



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

**JARBAS BRESSA DALCIN**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ  
OBTIDA ATRAVÉS DA QUEIMA CONTROLADA COMO SUBSTITUIÇÃO  
PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS  
AUTOADENSÁVEIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Alegrete  
2016**

**JARBAS BRESSA DALCIN**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ  
OBTIDA ATRAVÉS DA QUEIMA CONTROLADA COMO SUBSTITUIÇÃO  
PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS  
AUTOADENSÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia – PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo Kosteski

Co-orientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

**Alegrete**

**2016**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

D138a Dalcin, Jarbas Bressa  
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ  
OBTIDA ATRAVÉS DA QUEIMA CONTROLADA COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL  
AO CIMENTO PORTLAND NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS /  
Jarbas Bressa Dalcin.  
127 p.  
  
Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2016.  
"Orientação: Luis Eduardo Kostascki".  
  
1. Sílica de casca de arroz. 2. Cinza volante. 3. Concreto  
autoadensável. I. Título.

JARBAS BRESSA DALCIN

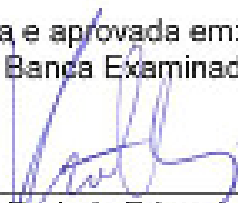
**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO USO DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ  
OBTIDA ATRAVÉS DA QUEIMA CONTROLADA COMO SUBSTITUIÇÃO  
PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS  
AUTOADENSÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia – PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Tecnologia de Materiais

Dissertação defendida e aprovada em: 01 de setembro de 2016.

Banca Examinadora:




---

Prof. Dr. Luis Eduardo Kostascki  
Orientador/UNIPAMPA



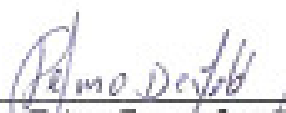
---

Prof. Dr. Ederli Marangon  
Coorientador/ UNIPAMPA




---

Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier  
Examinador / UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld  
Examinador / UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Flávio de Andrade Silva  
Examinador / PUC – Rio

*Dedico este trabalho à Deus, minha esposa Janice, meu filho Samuel e meus pais, Alcides e Orélia.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por mais uma conquista,

Agradeço à minha esposa Janice, pelo incentivo e apoio;

Agradeço em especial aos meus orientadores Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas e Prof. Dr. Ederli Marangon, pelas orientações;

Aos técnicos de laboratório, bolsistas e voluntários que durante a realização dos ensaios me auxiliaram nos trabalhos realizados;

Aos técnicos do laboratório da COPPE/UFRJ pela obtenção da granulometria dos materiais finos realizados com o granulômetro a laser;

À Unipampa, que me proporcionou o desenvolvimento e conclusão deste curso de mestrado;

A Sílica Verde do Arroz Ltda, empresa do Grupo Pilecco, pela sílica da casca de arroz disponibilizada para realização dos ensaios;

A Usina Termoelétrica - UTE Presidente Médici pela doação da Cinza Volante utilizada;

A Grace Brasil Ltda. pela doação do superplastificante utilizado nas misturas.

A todos aqueles que, que direta ou indiretamente me ajudaram ao longo desta trajetória.

*“Não podemos ter medo de sonhar com grandes ideais. Triste de quem se acomoda e se apequena com reduzidos propósitos. A vida é feita de grandes projetos. O ser humano é chamado para grandes ideais. Os grandes sonhos nos dão força para superarmos os pequenos e grandes obstáculos.”*

(Pe Léo)

## RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial uso da Sílica de Casca de Arroz (SCA), obtida de queima controlada, como material de substituição parcial em massa ao Cimento Portland (CP) na produção de concretos autoadensáveis (CAA). A SCA empregada neste trabalho foi produzida em condições controladas em um sistema de combustão com leito fluidizado, tendo como resultado uma sílica altamente amorfa e de boa qualidade. Foram avaliados os resultados do comportamento reológico do CAA no estado fresco e a resistência mecânica no estado endurecido de um concreto de referência, sem o uso de SCA, e de cinco concretos produzidos a partir de substituições parciais de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de SCA em relação à quantidade de massa do cimento. Em todos os traços foram utilizado 15% de cinza volante (CV) adicionada à massa do material aglomerante, a fim de auxiliar na diminuição do atrito entre as partículas dos agregados com o cimento. O traço do concreto de referência foi obtido utilizando o procedimento de caráter experimental proposto pelo Método de Gomes. Este traço foi analisado também pelo Método do Empacotamento Compressível, sendo assim, definidos os outros traços com substituições. As amostras foram caracterizadas no estado fresco de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 15823/2010, através de: ensaios de espalhamento no cone de Abrans e Anel "J", de fluidez no funil "V" e habilidade passante na caixa "L" e caixa "U". Os resultados mostram que os concretos produzidos com SCA possuem boa capacidade de fluidez. No estado endurecido foram verificadas as resistências mecânicas de compressão axial e tração por compressão diametral dos CAAs nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias. Os resultados dos ensaios indicam que é possível substituir CP por SCA sem que haja prejuízo às características mecânicas dos CAAs e ainda obter ganhos técnicos e econômicos. O melhor concreto, levando em conta todos os aspectos estudados, foi com 15% de substituição de CP por SCA.

Palavras-chave: Sílica de casca de arroz; Cinza volante; Concreto autoadensável.



## ABSTRACT

This study aims to evaluate the potential use of rice husk silica (RHS), obtained under controlled burning conditions, such as partial replacement material to the Portland Cement (PC) in the production of self-compacting concrete (SCC). The RHS employed in this study was produced under controlled conditions in a fluidized bed combustion system, resulting in highly amorphous silica and of good quality. We evaluated the results of the rheological behavior of SCC in the fresh state and strength in the hardened state of a reference concrete without the use of RHS and five concrete made from partial substitution 5%, 10%, 15%, 20% and 25% in RHS relative to the amount of concrete mass. In all traces were used 15% of Fly Ash (FA) is added to the mass of the binder material to assist in reducing friction between particles of the aggregates with cement. The trace of the reference concrete was obtained using the experimental procedure proposed by Gomes method. This trait was also analyzed by the method of packaging compressible and based on this method are defined partial strokes with other PC for RHS substitutions. After obtaining the characteristics of the materials and dosages of SCCs, these were featured in the fresh according to the Brazilian standard NBR 15823/2010, as follows: Spreading tests on cone Abrams and "J-ring", pour in "V-Funnel" and passing ability in the "L-box" and "U-box". The results shows that concrete made with RHS have good flow capacity. In the hardened state the mechanical resistances were checked axial compression and tension by diametrical compression of SCCs at the ages of 7, 28, 56 and 91 days. The test results indicate that it is possible to replace PC with RHS without prejudice to the characteristics of SCCs and still get technical and economic gains. The best concrete, taking into account all the points studied, was the one with replacement of 15% of PC for RHS.

Keywords: Rice husk silica; Fly ash; Self-compacting concrete.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Perda de carga em um leito com diâmetro de partícula uniforme.....	35
FIGURA 2 – Método de obtenção do CAA.....	40
FIGURA 3 – Proporções fixadas dos agregados graúdo e miúdo e as propriedades desejadas na argamassa .....	41
FIGURA 4 – Ensaio de espalhamento de argamassa.....	42
FIGURA 5 – Ensaio funil V de argamassa .....	42
FIGURA 6 – Resumo das etapas do Método de dosagem de Okamura <i>et al.</i> ....	43
FIGURA 7 – Processo simplificado para a dosagem da mistura de CAA .....	44
FIGURA 8 – Diagrama do método de dosagem de Gomes <i>et al</i> (2003) .....	47
FIGURA 9 – Exemplo da curva log T versus SP/C para determinação da dosagem de SP (Gomes <i>et al</i> , 2003).....	48
FIGURA 10 – Fases do empacotamento durante o ensaio de demanda de água ....	55
FIGURA 11 – Fases do empacotamento durante ensaio de demanda de água .....	56
FIGURA 12 – Curvas granulométricas dos agregados .....	60
FIGURA 13 – Cimento CPV ARI – RS .....	61
FIGURA 14 – SCA comercializada pelo Grupo Pilecco Nobre com nome comercial Sílica Nobre.....	63
FIGURA 15 – Análise de difração de raios-X da SCA.....	63
FIGURA 16 – Cinza Volante proveniente da Usina Termoelétrica Presidente Médici .....	65
FIGURA 17 – Comparativo entre as curvas granulométricas do material aglomerante .....	66
FIGURA 18 – Superplastificante (Grace ADVA™ CAST 525).....	67
FIGURA 19 – Agente modificador de viscosidade Rheomac UW 410 .....	68
FIGURA 20 – Ensaio de eficiência e ponto de saturação do cimento com o dispersante.....	69
FIGURA 21 – Curvas de saturação (a) cimento CP V ARI-RS; (b) Materiais aglomerantes: 15% adição de CV e 25% substituição de SCA ao cimento. ....	71
FIGURA 22 – Realização do ensaio de determinação do esqueleto granular .....	72
FIGURA 23 – Relação do menor índice de vazios versus porcentagem de agregado miúdo. ....	72
FIGURA 24 – Misturador de bancada utilizado no ensaio de demanda de água.....	75

