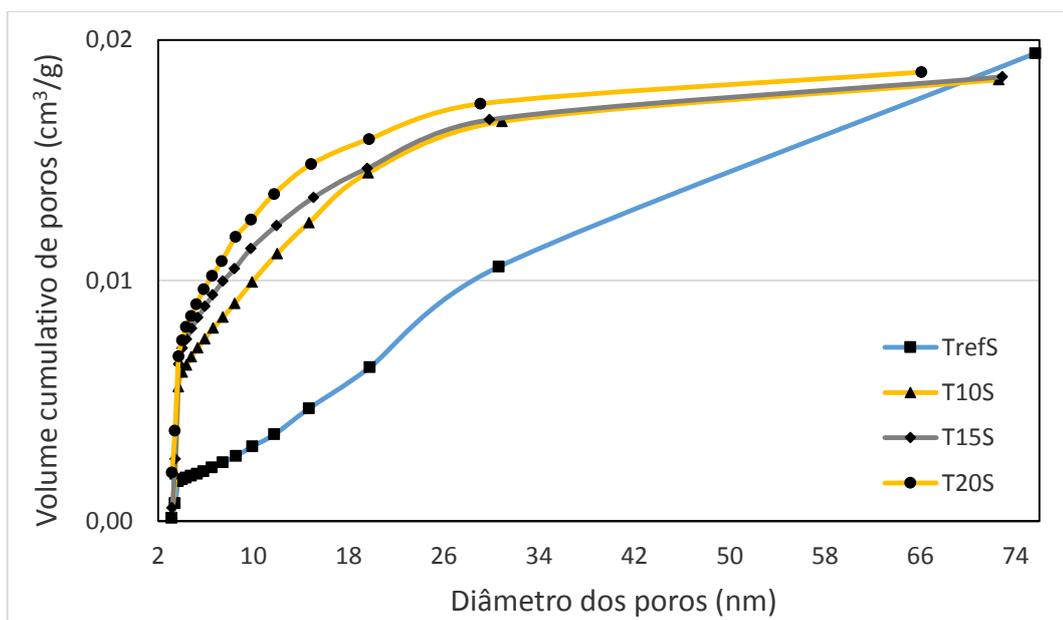
tendência, uma vez que a mistura que apresentou menor ascensão de água foi a que tem em sua composição o maior teor de utilização da cinza. É notável também que, com o passar do tempo de ensaio, as diferenças de absorção entre um traço e outro aumentaram.

O refinamento dos poros e a menor conexão entre eles, resultados alcançados com a incorporação da CCA como adição mineral na mistura, são os principais responsáveis pela diminuição da absorção de água, tanto por imersão, quanto por capilaridade. Os baixos valores totais de absorção de água são parâmetros indicadores de elevada durabilidade do concreto produzido (SALAS *et al.*, 2009). Segundo Neville (2015), a absorção de água não pode ser utilizada como medida de durabilidade do concreto, mas é sabido que os concretos considerados duráveis devem apresentar absorção menor do que 10% em massa. Os ensaios de absorção apresentam-se, dessa forma, apenas como um indicativo de durabilidade, havendo a necessidade da realização de outros ensaios mais específicos para essa avaliação.

#### 4.2.5. Adsorção de nitrogênio (B.E.T)

O volume cumulativo de poros, para a faixa que o ensaios abrange, dos traços TrefS, T10S, T15S e T20S foram 0,20, 0,18, 0,18 e 0,19  $cm^3/g$ , respectivamente. A distribuição de tamanhos de poros está ilustrada na Figura 16.

Figura 16: Resultado do ensaio de B.E.T:



Fonte: Resultados de ensaios.

Segundo Gregg e Sing (1982), os poros do concreto podem ser classificados, de acordo com seu tamanho, em microporos (diâmetro menor que 2 nm), mesoporos (diâmetro entre 2 nm e 50 nm) e macroporos (diâmetro maior que 50 nm). Dessa forma, a distribuição de tamanhos de poros resultantes do ensaio de B.E.T. está situada, em sua maior parte, na faixa de mesoporos do material e a discussão dos resultados é restrita a essa faixa.