FIGURA 25 – Procedimento do ensaio de compactação para agregados com dimensões maiores que 100 $\mu\text{m}$ .....	76
FIGURA 26 – Gráfico com o máximo empacotamento dos agregados obtido através do software <i>MECCOPPE_1.0</i> .....	78
FIGURA 27 – Gráfico com o máximo empacotamento entre o Cimento e a cinza volante obtido através do software <i>MECCOPPE_1.0</i> .....	79
FIGURA 28 – Gráfico com o empacotamento entre o Cimento e a SCA obtido através do software <i>MECCOPPE_1.0</i> .....	80
FIGURA 29 – Gráfico com o empacotamento para a mistura completa e para a mistura binária CP-SCA. Dados obtidos através do software <i>MECCOPPE_1.0</i> .....	81
FIGURA 30 – Ensaio de espalhamento pelo Cone de Abrams .....	83
FIGURA 31 – Ensaio Anel J.....	84
FIGURA 32 – Ensaio Caixa L.....	85
FIGURA 33 – Ensaio Funil V.....	86
FIGURA 34 – Ensaio Caixa U .....	88
FIGURA 35 – Visão geral da Prensa Emic PC 150.....	89
FIGURA 36 – Visão geral da Prensa Emic DL 20000 .....	90
FIGURA 37 – Aspectos dos espalhamentos através do Anel J dos CAA .....	97
FIGURA 38 – a) Diâmetro do Espalhamento e b) Habilidade passante no anel J para cada uma das misturas estudadas.....	98
FIGURA 39 – Habilidade passante: a) Caixa L e b) Caixa U, para cada uma das misturas estudadas. ....	99
FIGURA 40 – Viscosidade plástica aparente $T_{500}$ , e Funil V, para cada uma das misturas estudadas. ....	100
FIGURA 41 – Comparativo das curvas de resistência média à compressão axial..	102
FIGURA 42 – Comparação múltipla de médias da resistência à compressão axial aos 7, 28, 56 e 91 dias para os CAAs estudados.....	104
FIGURA 43 – Comparativo de ganho de resistência à compressão com o decorrer das idades <i>versus</i> diferentes misturas .....	106
FIGURA 44 – Comparativo de resistência média à tração por compressão diametral .....	109
FIGURA 45 – Comparação múltipla das médias da resistência à tração por compressão diametral aos 7, 28, 56 e 91 dias.....	110

FIGURA 46 – Comparativo de ganho de resistência à tração com o decorrer das idades <i>versus</i> misturas.....	111
FIGURA 47 – Tensão de compressão axial <i>versus</i> a tensão de tração por compressão diametral, comparados com os limites sugeridos pelo código CEB-FIP .....	113

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação das pozolanas estabelecida pela NBR 12653/2015 .....	30
TABELA 2 – Características físicas do agregado miúdo .....	59
TABELA 3 – Características físicas do agregado graúdo .....	60
TABELA 4 – Composição química da sílica da casca de arroz.....	64
TABELA 5 – Traço de CAA obtido pelo método de Gomes <i>et al.</i> (2003) .....	74
TABELA 6 – Compacidade dos materiais finos.....	76
TABELA 7 – Compacidade do agregado miúdo.....	77
TABELA 8 – Compacidade do agregado graúdo .....	77
TABELA 9 – Consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto (kg/m <sup>3</sup> ).....	81
TABELA 10 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação segundo NBR 15823-1: 2010.....	83
TABELA 11 – Classes de viscosidade plástica aparente $t_{500}$ (sob fluxo livre) segundo NBR 15823-2: 2010.....	83
TABELA 12 – Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre) segundo NBR 15823-3: 2010.....	85
TABELA 13 – Classes de habilidade passante caixa L (sob fluxo confinado) segundo NBR 15823-4: 2010.....	86
TABELA 14 – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado) segundo NBR 15823-5: 2010. ....	87
TABELA 15 – Resultados obtido dos CAAs no estado fresco.....	95
TABELA 16 – Valores médios de resistência à compressão axial .....	101
TABELA 17 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial dos CAAs com substituição parcial de Cimento Portland por Sílica de Casca de Arroz.....	102
TABELA 18 – Taxa de crescimento das resistências (valores em MPa/dia).....	106
TABELA 19 – Resultados experimentais de resistência à tração compressão diametral.....	107
TABELA 20 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência à tração por compressão diametral dos CAAs com cinza volante e sílica de casca de arroz. ....	108

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos.....	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
1.2	Estrutura do trabalho .....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1	Concreto autoadensável.....	21
2.2	Adições Minerais .....	22
2.2.1	Filler calcáreo .....	24
2.2.2	Metacaulim .....	24
2.2.3	Cinza Volante .....	25
2.2.4	Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar .....	26
2.2.5	Cinza de casca de Arroz.....	27
2.3	Concretos com adições e/ou substituições em sua mistura .....	27
2.3.1	A CCA como substituição e/ou adição no CAA .....	32
2.3.2	A SCA produzida através da combustão controlada em caldeira com leito fluidizado .....	33
2.4	Aspectos reológicos do concreto no estado fresco.....	35
2.5	Aspectos Reológicos do Concreto no Estado Endurecido.....	37
2.6	Métodos de dosagens para o CAA.....	39
2.6.1	Método Okamura <i>et. al.</i> .....	39
2.6.2	Método de Petersson <i>et. al.</i> .....	43
2.6.3	Método de Gomes, Gettu e Agulló (2003) .....	46
2.6.4	Método de Empacotamento Compressível (MEC) .....	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	59
3.1	Matéria-prima .....	59

3.1.1	Agregados .....	59
3.1.2	Materiais aglomerantes .....	61
3.1.3	Aditivos químicos.....	67
3.2	Produção das amostras.....	68
3.2.1	Dosagem pelo Método de Gomes <i>et al.</i> (2003) .....	69
3.2.2	Utilização do método do empacotamento compressível (MEC) para validar a dosagem definida por Gomes et al. (2003) .....	74
3.3	Ensaio Mecânicos.....	82
3.3.1	Ensaio no Estado Plástico .....	82
3.3.2	Ensaio no Estado Endurecido.....	88
3.4	Análise estatística dos dados .....	91
3.5	Viabilidade econômica quanto à substituição de cimento Portland por SCA91	
3.6	Quantidades de CO <sub>2</sub> geradas na produção de materiais aglomerantes utilizados no CAA .....	93
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	95
4.1	Resultados dos parâmetros reológicos no estado fresco .....	95
4.1.1	Resumo dos resultados reológicos no estado fresco .....	100
4.2	Resultados dos ensaios mecânicos.....	101
4.2.1	Resistência à compressão axial .....	101
4.2.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	107
4.2.3	Resumo dos resultados dos ensaios mecânicos.....	114
4.3	Resultados da viabilidade econômica quanto à substituição de cimento Portland por SCA .....	114
4.4	Resultados da Quantificação de CO <sub>2</sub> geradas na produção de cimento utilizado no CAA.....	115
4.5	Análise quanto a melhor quantidade de substituição. ....	116
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
5.1	Conclusões.....	117

5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	120
6	REFERÊNCIAS.....	122



## 1 INTRODUÇÃO

Os concretos autoadensáveis são produzidos utilizando-se grandes quantidades de cimento. Por esta razão aparecem alguns problemas como o alto calor de hidratação, a alta retração autógena e o alto custo. Além disso, cerca de 7% do total das emissões de CO<sub>2</sub> são produzidas pela indústria do cimento. Para minimizar estes efeitos negativos, muitos estudos foram realizados sobre o uso de diferentes adições para substituir parcialmente o cimento no concreto autoadensável, como pó de mármore, pó de pedra calcária, pó de basalto, cinzas volantes, escórias ou sílica ativa. Dessa forma, a utilização de resíduos gerados pelos setores da produção primária, como as indústrias de beneficiamento do arroz podem ser, também, uma ótima alternativa.

Segundo Pouey (2006), 20% do peso do arroz produzido é casca e, se esta fosse queimada totalmente, geraria nos dias de hoje, cerca de 380 mil toneladas de cinza de casca de arroz (CCA). Em 2014 a produção agrícola de arroz no Brasil foi de aproximadamente 12 milhões de toneladas, sendo 78% deste total produzido na região sul do país, conforme dados fornecidos pelo IBGE (2015).

Atualmente, o processo de queima da casca de arroz utilizado na maioria das indústrias de beneficiamento de arroz, gera uma quantidade expressiva de CCA que normalmente é descartada de forma inadequada ou não aproveitada na sua integralidade, causando sérios problemas ambientais. A CCA proveniente de combustão não controlada tem uma grande proporção de minerais de sílica não reativas (cristalinas) e de baixo valor pozolânico. Por isso, é utilizada apenas em concretos convencionais e de forma modesta, pois a necessidade de passar por um processo de moagem para diminuir o diâmetro das partículas e desenvolver maior atividade pozolânica a torna economicamente inviável (POUEY, 2006).

As pesquisas com CCA são promissoras, principalmente a produzida através da combustão controlada em caldeira com leito fluidizado. A partir de resultados experimentais obtidos por Martínez *et al.* (2011), pode-se constatar a viabilidade técnica para produzir gases quentes gerados por forno de leito fluidizado, cujo resultado é a obtenção da sílica de casca de arroz (SCA), com elevado grau de amorfismo.

Muitos autores consideram a SCA como uma pozolana reativa, especialmente a produzida pelo sistema de combustão com leito fluidizado, que resulta em uma SCA altamente amorfa e de boa qualidade, possibilitando sua utilização como adição ou substituição parcial do cimento em dosagens de concretos e argamassas (MARANGON *et al.*, 2013).

Assim, a SCA obtida de uma indústria de beneficiamento de arroz estabelecida na região do Pampa Gaúcho, está sendo utilizada como substituição parcial ao CP em concretos convencionais ainda de forma moderada (COLLATTO, 2011). A principal vantagem é o ganho de resistência mecânica à compressão, sendo esta também uma eficiente forma para redução do impacto ambiental. Recentemente surgiram resultados promissores em pesquisas realizadas por Mendes (2014), que demonstraram uma melhora na durabilidade de concretos que utilizaram SCA com alto índice de pozolanicidade, superiores aos mínimos prescritos por norma para caracterização como material pozolânico.

Além de alguns estudos nos quais se utiliza a SCA em concretos convencionais, não é conhecido nenhum trabalho que a utilize na produção de concreto autoadensável (CAA), além do desenvolvido nesta pesquisa (DALCIN *et al.* 2015). Assim, são necessários estudos mais aprofundados sobre a influência da SCA nas características reológicas do CAA no estado fresco e no real ganho de resistência mecânica quando o cimento é parcialmente substituído pela SCA.

Segundo Dal Molin (2011), o concreto, tanto em estado fresco quanto endurecido, sofre mudanças com a incorporação de adições, alterando positivamente muitas de suas propriedades, seja pelo efeito físico relacionado ao tamanho reduzido das partículas, seja pelo efeito químico/pozolânico ou até mesmo pela ação conjunta dos dois efeitos. As respostas positivas podem variar em função da quantidade de adição utilizada e das condições de cura, assim como mudam seus valores conforme a composição química e granulométrica, sendo estas características responsáveis pela ação diferenciada no comportamento do concreto.

Do mesmo modo que a incorporação de adições, depois de certo tempo, a SCA deixa de reagir quimicamente de maneira significativa como aglomerante e passa a atuar fisicamente, como filler inerte, através do efeito filler, uma vez que esta atua nos concretos e argamassas como material de preenchimento, melhorando o empacotamento do sistema (MENEZES *et al.*, 2009).

Com base no exposto, no presente trabalho estudou-se a utilização da SCA como substituição parcial de cimento Portland em misturas de concreto autoadensável observando que melhoras são introduzidas ao concreto além da questão ambiental e econômica, de se utilizar um subproduto gerado pelos setores da produção primária do país.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar o potencial de uso da Sílica de Casca de Arroz (SCA) obtida através da queima controlada como substituição parcial ao cimento Portland (CP) na produção de concretos autoadensáveis (CAA).

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- (i) Dosar traços de CAA pelo Método de Gomes, Gettu e Agulló, com diferentes teores de substituição de CP por SCA.
- (ii) Obter a compacidade da mistura pelo Método do Empacotamento Compressível (MEC);
- (iii) Desenvolver CAA produzidos com adição de 15% de CV e substituição em massa de CP por SCA, nos teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%;
- (iv) Avaliar do comportamento reológico dos CAA no estado fresco através dos ensaios de espalhamento e do tempo de escoamento pelo Método do Cone de Abrams, habilidade passante pelos Métodos do Anel J, Caixa L, Funil V e determinação da fluidez e habilidade passante pelo Método da Caixa-U;

- (v) Determinar no estado endurecido, resistência mecânica através de ensaios de compressão axial e ensaios de tração por compressão diametral.
- (vi) Comparar os resultados dos ensaios dos CAA com o concreto de referência para mensurar o ganho de resistência mecânica obtido com a substituição e determinar o melhor teor de substituição de SCA no CAA em cada caso.

## 1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, estando organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 - Introdução: apresenta a importância da pesquisa, justificando a escolha do tema e objetivos propostos.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: Relevância sobre temas como: concretos autoadensáveis seus constituintes, produção, propriedades reológicas no estado fresco e propriedades mecânicas no estado endurecido; adições minerais seu emprego e efeitos; cinza de casca de arroz: sua geração, propriedades físicas e químicas, destinação e possível utilização.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos Experimentais: Descreve a metodologia utilizada para a caracterização dos materiais e seus resultados, além da apresentação da metodologia empregada na produção do CAA, bem como apresenta os ensaios físicos e mecânicos que foram realizados.

Capítulo 4 - Resultados e Discussão: são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados e discutidos os principais resultados dos testes experimentais.

Capítulo 5 - Conclusão e Considerações Finais: serão apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos a serem desenvolvidos no sentido de complementar e ampliar as pesquisas.

O trabalho é finalizado com a apresentação das Referências Bibliográficas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordadas as pesquisas científicas realizadas no concreto autoadensável, suas propriedades, matérias-primas empregadas e seus métodos de produção. Além disso, é apresentado o potencial de aplicação da sílica da casca do arroz e da cinza volante, como matérias-primas alternativas na substituição parcial do cimento Portland.

### 2.1 Concreto autoadensável

A necessidade da indústria da construção por estruturas de concreto é satisfeita pelo uso de misturas de concreto de alta resistência, porém, a construtibilidade dos elementos de concreto densamente armado exige que as misturas de concreto fresco sejam bem fluidas. Além disso, estes elementos, quando sujeitos ao lançamento em lugares altos e com uso excessivo de vibradores, causam um risco muito grande de segregação (MEHTA, 2014).

Assim, o CAA pode ser definido como um concreto fluido que pode ser lançado em um molde de suporte sem o uso de vibradores, formando um produto livre, ou seja, nenhum espaço deixa de ser preenchido dentro da fôrma, evitando vazios de ar aprisionado (MEHTA, 2006).

Segundo EFNARC (2002), a compactação do CAA deve ser realizada, exclusivamente, pela força da gravidade agindo sob seu próprio peso, sem segregação e mantendo sua homogeneidade, não necessitando de qualquer tipo de vibração interna ou externa. O CAA necessita satisfazer três propriedades importantes do concreto em seu estado fresco: capacidade de preenchimento, a capacidade de passagem e a resistência à segregação.

Os materiais utilizados no concreto autoadensável são os mesmos que os utilizados nos concretos convencionais. Neste tipo de concreto, tanto a regularidade, quanto o controle têm um significado especial, porque as propriedades de CAA são mais sensíveis a pequenas variações, em comparação com o concreto convencional (SKARENDAHL e PETERSSON, 2001).

Conforme Mehta (1999), os mesmos tipos de agregados graúdos utilizados na produção de concretos convencionais são adequados para o emprego em CAA. A forma e a textura superficial das partículas do agregado têm maior influência nas propriedades do concreto no estado fresco. Deste modo, visando facilitar a fluidez do CAA, é comum na produção deste tipo de concreto, a utilização de agregados graúdos com forma regular, baixa superfície específica e textura pouco áspera.

Comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas lamelares ou ainda achatadas, necessitam de uma quantidade maior de pasta de cimento para a produção de concretos com grande deformabilidade, fazendo com que o custo destas misturas tenha um aumento significativo. É habitual que a quantidade de agregados graúdos seja limitada pela presença de grãos mais finos na mistura (DE LARRARD, 1999).

Limitar o tamanho máximo e o conteúdo do agregado graúdo, usando aditivos químicos, tais como aditivos modificadores de viscosidade e uma nova geração de superplastificantes, incorporando aditivos minerais e usando baixas relações de água/aglomerante são práticas comuns para alcançar a autoadensabilidade nos concretos. Normalmente o CAA é produzido usando alto teor de cimento. Por esta razão, alguns problemas tais como calor de hidratação, alta retração autógena e alto custo podem ser introduzidos (ERHAN *et al.*, 2015).

Além disso, os mesmos tipos de cimento empregados na produção de concreto convencional podem ser utilizados na produção de CAA. Sabe-se que a quantidade de finos empregada em CAA é bastante alta e que, em sua maioria, é composta por cimento, o qual deverá ter seu teor limitado, de modo que se possa obter as mesmas características e resistências, sendo substituído pela SCA e evitando uma elevação de custos na composição final.

## **2.2 Adições Minerais**

As adições minerais influenciam na resistência e na porosidade. A resistência da pasta de cimento Portland depende da porosidade, da distribuição do tamanho dos poros e da forma desses poros. De forma geral, pode-se atribuir a efeitos físicos

e químicos as mudanças nas propriedades de produtos cimentícios confeccionados com aditivos minerais (SILVA, 2005).

Os materiais inertes são materiais pouco ou nada reativos quimicamente, tais como o quartzo. O uso desses materiais em concretos está relacionado com suas próprias características de finura e da forma das partículas do agregado miúdo. Em concretos pobres e sem partículas que passam na peneira 200 mesh (75 $\mu$ m) o emprego de materiais pulverulentos provoca a diminuição da exsudação e da segregação, conseqüentemente melhora a trabalhabilidade da pasta. Já em concretos ricos ou com maior número de agregados finos, a adição do material inerte fino piora a trabalhabilidade do concreto. Esses materiais podem ser usados com a finalidade de reduzir a retração e a conseqüente formação de fissuras. Os materiais inertes podem ser empregados na proporção de 5 a 15% da massa do cimento, diminuindo o preço por volume de concreto produzido (SILVA, 2005).