O volume cumulativo de mesoporos do traço referência é superior, embora bem próximo, dos volumes de poros dos traços subsequentes, que tem em sua composição a adição mineral. Porém, analisando as curvas de distribuição de tamanhos de poros ficou claro o efeito que a adição da CCA tem sobre a estrutura de poros do concreto. Percebe-se que houve um refinamento nos tamanhos dos poros nas misturas com a adição, uma vez que as curvas dessas misturas apresentam um crescimento mais acentuado na região de diâmetros menores. Já a curva do traço referência tem o seu crescimento mais uniforme, chegando a ultrapassar as demais no final, justificando o maior volume acumulado de poros ( $0,20 \text{ cm}^3/\text{g}$ ).

Batista (2016), ao analisar a porosidade de concretos utilizando a mesma CCA usada neste estudo, também encontrou um refinamento na distribuição dos tamanhos dos poros em comparação com o traço referência. O autor empreendeu o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio para isso.

## **5. Conclusões**

### **5.1. Considerações finais**

A caracterização físico-química da CCA, realizada anteriormente à produção do CAD, mostrou que o resíduo apresentou características adequadas para a sua aplicação como adição mineral em concretos, apesar de ter um elevado teor de carbono. A CCA possui dimensões muito menores que as do cimento, elevada área superficial específica, baixa massa específica e estrutura interna majoritariamente amorfa (reativa). Com relação à sua morfologia, as partículas são angulares, com estrutura celular e porosa. Além disso, a grande presença de dióxido de silício em sua composição química e a alta reatividade confirmam o potencial pozolânico do material.

Após a caracterização dos materiais, iniciaram-se os testes no concreto, avaliando os efeitos de cada teor de utilização da cinza em suas propriedades finais. Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone no concreto em seu estado fresco indicam que a adição da CCA aumenta a demanda de água na mistura, diminuindo assim a sua trabalhabilidade. A elevada área superficial específica da cinza parece ser a grande responsável por essa maior necessidade de água. Porém, isso não resultou em falhas no processo de adensamento e moldagem dos CPs.

A introdução da cinza resultou também no aumento de resistência à compressão do concreto em quase todos os traços ensaiados, independentemente do consumo de água e do aditivo químico utilizado. Desde os 28 dias de idade os resultados indicavam esse aumento, porém, foi aos 90 dias que essa variação se mostrou mais acentuada, atestando que a ação da adição mineral acontece de forma mais significativa em idades mais avançadas. O teor de substituição em massa do cimento pela CCA que apresentou maior resistência mecânica foi de 10% (13,8% em volume), aumentando a resistência em relação ao traço referência em cerca de 63% aos 90 dias de idade.

É preciso ressaltar também que a resistência de 65 MPa objetivada inicialmente para os traços do estudo final aos 28 dias, de acordo com a faixa “A” do método de dosagem, foi alcançada logo no primeiro traço em que se utilizou CCA no estudo final (T10S). Essa resistência foi superada nos traços seguintes em que se aumentou o teor de cinza.

Ao se analisar os resultados dos ensaios indicativos de durabilidade do CAD, pôde-se concluir também que a utilização da CCA aumenta a durabilidade do concreto, uma vez que, diminui as taxas de absorção de água e refina a distribuição de tamanhos de poros da estrutura. Em ambos os ensaios de absorção de água, por imersão e por capilaridade, a diminuição da absorção foi progressiva, conforme o aumento do teor de utilização da cinza. O traço com a máxima quantidade do resíduo estudada, 20% em massa, apresentou a maior redução nas taxas de absorção, cerca de 40% e 50% para imersão e capilaridade, respectivamente. O ensaio de adsorção de Nitrogênio (B.E.T) indicou que a ação da adição mineral não está na redução do volume total de poros, mas sim na distribuição dos seus tamanhos, que se tornou mais refinada, com mais poros menores e menos poros maiores.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para uma caracterização mais ampla do resíduo que será utilizado como adição mineral, a sugestão para trabalhos futuros é de que se realize ensaios mais específicos de atividade pozolânica como o Chapelle modificado (ABNT NBR 15895/2010) e os métodos de análise térmica como a termogravimetria, por exemplo. Esses métodos poderiam analisar quantitativamente a reatividade e o potencial pozolânico da adição mineral.