O efeito fíler é conseqüência da maior compacidade conferida à mistura pela inclusão de partículas finas e ultrafinas do aditivo mineral. A ação conjunta de um aditivo mineral de elevada finura, um aditivo químico superplastificante, cimento Portland e água. Inicialmente, tem-se uma pasta contendo somente água e cimento cujas partículas encontram-se aglomeradas em função de forças atrativas de origem eletrostática (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Neste caso, a probabilidade de formação de grandes vazios capilares é grande e a quantidade de grãos de cimento não hidratados tende a ser significativa. O emprego de aditivo superplastificante promove a defloculação e dispersão das partículas de cimento, o que contribui para sua completa hidratação. A incorporação do aditivo mineral à pasta, por sua vez, possibilita o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento disperso, o que promove aumento na compacidade da mistura e, conseqüentemente, refinamento da rede porosa. Teoricamente, partículas muito finas de cimento Portland poderiam proporcionar o mesmo efeito físico apresentado pelas partículas de aditivo mineral, porém elas dissolvem-se rapidamente quando em contato com a água, o que torna ineficiente o efeito de densificação da mistura (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Quanto às pozolanas, elas são definidas como substâncias constituídas de sílica e alumina que combinam com o hidróxido de cálcio na presença de água e com os diferentes componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes.

No que diz respeito a atividade pozolânica, compostos quimicamente ativos do aditivo mineral podem reagir com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação dos silicatos do cimento Portland para formar novos produtos hidratados. Como o hidróxido de cálcio contribui muito pouco para a resistência da pasta de cimento e é, dentre os produtos da hidratação, o primeiro a ser solubilizado e lixiviado pela água, o seu consumo proporciona uma estrutura química e mecanicamente mais resistente (NEVILLE, 1997).

### **2.2.1 Filler calcáreo**

Segundo Neville (1997), o filler calcáreo é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland que, devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como: trabalhabilidade, densidade, exsudação, permeabilidade, capilaridade. Embora não muito empregado como adição mineral para a fabricação de concreto de alto desempenho, o filler calcáreo pode ser utilizado para produzir concretos convencionais. Esse material difere das demais adições por ser praticamente inerte quimicamente, isto é, pouco reage com a água e com compostos do cimento hidratado. Isto significa que não possui atividade pozolânica, produzindo apenas efeitos físicos de tamponamento dos poros e complemento de granulometria.

Espera-se que, para finalidades específicas, o emprego de fillers se torne popular e atinja níveis de 15 ou 20% de adição ao cimento.

### **2.2.2 Metacaulim**

O metacaulim é um material alumino-silicoso proveniente da calcinação de argilas caulínicas entre temperaturas de 600 °C e 800 °C. Considerada uma adição mineral, bastante empregada na fabricação de cimento Portland composto. No entanto, a matéria-prima utilizada para produção da pozolana são argilas caulínicas



com grande porcentagem de fases pozolanicamente inertes como o quartzo e a muscovita. Pesquisadores distinguem a pozolana proveniente da calcinação dessas argilas e do metacaulim de alta reatividade, procedente da calcinação de argilas extremamente finas com elevado teor de caulinita.

Segundo pesquisas realizadas por Barata (1998), concretos produzidos com adição de metacaulim necessitam dosagens maiores de superplastificante do que a mistura sem adição, para relação água/aglomerante de 0,47, isso devido a maior quantidade de partículas finas. No entanto, concretos com adição de metacaulim apresentaram desempenho significativamente superior aos dos concretos sem adição nos ensaios de compressão simples e de absorção de água.

### **2.2.3 Cinza Volante**

A cinza volante é uma pozolana artificial, a qual pode apresentar efeitos muito benéficos quando incorporada ao CAA, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Suas partículas são esféricas, sendo esta uma grande vantagem do ponto de vista da demanda de água necessária para a produção do concreto (NEVILLE, 1997). Este formato pode ainda auxiliar na diminuição do atrito entre as partículas de agregado e cimento, acarretando melhorias no tocante à fluidez e à viscosidade do concreto. Diminuir o consumo de superplastificantes, também pode ser uma das vantagens da utilização de cinza volante como constituinte do concreto autoadensável.

Mehta e Monteiro (1994) citam outros ganhos, os quais podem ser obtidos fazendo uso deste subproduto em misturas de CAA, tais como: melhoria no empacotamento da mistura (aumento da resistência final e impermeabilidade), fortalecimento da zona de transição na interface, aumento da aderência entre concreto e armadura, diminuição de custos e diminuição do potencial de fissuração do concreto.

A cinza volante possui propriedades pozolânicas, sendo classificada como uma pozolana comum, segundo Mehta e Monteiro (2014). Desta forma contribui

quimicamente nas características do concreto e não somente de forma física (compacidade).

#### **2.2.4 Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar**

Pesquisas feitas por Freitas (1996) apontam para a viabilidade do uso da cinza do bagaço em conjunto com o cimento Portland. Sendo utilizada uma cinza residual para a confecção de tijolos de solo-cimento. Onde os resultados indicaram que a adição da cinza proporcionou aumento da resistência à compressão e redução da absorção de água em todos os traços estudados.

Freitas *et al.* (1998) verificou a influência da substituição de cimento Portland por cinza do bagaço na resistência à compressão de argamassas. Utilizando uma cinza residual em argamassas com relação água/material cimentício de 0,48. Misturas com teores de substituição de 5%, 10%, 15% e 20% foram confeccionadas, além da argamassa de controle, composta exclusivamente por cimento Portland como material cimentício. A mistura com 15% de cinza do bagaço apresentou os melhores resultados de resistência à compressão até os 63 dias de cura. Os valores de resistência obtidos para as misturas com os demais teores de substituição não apresentaram diferenças significativas entre si e com relação à argamassa de controle.

Em estudos desenvolvidos por Cordeiro (2006), indicaram que a cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar apresenta composição química adequada ao emprego como aditivo mineral, principalmente no que se refere aos teores de dióxido de silício e perda ao fogo. Entretanto, a distribuição granulométrica variável da cinza, própria de um sistema de obtenção sem qualquer classificação, aponta para a necessidade de moagem para elevar a reatividade, pelo aumento da superfície específica das partículas, e conferir maior homogeneidade ao material.

### **2.2.5 Cinza de casca de Arroz**

As características da cinza da casca de arroz variam, basicamente, em função da composição química da casca e das condições de queima adotadas. A casca de arroz apresenta sílica em todas suas partes, principalmente localizada nas protuberâncias da epiderme externa.

A cinza amorfa, quando utilizada como pozolana, fatores como temperatura de queima, taxa de aquecimento, tempo de residência e ambiente de queima são responsáveis pela reatividade química da cinza, uma vez que influenciam na forma estrutural da sílica (amorfa ou cristalina), na superfície específica das partículas e no teor de carbono remanescente.

O emprego em concreto da cinza da casca de arroz tem sido amplamente pesquisado nas duas últimas décadas. Com destaque aos trabalhos desenvolvidos por Cincotto *et al.* (1990), com a produção de cinza da casca de arroz em forno de leito fluidizado e o emprego em pastas, argamassas e concretos de cinzas produzidas sem controle das condições de queima.

Cordeiro (2006) afirma em suas pesquisas que a cinza ultrafina da casca de arroz, em substituição de até 20% de cimento, promoveu melhoria nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos concretos.

## **2.3 Concretos com adições e/ou substituições em sua mistura**

Segundo Mehta (1999), concretos com altos consumos de cimento apresentam menor capacidade de absorver deformações e maior tendência à fissuração, devido ao aumento da retração química, da retração térmica e do módulo de elasticidade. Assim, percebe-se que o consumo de cimento não pode ser aumentado excessivamente, não apenas devido ao custo, mas também porque um elevado consumo de cimento pode acarretar problemas de durabilidade. Sendo assim, com o intuito de minimizar a ocorrência de fissuração e aumentar a durabilidade, a solução mais efetiva técnica e economicamente é a substituição de uma parte do cimento

por um material pozolânico, tornando o concreto menos propenso a apresentar microfissuras, e ainda com uma zona de transição mais resistente e durável.

Para minimizar estes efeitos negativos, muitos estudos foram realizados sobre o uso de diferentes adições para substituir parcialmente o cimento no concreto autoadensável, como pó de mármore (GUNEYISI *et al.* 2009; UYSAL e SUMER, 2011), pó de pedra calcária (UYSAL e YILMAZ, 2011), pó de basalto (UYSAL e SUMER, 2011; UYSAL e YILMAZ, 2011), cinzas volantes, escórias (BOUKENDAKDJI *et al.*, 2009; KHATIB *et al.*, 2005) ou sílica ativa (KHATIB, 2008; GUNEYISI *et al.* 2009; SAHMARAN *et al.*, 2009).

Ao empregar adições minerais, consideradas rejeitos de outras indústrias, no concreto pode-se alterar suas propriedades e, ao mesmo tempo, obter uma vantagem ecológica por dar destino útil a rejeitos. A norma brasileira NBR 11578 (1997) que aborda a produção de cimentos compostos, admite substituição de cimento Portland (em massa) por materiais pozolânicos entre 6 e 14% na sua composição, como no caso do CII-Z.

Os efeitos das adições minerais no concreto são relatados por pesquisadores em todo o mundo, como o refinamento do tamanho dos poros entre as partículas, a diminuição do fenômeno da exsudação, pela segmentação dos canais de fluxo de água, a melhora nas propriedades reológicas do concreto fresco, como coesão e trabalhabilidade, e, principalmente, o efeito filler causado pela presença física da adição, responsável diretamente no incremento da resistência à compressão (TUTIKIAN, 2008).

Segundo Dal Molin (2011), habitualmente no Brasil, são utilizadas adições minerais como cinza volante, argila calcinada e escória de alto-forno na produção de cimentos como substituição parcial ao Clínquer. Onde há calor de hidratação e a necessidade de se reduzir a penetração de cloretos, com o intuito de evitar ao máximo a corrosão das armaduras, é justificada, nestes casos, a utilização de adições minerais. Desde a década de 90, a sílica ativa é utilizada comercialmente no Brasil, principalmente em obras que demandem volumes expressivos de concreto, que vão desde obras novas a obras de reparo, onde foi usada para aumentar a durabilidade e alcançar resistências mais altas. O metacaulin de alta reatividade, comercializado há um tempo menor que a sílica ativa, foi especificada especialmente no Brasil em obras para a redução da permeabilidade do concreto,

prevenção da reação álcali-agregado, resistência química ao ataque de sulfatos e ácidos, aumentar a resistência à compressão e durabilidade frente ao íon cloreto.

Entre as adições mencionadas, duas fazem parte do trabalho experimental: a cinza volante e a sílica de casca de arroz, sendo esta última um produto derivado de combustão em leito fluidizado em condições controladas, diferente da CCA produzida sem controle de tempo, temperatura e moagem. Tanto a cinza volante quanto a SCA são abundantes na região sul do Brasil, ocasionando aumento do seu emprego nos concretos, trazendo, assim, grandes benefícios ecológicos, além de representar muitas vantagens técnico-econômicas.

De acordo com Dal Molin (2011), as propriedades do concreto no estado plástico são modificadas devido ao aumento da quantidade de materiais finos na massa do concreto, o que faz com que a massa fique unida devido à tensão superficial da água adsorvida na superfície dos materiais finos, tais como a adição mineral. No estado endurecido, as adições minerais atuam dando prosseguimento às reações de hidratação, produzindo uma maior quantidade de cristais e deixando a rede cristalina mais densa através de reações pozolânicas, de modo que ambas as reações químicas venham a reduzir a quantidade de poros capilares. Tal fenômeno faz com que seja reduzida a penetração de agentes patogênicos na pasta.

Silva (2007) define as pozolanas como substâncias constituídas de sílica e alumina que combinam com o hidróxido de cálcio na presença de água e com os diferentes componentes do cimento, formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes.

Em outras palavras, as adições pozolânicas, ou simplesmente pozolanas, são adições que por si sós não apresentam poder aglomerante hidráulico, mas quando finamente divididas e em presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos hidratados.

A norma brasileira NBR 12653 (2015) descreve a pozolana como um material silicoso ou sílico-aluminoso que, sozinho, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, entretanto quando dividido finamente e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes. É importante que este material esteja finamente moído para que a sílica possa combinar com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar silicatos estáveis. A sílica deve estar no estado amorfo, isto é, vítreo, pois quando apresenta estrutura cristalina sua reatividade é

muito pequena. O teor de sílica vítrea pode ser determinado por difração de raios x ou por dissolução em ácido clorídrico e hidróxido de potássio.

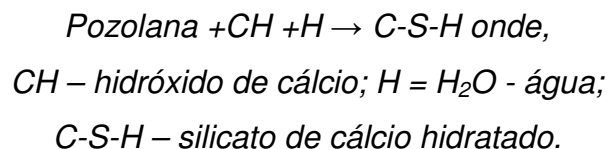
A NBR 12653 (2015) classifica as pozolanas em classes, de acordo com sua origem, como na TABELA 1.

TABELA 1 – Classificação das pozolanas estabelecida pela NBR 12653/2015

<b>Classificação</b>	<b>Materiais que obedecem aos requisitos</b>
Classe N	Pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas.
Classe C	Cinza volante proveniente da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.
Classe E	Quaisquer pozolanas que diferem das classes anteriores.

Fonte: NBR 12653/2015

A reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio e a sílica, resultando em silicato de cálcio hidratado, pode ser expressa de acordo com a reação abaixo (MEHTA e MONTEIRO, 1994):



As pozolanas artificiais são argilas de qualquer tipo submetidas a altas temperaturas para desidratação, porém, em temperaturas abaixo do início da fusão. São conhecidos também como materiais pozolanicos os subprodutos industriais, tais como a CV, a CCA, a sílica ativa, entre outros (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com a norma ASTM C 989, se classifica à cinza de casca de arroz, produzida em condições especiais, como pozolana de alta reatividade. Mehta e Monteiro (2014), ainda afirmam que, quanto à atividade pozolânica, a cinza de casca de arroz reativa é semelhante à sílica ativa.

A cinza volante é obtida pela combustão do carvão mineral em usinas termoelétricas. Quando apresenta finura adequada, sua reatividade é boa, proporcionando influência considerável na trabalhabilidade e na velocidade de desenvolvimento da resistência do concreto endurecido.

Segundo Silva (2007), adições minerais, como a cinza volante, quando presentes no cimento, possuem a capacidade de alterar as propriedades de coesão e consistência, principalmente em granulometria menor do que a do clínquer, como em casos onde há adição pozolânica, além de que, quando utilizadas junto ao CAA, somadas ou não a aditivos modificadores de viscosidade, podem proporcionar, entre outras vantagens, o aumento da coesão da mistura e evitar a segregação do agregado graúdo. Para isso, conforme Tutikian (2008), é necessário que essas adições possuam áreas superficiais maiores que a do componente que estão substituindo, podendo ser de origens diversas, desde que analisadas técnica e economicamente.

A cinza volante é uma pozolana artificial, que pode apresentar efeitos muito benéficos quando incorporada ao CAA, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, pois suas partículas são esféricas, proporcionando grande vantagem do ponto de vista da demanda de água, necessária para a produção do concreto (NEVILLE, 1997). Este formato pode ainda auxiliar na diminuição do atrito entre as partículas de agregado e cimento, acarretando melhorias no tocante à fluidez e à viscosidade do concreto. Diminuir o consumo de superplastificantes também pode ser uma das vantagens da utilização de cinza volante como constituinte do concreto autoadensável.

Mehta e Monteiro (1994) citam alguns ganhos que podem ser obtidos fazendo uso deste subproduto em misturas de CAA, tais como: melhoria no empacotamento da mistura (aumento da resistência final e impermeabilidade), fortalecimento da zona de transição na interface, aumento da aderência entre concreto e armadura, diminuição de custos e diminuição do potencial de fissuração do concreto.

Além das adições minerais, o uso de aditivos superplastificantes possibilita a diminuição da relação água/cimento, sem que haja perda na consistência, permitindo a obtenção de misturas trabalháveis de arranjo mais denso, o que provoca um aumento na resistência e na durabilidade. Para o caso de CAA, os superplastificantes de grande eficiência, dentre os quais se destacam os de base policarboxilato, são os mais utilizados. Este tipo de aditivo age como dispersante junto às partículas por meio do efeito estérico, sem afetar consideravelmente a resistência à segregação da mistura (NEVILLE, 1997).

### 2.3.1 A CCA como substituição e/ou adição no CAA

A casca do arroz (CA) tem motivado inúmeras pesquisas, devido a sua grande disponibilidade, pois entre os resíduos vegetais é a que produz maior percentual de cinza quando gerada. Além disso, são apresentadas em sua composição altas porcentagens de sílica.

Desde a década de 70, é investigada a utilização da cinza da casca de arroz (CCA) como material pozolânico, sendo as principais pesquisas realizadas na Índia e nos EUA. A produção de CCA, com elevada pozolanicidade, possibilita sua utilização no lugar da sílica ativa no concreto de alto desempenho (DAFICO, 2001).

Metha (1999), com base em suas pesquisas, publicou vários trabalhos sobre a utilização da CCA no concreto e, assim, desenvolveu e patenteou uma fornalha de queima da CA, com capacidade de controlar as condições de tempo e de temperatura, para que a sílica contida na CA permaneça em estado amorfo e com elevada superfície específica, propiciando a produção de uma cinza de altíssima reatividade, porém com elevado teor de carbono, o que resulta em uma cinza de cor preta.

Estudos experimentais realizados na Universidade da Califórnia mostram que, quando a temperatura de queima da casca de arroz é baixa e o tempo de exposição à alta temperatura é pequeno, a sílica contida na cinza é amorfa. A cinza, nessas condições, apresenta alto índice de vazios internamente e área específica de 50 a 110 m<sup>2</sup>/g, quando medida por adsorção de nitrogênio (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

No Brasil, a maioria dos trabalhos sobre o uso de CCA, como material pozolânico, foi realizada com cinzas residuais oriundas da queima da casca em beneficiadoras do cereal. Em alguns casos, quando as beneficiadoras possuíam queimadores de leito fluidizado, a temperatura de queima era controlada para evitar a formação de sílica cristalina. Nos demais, os estudos foram realizados com cinzas obtidas de queimas sem um controle efetivo do tempo e da temperatura de queima. De um modo geral, os resultados obtidos nas pesquisas brasileiras concluíram que a CCA é uma excelente pozolana, com desempenho comparável ao da sílica ativa (resíduo da fabricação do ferro-silício e/ou do silício metálico). Uma constatação importante e, até certo ponto, surpreendente dos trabalhos nacionais, é que esse desempenho foi satisfatório mesmo para cinzas que exibiam picos cristalinos nos



ensaios de difração de raios X, contrariando a opinião de muitos especialistas internacionais (DAFICO, 2001).