Sugere-se também que se investigue o processo de hidratação do cimento em uma microestrutura tão densa como é a do CAD, principalmente em idades mais avançada. É preciso entender melhor como funciona os mecanismos de reação das pozolanas com o hidróxido de cálcio liberado tardiamente no processo de hidratação, aumentando a resistência do concreto.

Para um melhor entendimento da influência da CCA na durabilidade do CAD e corroborar os resultados apresentados neste estudo, sugere-se que sejam realizados em trabalhos futuros ensaios de carbonatação acelerada e porosidade por intrusão de mercúrio. Sugere-se ainda a utilização conjunta de mais de uma adição mineral, como por exemplo a CCA e a microssílica, com a intenção de otimizar a substituição do cimento pelos resíduos disponíveis em cada localidade.

Como sugestão final, indica-se o estudo do CAD em situações de aumento excessivo de temperatura, como em caso de incêndio por exemplo, em que a microestrutura mais densa do material permite o acúmulo de poropressão e pode resultar em lascamentos explosivos de camadas do material. Existem maneiras de coibir a ocorrência desse fenômeno que podem ser avaliadas em trabalhos futuros.

## 6. REFERÊNCIAS

ABBAS, A.; CARCASSES, M.; OLLIVIER, J.-P. Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. **Materials and Structures**, v. 32, n. 1, p. 3-8, 1999.

ABNT. **NBR NM 18 Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro: ABNT 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45 Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 51 Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Ángeles".** Rio de Janeiro: ABNT 2001.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM ISO 7500-1 Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração e verificação do sistema de medição da força.** Rio de Janeiro: ABNT 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211 Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522 Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776 Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro: ABNT 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653 Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro: ABNT 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 15895: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado.** Rio de Janeiro: ABNT 2010.

AİTCIN, P.-C. Developments in the application of high-performance concretes. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 1, p. 13-17, 1995.

\_\_\_\_\_. **Concreto de alto desempenho**. PINI, 2000. 695 ISBN 85-7266-123-9.

AİTCIN, P. C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4–5, p. 409-420, 5// 2003.

ALSADEY, S. Effect of Superplasticizers on fresh and hardened porperties of concrete. **Journal of Agricultural Science and Engineering**, v. 1, n. 2, p. 70 - 74, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201 Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 5, p. 544-82, 1991.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993/05/01 1993.

ASTM, C. C 1202–2012 Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration. **American Society for Testing and Materials, USA**, 2012.

BATISTA, A. D. B. **Efeitos de resíduos agroindustriais na resistência mecânica, porosidade e permeabilidade de argamassas e concretos**. dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, CEFET-MG, 2016.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**: IBRACON, v.1, 2011. cap. 6, p.185-231.

BEAUDOIN, J. J.; MARCHAND, J. Pore Structure. In: (Ed.). **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques and applications**: ELSEVIER, 2000. cap. 14, p.528 - 628. ISBN 0815517386.

BENHELAL, E. et al. Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 142-161, 2013.

CHANDRASEKHAR, S. et al. Microsilica from rice husk as a possible substitute for condensed silica fume for high performance concrete. **Journal of Materials Science Letters**, v. 21, n. 35, p. 1245-1247, 2002.

CHANDRASEKHAR, S.; PRAMADA, P. N. Rice husk ash as an adsorbent for methylene blue effect of ashing temperature. **Adsorption**, v. 12, n. 1, p. 27, 2006.

CIMENTO.ORG. Cimento no mundo. 2014. Disponível em: < <http://cimento.org/cimento-no-mundo/> >. Acesso em: 18/10/2016.

COLLATTO, D. et al. Utilização da cinza da casca de arroz na produção de concreto usinado em central. 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011. Florianópolis - SC. IBRACON.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto, Rio de Janeiro, 2006.** 2006. Tese (Doutorado) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro

CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 104, p. 983-992, 2009.

COSTA, T. M. H. et al. Infrared and thermogravimetric study of high pressure consolidation in alkoxide silica gel powders. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 220, n. 2, p. 195-201, 1997.

DAFICO, D. D. A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz.** 2001. (Ph.D). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

DE LARRARD, F. Concrete optimisation with regard to packing density and rheology. 3rd RILEM International Symposium on Rheology of Cement Suspensions such as Fresh concrete, 2009. p.8p.

DÍAZ, V. O. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho.** PINI, 1998. ISBN 85-7266-090-9.