Rahman *et al* (2014), ainda afirmam que a simples substituição parcial de cimento por CCA, obtida através da queima sem controle de tempo e temperatura em uma mistura de concreto, é capaz de torná-lo fluído, sem que haja comprometimento nas propriedades do estado fresco do concreto. Porém, é necessário um acréscimo na quantidade de água para a obtenção das características de autoadensável.

### **2.3.2 A SCA produzida através da combustão controlada em caldeira com leito fluidizado**

Segundo Collatto (2011), a sílica de casca de arroz proveniente da combustão controlada em caldeira com leito fluidizado, se apresenta como um material com propriedades aglomerantes possíveis de serem utilizadas na produção de concreto.

Porém é consenso na literatura que variáveis como taxa de aquecimento, atmosfera de calcinação, tempo e temperatura de queima influenciam diretamente tanto nas propriedades físico-químicas quanto nas estruturas morfológicas do material.

Os trabalhos de Marton *et al.* (2013), Marangon *et al.* (2013) e (2014) e Mendes *et al.* (2014) afirmam que a SCA produzida na região do Pampa Gaúcho, tem de forma geral, granulometria muito próxima a do cimento CP V ARI-RS e com diâmetro inferior a da cinza volante. De acordo com análise química, a SCA atende aos requisitos da NBR 12653 (2015) para ser considerada como uma pozolana, apresentando uma estrutura tipicamente amorfa, que quando misturada com o cimento CP V ARI-RS, apresenta atividade pozolânica.

Collatto (2011), após testes operacionais, concluiu que a dosagem obtida com 3% de substituição de cimento por SCA, não só absorveu a redução de 8,5% no consumo de cimento, como também sinalizou ainda a possibilidade de uma redução maior que 10% de substituição e que a SCA possibilita uma redução do consumo de cimento em concretos convencionais elaborados em centrais dosadoras, sem que

haja prejuízo no desempenho destes concretos, colaborando com a redução no uso excessivo de cimento causado pela demanda do mercado da construção civil.

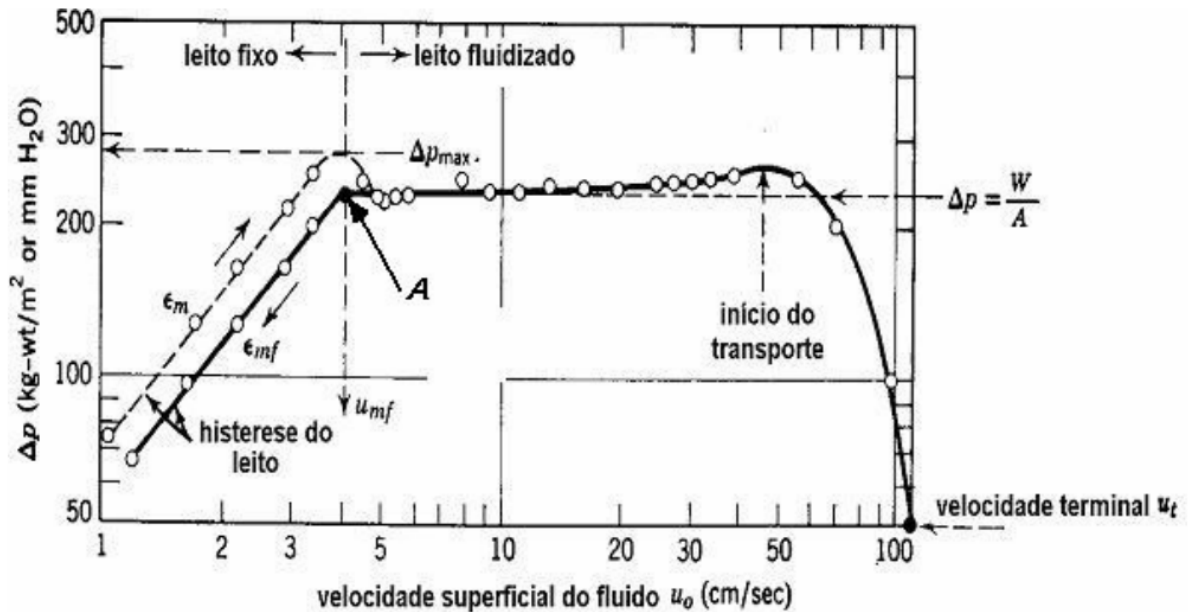
### **2.3.2.1 Fluidização ou Leito Fluidizado**

Este processo tem como objetivo principal facilitar a transferência de calor e/ou massa, onde são correntes nos mais diversos setores da indústria. É utilizado quando é necessário promover reações entre um ou mais fluidos, como é o caso da reação de combustão, do craqueamento catalítico de hidrocarbonetos, de catalisadores, da secagem e muitas outras aplicações. O princípio desta tecnologia é a existência de um leito de partículas (areia), proporcionando uma grande superfície de contato entre os fluidos e o leito. Porém, isso envolve alguns conceitos prévios, entre os quais a porosidade e a esfericidade das partículas desse leito, cujas características influenciam no comportamento do leito, no presente caso, a combustão de biomassa (SANTOS, 2009).

A fluidização consiste na sustentação de uma carga de partículas sólidas numa corrente de gás ou líquido. No presente caso o fluido veiculado é um gás. Em uma coluna onde existe um leito de partículas inertes, o fluido tem um caudal ascendente e uma distribuição “fina” que, ao continuar a aumentar gradualmente, conforme FIGURA 1, algumas partículas começam a afastar-se das vizinhas em zonas preferenciais da seção da coluna, e o leito toma a designação de expandido. A uma velocidade superior ao ponto A dá-se o início do estado de fluidização e é atingida a velocidade mínima de fluidização  $U_{mf}$ .

Em velocidades superiores, devido ao aumento significativo da fricção e uma frequência elevada de choques inter-partículas do leito e do fluido, passa a haver um alto nível de desordem das partículas e a agitação no leito torna-se mais vigorosa, o leito tem a denominação de borbulhante (SANTOS, 2009).

FIGURA 1 – Perda de carga em um leito com diâmetro de partícula uniforme



Fonte: Santos (2009)

O leito em fluidização borbulhante utilizado para obtenção da SCA caracteriza-se por certa instabilidade, com formação regular de bolhas, existindo por isso duas fases, a fase das bolhas e a fase densa. O fluxo ascendente das bolhas provoca vazios entre as partículas do leito, favorecendo o movimento e a circulação intensa e vigorosa das partículas do leito (SANTOS, 2009).

## 2.4 Aspectos reológicos do concreto no estado fresco

A reologia é adotada usualmente para analisar o comportamento de fluídos, líquidos, emulsões e suspensões de partículas, correlacionando a taxa de deformação de um determinado material com a tensão a que o mesmo é submetido (KANNING, 2013).

Segundo Banfill (2003), nos materiais à base de cimento, as interações entre partículas dependem de suas formas, distribuição de tamanhos, concentração e propriedades de superfície. O aumento gradual dos parâmetros reológicos como viscosidade plástica e tensão de escoamento pode ser associado à formação tridimensional das estruturas, a redução de água no sistema, a formação dos produtos hidratados e a adição das partículas ultrafinas.

Desta forma, através do controle das propriedades reológicas do concreto no estado fresco, determina-se a qualidade do material, pois seu desempenho, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, é influenciado pelas características apresentadas logo após a mistura dos componentes (SANTOS, 2009).

Segundo Dal Molin, (2011), é pela avaliação reológica que se caracteriza o concreto por grandezas como coesão e viscosidade, onde o concreto submetido a pequenas tensões é capaz de se manter na posição original quando em estado coeso e estável quanto à segregação e à sedimentação, restringindo o movimento relativo dos grãos em estado viscoso. Tanto a coesão quanto a viscosidade advêm dos fenômenos de superfície relacionados aos grãos menores da mistura, no qual são atingidas pela introdução de adições minerais, justamente por possuir diâmetro médio menor ao do cimento. Isto acontece no caso da sílica ativa, do metacaulim e da CCA.

Em casos onde o diâmetro médio das adições minerais é semelhante ao do cimento, como a cinza volante e a sílica proveniente do beneficiamento da CCA, onde sua menor massa específica faz com que o volume da pasta de cimento seja superior ao da pasta de cimento sem adição, há uma maior coesão e maior plasticidade devido ao aumento da relação do volume dos sólidos em relação ao volume de água, resultando na redução da exsudação e segregação do concreto, pois, de acordo com Male apud Dal Molin (2011), os poros serão bloqueados pelo grande número de pequenas partículas das adições minerais, aumentando o contato sólido-sólido e tornando o concreto com adições mais coesas em relação ao concreto sem adições.

Geralmente, as misturas com elevado teor de finos dificultam a obtenção das propriedades reológicas, necessárias para atingir a autoadensabilidade, o que resulta, geralmente, em mistura com um elevado teor de cimento Portland, e, conseqüentemente, maiores valores de forças iniciais e finais, tanto maiores do que os estritamente exigidos pelo projeto. Assim, o custo dos componentes que compõem uma CAA é maior do que o concreto convencional, com a mesma resistência (VIACAVA *et al.*, 2012).

Porém, segundo Collatto (2011), para consumos de cimento Portland acima de 350 kg/m<sup>3</sup>, o aumento da coesão do concreto interfere no consumo de água do traço, não proporcionando o mesmo rendimento atingido nos traços de consumo

inferior. No entanto, segundo Dalcin (2015), a SCA e a CV, em conjunto, proporcionam coesão e homogeneidade suficientes para evitar a exsudação.

Cordeiro (2006) em suas investigações efetuou comparações entre as propriedades reológicas e mecânicas de concretos produzidos com cinzas ultrafinas de bagaço de cana-de-açúcar, em teores de substituição de cimento Portland de 10%, 15%, 20% e 40%, e concretos de referência. Os resultados mostraram que é possível produzir concretos com teor de cinza de até 40%, com a manutenção das propriedades reológicas e mecânicas, obtendo ainda melhora da durabilidade dos concretos.

## **2.5 Aspectos Reológicos do Concreto no Estado Endurecido**

No estado fresco a mistura deve apresentar trabalhabilidade adequada para que, de acordo com os meios disponíveis na obra, possa ser transportada, lançada e adensada, enquanto que, no estado endurecido, o concreto deve possuir as características especificadas no projeto (resistência, durabilidade, rigidez, retração, fluência, calor de hidratação, permeabilidade, etc.), compatíveis com as solicitações impostas. Todas essas propriedades exigidas devem ser conseguidas com o menor custo possível, para que a obra seja economicamente viável e competitiva.

As propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade são influenciadas pela microestrutura, onde o rolamento das partículas de cinzas volantes em forma de esferas são distribuídas na matriz cimentícia podendo facilitar a fluidez da pasta e, por conseguinte, melhorar a trabalhabilidade e as propriedades reológicas da mistura. No entanto, uma microestrutura mais densa pode ser esperada em idades mais elevadas, onde as reações evoluem na pasta de concreto e por formação de mais produtos por consequência das reações.

As sílicas consideradas subproduto das indústrias de manufatura exercem um efeito físico (microfíler) e um efeito químico (pozolânico) durante o processo de hidratação do cimento. A sílica de casca de arroz, assim como a sílica ativa é uma pozolana altamente reativa e eficaz em pequenas quantidades na ordem de 10 % e tende a aumentar a resistência nas primeiras idades (NEVILLE, 1997).

O ganho de resistência nas primeiras idades é favorecido em parte a uma ligeira aceleração na hidratação do cimento e nas idades finais pode ser atribuído principalmente à reação pozolânica (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Essa reação favorece o refinamento dos poros e substituição do constituinte mais fraco (hidróxido de cálcio) que é solúvel em água, por uma fase mais forte o C-S-H. A substituição do hidróxido de cálcio por C-S-H evita possíveis problemas de lixiviação. Os efeitos químicos das sílicas também estão presentes na zona de transição através do aumento da aderência. Devido a sua maior superfície específica em relação ao cimento causa o aumento do consumo de água na mistura. Nesse caso, uma alternativa é usar aditivos superplastificantes para a manutenção da relação a/c e a trabalhabilidade da mistura (NEVILLE, 1997).

Uma melhor durabilidade do concreto foi atribuída ao fato de que as partículas nano-sílica podem preencher os vazios da estrutura e atuam como núcleos para formação de fortes ligações com partículas de gel C-S-H, tornando ligações mais densas das massas da matriz, e as propriedades mecânicas em longo prazo e a durabilidade do concreto são esperam-se ser aumentada.

De um modo geral, a adição de pó de sílica e especialmente nano-partículas de sílica melhoram a estrutura dos poros do concreto. Por um lado, as partículas nano podem atuar como um agente de enchimento para aumentar a densidade do concreto, o que leva à redução da porosidade do concreto.

Sensale (2000) analisou a influência da utilização de cinza de casca de arroz nas propriedades mecânicas de concretos convencionais e de alta resistência. Os resultados mostram que o concreto com CCA possui excelente comportamento mecânico, melhor resistência a compressão aos 91 dias de idade que os concretos de referencia, resistência à tração por compressão diametral e na flexão e módulo de deformação semelhante aos concretos de referencia.

Macedo (2009) atesta em suas pesquisas que o teor de cinzas influencia diretamente na evolução do valor de resistência mecânica, sendo mais relevante quando a idade de cura varia de 7 para 28 dias, havendo tendências de acréscimos maiores no valor da relação entre resistências, considerando-se 28 dias e 7 dias, em função do aumento da relação finos/cimento. Estando em acordo com a influência das cinzas na melhoria da resistência mecânica em decorrência do efeito fíller.

Segundo Cordeiro et al. (2009), o uso de cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento Portland, até o teor de 20%, proporciona incrementos

significativos nos valores de resistência à compressão e melhoria nos parâmetros reológicos, tanto para os concretos de resistência convencional quanto para os de alta resistência.

O cimento quando substituído pela cinza ultrafina da casca de arroz proporciona incrementos nos valores de resistência à compressão do concreto de resistência convencional, principalmente em idades avançadas (90 e 180 dias). Onde os teores de 15% e 20% substituição apresentaram os melhores resultados, enquanto que a mistura com teor de substituição de 10% apresentaram comportamento intermediário entre a mistura de referência e as demais.

## **2.6 Métodos de dosagens para o CAA**

Segundo Aïtcin (2000), qualquer método de dosagem tem como objetivo a determinação de uma combinação adequada dos constituintes do concreto, para ser utilizado primeiramente como mistura experimental, mas com vistas a produzir um concreto que possa estar próximo daquele que possua, entre as várias propriedades desejadas, o menor custo.

Os métodos de dosagem utilizados para os concretos convencionais são diferentes dos métodos realizados para o CAA, porém geralmente também são obtidos empiricamente. No CAA as dosagens das misturas são norteadas pelas propriedades de fluidez ou trabalhabilidade no estado fresco.

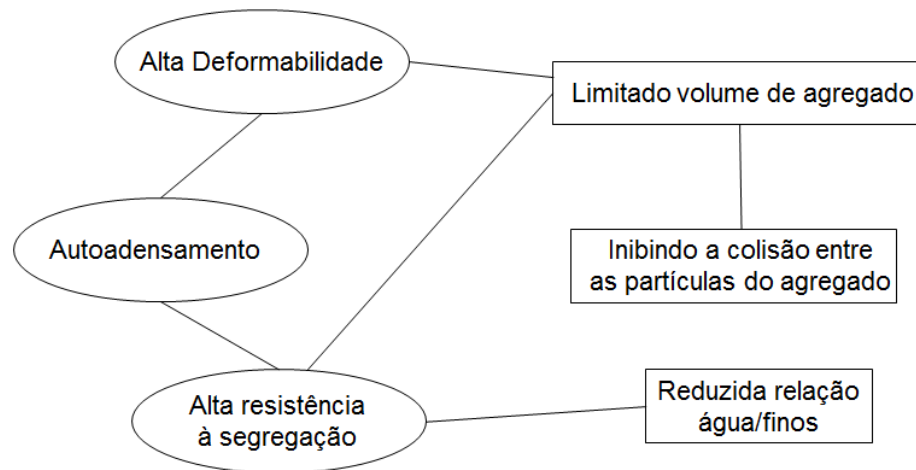
A partir do desenvolvimento do CAA no Japão surgiram diversos métodos de dosagens. Neste trabalho descrevem-se os métodos de Okamura *et. al.*, Petersson *et. al.*, Gomes e MEC.

### **2.6.1 Método Okamura *et. al.***

Segundo Okamura e Ouchi (2003), a metodologia para alcançar o CAA envolve não somente alta deformabilidade da argamassa, mas também resistência à

segregação entre o agregado graúdo e a argamassa, quando este flui nas zonas confinadas das fôrmas e entre a armadura. Os autores comparam o CAA com o concreto convencional em termos de composição. O método experimental considera que o concreto consiste em duas fases: argamassa e agregado graúdo; e que os componentes da pasta, relação água/ materiais finos e aditivo superplastificante, são decisivos para a obtenção da autoadensabilidade do CAA, além de sua resistência, Na Figura 2 está apresentado o método empregado para o alcance da autoadensabilidade.

FIGURA 2 – Método de obtenção do CAA



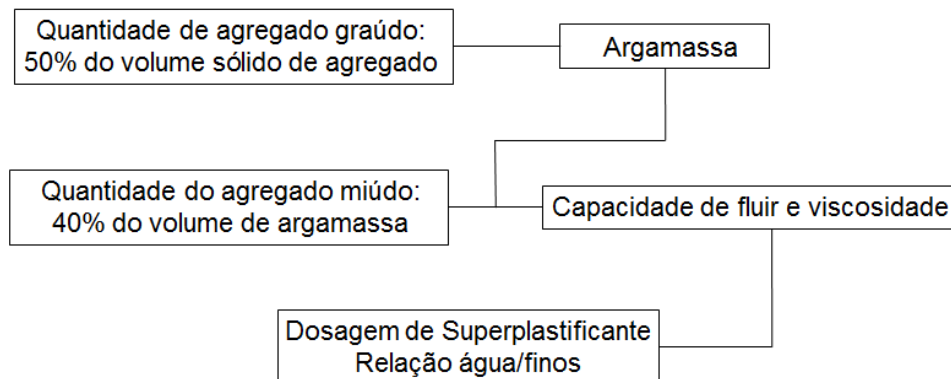
Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009)

- Os procedimentos aplicados no método para determinação das dosagens dos componentes na mistura são:
- fixar os volumes de agregados;
- assumir a relação água/materiais finos (cimento, pozolanas, filler), em volume, de 0,9 a 1,0, dependendo das propriedades dos materiais finos;
- determinar a dosagem de superplastificante e a relação água/ materiais finos, em argamassa, que atendam às propriedades de fluidez e viscosidade;
- testar a autoadensabilidade do concreto, uma vez definida a proporção da mistura, em ensaios do tipo U, espalhamento e Funil-V.