ENSSLIN, L., et al. (2010) **ProKnow-C, Knowledge Development Process Constructivist.** Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brazil.

GASPAR, Alberto. **Física - Série brasil.** 1ª ed. Editora Atica. São Paulo, 2005.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 234, p. 1675-1683, 2008.

GHODDOUSI, P.; JAVID, A. A. S.; SOBHANI, J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 102-109, 2/28/ 2014.

GREGG, S. J.; SING, K. S. W.; **Adsorption, Surface Area and Porosity;** Academic Press; London, 1982

HARTMANN, C. et al. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia;** IBRACON, v.1, 2011. cap. 10, p.345-380.

HUANG, H. et al. Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 621-628, 9/15/ 2017.

ISAIA, G. C. A evolução do concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**: IBRACON, v.1, 2011. cap. 1, p.1 - 55.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 273, p. 69-76, 2003.

ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**: IBRACON, v.2, 2011. cap. 36, p.1283 - 1326.

JALAL, M. et al. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 94, n. 9, p. 90-104, 2015.

JOHN, V. M. Concreto Sustentável. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**: IBRACON, v.2, 2011. cap. 50, p.1843-1869.

KAUARK, F. D. S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa: Um guia prático**. Itabuna - BA: Via Litterarum, 2010. 88 p.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 270-277, 6/30/ 2014.

LASKAR, A. I. Mix design of high-performance concrete. **Materials Research**, v. 14, n. 4, p. 429-433, 2011.

LASKAR, A. I.; KUMAR, R.; BHATTACHARJEE, B. Some aspects of evaluation of concrete through mercury intrusion porosimetry. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 1, p. 93-105, 1997.

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, n. 4, p. 156-166, 2016.

LE, H. T.; NGUYEN, S. T.; LUDWIG, H.-M. A Study on High Performance Fine-Grained Concrete Containing Rice Husk Ash. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 8, n. 7, p. 301-307, Dec 2014.

Le, H. T., Siewert, K., Ludwig, H.-M. (2012). Synergistic effects of rice husk ash and fly ash on properties of selfcompacting high performance concrete. In **Proceedings of symposium on Ultra high performance concrete and Nanotechnology for High performance construction materials**, Kassel, Germany, 187–195

LOHTIA, R. P.; JOSHI, R. C. 10 - Mineral Admixtures A2 - Ramachandran, V.S. In: (Ed.). **Concrete Admixtures Handbook (Second Edition)**. Park Ridge, NJ: William Andrew Publishing, 1996. p.657-739. ISBN 978-0-8155-1373-5.

MA, H. Mercury intrusion porosimetry in concrete technology: tips in measurement, pore structure parameter acquisition and application. **Journal of porous materials**, v. 21, n. 2, p. 207-215, 2014.

MAILVAGANAM, N. P.; RIXOM, M. **Chemical admixtures for concrete**. CRC Press, 2002. ISBN 0203017242.

MARRIAGA, J. L.; YÉPEZ, L. G. L. Effect of silica fume addition on the chloride-related transport properties of high-performance concrete. **DYNA**, v. 79, p. 105-110, 2012.

MASSAZZA, F. Pozzolanic cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 15, n. 4, p. 185-214, 1993/01/01 1993.

MEDEIROS, M. H. F. D.; ANDRADE, J. J. D. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**: IBRACON, v.1, 2011. cap. 22, p.773-807.

MEHTA, P. K. Rice Hush Ash-A unique supplementary cementing material. **Advances in concrete technology**, 1992.

MEHTA, P. K.; AİTCIN, P.-C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, concrete and aggregates**, v. 12, n. 2, p. 70-78, 1990.

MEHTA, P. K.; GJØRV, O. E. Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica-fume. **Cement and Concrete Research**, v. 12, n. 5, p. 587-595, 1982.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

\_\_\_\_\_. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008. ISBN 8598576123.

MELO, K. A. D.; MARTINS, V. D. C.; REPETTE, W. Estudo de compatibilidade cimento-aditivo redutor de água. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 45-56, 2009.

MOLIN, D. C. C. D. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**: IBRACON, v.1, 2011. cap. 8, p.260-309.

NAIDU, K. G. Concrete Durability: Review of Rapid Chloride Permeability testing for durability compliance. XII DBMC, 2011. Porto - Portugal.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed. Bookman Editora, 2015. ISBN 8582603665.

OERTEL, T. et al. Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 58, n. 8, p. 121-130, 2014.

OERTEL, T. et al. Primary particle size and agglomerate size effects of amorphous silica in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 61-67, 3// 2013.

OH, B. H. et al. Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration. **Nuclear Engineering and Design**, v. 212, n. 1–3, p. 221-231, 3// 2002.

PET CIVIL UFJF. Adições Minerais ao Concreto de Cimento Portland. 2012. Disponível em: < <http://blogdopetcivil.com/2012/05/11/adicoes-minerais-ao-concreto-de-cimento-portland> >. Acesso em: 11/10/2016.

PRICE, B. 3 - High strength concrete A2 - Newman, John. In: CHOO, B. S. (Ed.). **Advanced Concrete Technology**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. p.1-16. ISBN 978-0-7506-5686-3.

PRIYA et al. Quantification of Carbon Content in cogeneration boiler waste and Its Effect on pozzolanic Reactivity. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 9, p. 9656-9663, 2017.

PRUSTY, J. K.; PATRO, S. K.; BASARKAR, S. S. Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, n. 0, 2016.

RAMACHANDRAN, V. S. 3 - Admixture Interactions in Concrete. In: (Ed.). **Concrete Admixtures Handbook (Second Edition)**. Park Ridge, NJ: William Andrew Publishing, 1996a. p.95-136. ISBN 978-0-8155-1373-5.

\_\_\_\_\_. 4 - Chemical Admixtures—Recent Developments. In: (Ed.). **Concrete Admixtures Handbook (Second Edition)**. Park Ridge, NJ: William Andrew Publishing, 1996b. p.137-184. ISBN 978-0-8155-1373-5.

RAMACHANDRAN, V. S.; FELDMAN, R. F. 1 - Concrete Science. In: (Ed.). **Concrete Admixtures Handbook (Second Edition)**. Park Ridge, NJ: William Andrew Publishing, 1996. p.1-66. ISBN 978-0-8155-1373-5.

RAMACHANDRAN, V. S. et al. 1 - Thermoanalytical Techniques. In: (Ed.). **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials**. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2002. p.1-34. ISBN 978-0-8155-1487-9.

RAVERDY, M. et al. Appréciation de l'activité pouzzolanique de constituents secondaires. **Proceedings of 7e congrés international de la chimie des ciments, Paris, France**, p. 6-41, 1980.

REAL, R. P. et al. Análise do comportamento frágil do concreto de alto desempenho (CAD) submetido a altas temperaturas. 58º Congresso Brasileiro do Concreto, 2016. Belo Horizonte - MG. IBRACON.

REAL, R. P. et al. Avaliação das propriedades do Concreto de Alto Desempenho submetido ao ataque químico com ácido sulfúrico. 58º Congresso Brasileiro do Concreto 2016. Belo Horizonte - MG. IBRACON.

REAL, R. P. et al. A review on the use of rice husk ash as a mineral admixture in high performance concrete: Research opportunities. **International Journal of Science and Engineering Investigations**, v. 6, n. 65, 2017.

SALAS, A. et al. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 95, p. 773-778, 2009.

SENSALE, G. R. D. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 54, p. 718-725, 10// 2010.

SIMS, I.; BROWN, B. Concrete aggregates. In: (Ed.). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th edn. Arnold, London, 1998.**

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: Método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. Mestrado (Mestre). Faculdade de Engenharia, UNESP, São Paulo.

TAYLOR, H. **Cement chemistry.** London: Thomas Telford 1997.

TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B.; GOMES, A. S. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Química Nova**, v. 24, p. 808-818, 2001.

TUAN, N. V. et al. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 78, p. 1104-1111, 2011.

TUAN, N. V. et al. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 78, p. 2030-2035, 2011.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia:** IBRACON, v.1, 2011. cap. 12, p.415-451.

VAN, V.-T.-A. et al. Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, n. 12, p. 270-278, 2014.

XU, W. et al. Pozzolanic Reactivity of Silica Fume and Ground Rice Husk Ash as Reactive Silica in a Cementitious System: A Comparative Study. **Materials**, v. 9, n. 0, p. 146, 2016.