Na Figura 3, Okamura et al. (2000) descrevem o procedimento que mostra as proporções fixadas dos agregados graúdo e miúdo e as propriedades desejadas na argamassa.



FIGURA 3 – Proporções fixadas dos agregados graúdo e miúdo e as propriedades desejadas na argamassa



Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009)

Para Gomes e Barros (2009), o método de Okamura et al. parte da determinação da composição da argamassa, delimitando o volume de agregado miúdo e da atribuição de valores para as relações superplastificante/materiais finos (SP/f) e água/materiais finos ( $V_a/V_f$ ), em volume, através de ensaios na argamassa, nos quais as propriedades de alta fluidez e moderada viscosidade exigidas para a argamassa são alcançadas, variando a dosagem de SP e a relação água/materiais finos. Ensaios para avaliação da fluidez e viscosidade da argamassa foram caracterizados através dos resultados de  $T_m$  e  $R_m$ , respectivamente. Okamura e Ouchi (2003) ilustram que um valor alto de  $T_m$  indica maior deformabilidade e um baixo valor de  $R_m$  indica maior viscosidade da argamassa. As Figuras 4 e 5 ilustram as dimensões dos equipamentos para os ensaios de argamassa. As Equações 1 e 2 são as utilizadas, respectivamente, para o cálculo de  $T_m$  e  $R_m$ .

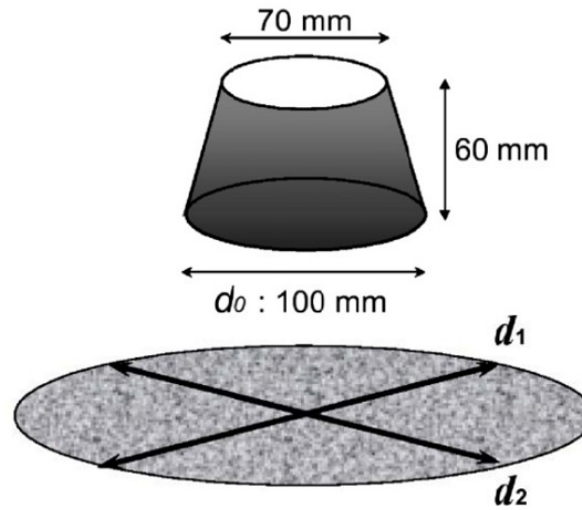
$$T_m = \frac{(d_1 \times d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

$d_1$  e  $d_2$ : medidas do diâmetro do espalhamento da argamassa;

$d_0$ : diâmetro da base do tronco de cone.

FIGURA 4 – Ensaio de espalhamento de argamassa



Fonte: Okamura e Ouchi (2003)

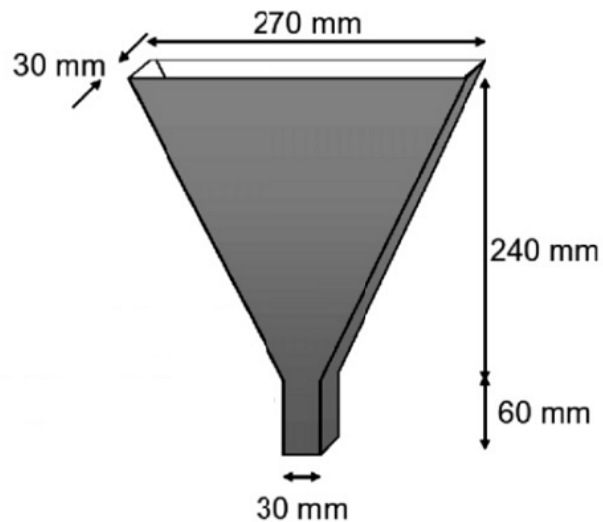
$$R_m = \frac{10}{t_1}$$

**Eq. (2)**

Onde:

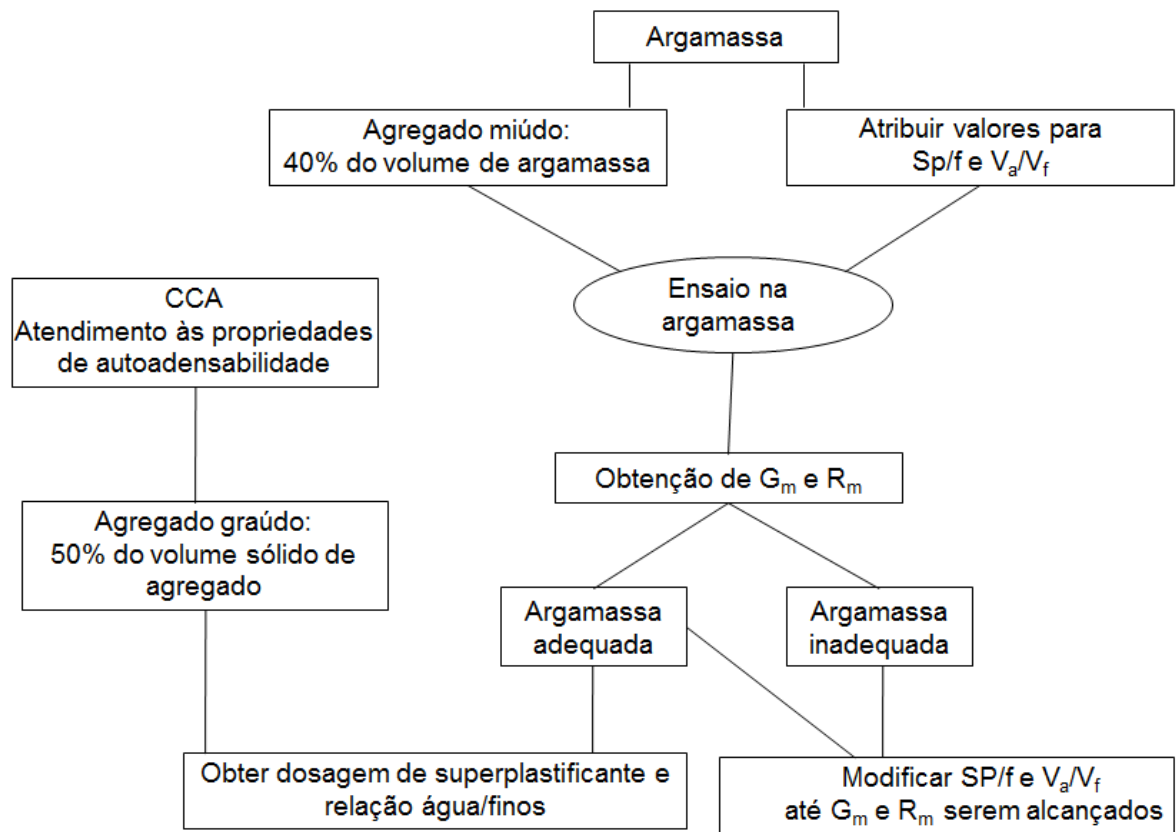
$t_1$ : tempo em segundos para a argamassa fluir através do funil

FIGURA 5 – Ensaio funil V de argamassa



Fonte: Okamura e Ouchi (2003)

Na Figura 6, apresenta-se um resumo da metodologia aplicada no método de dosagem proposto por Okamura et al.

FIGURA 6 – Resumo das etapas do Método de dosagem de Okamura *et al.*

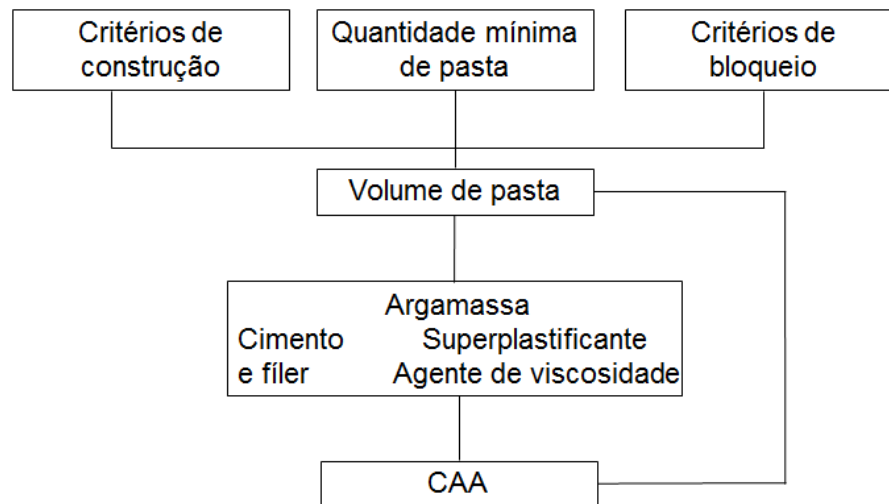
Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009)

### 2.6.2 Método de Petersson *et al.*

O método proposto consiste na determinação de um esqueleto granular e um mínimo volume de pasta, que garantam a autoadensabilidade ao concreto, comprovada pela habilidade de passagem pelas armaduras impostas no ensaio da Caixa-L e por um adequado valor no ensaio de espalhamento. As quantidades de superplastificante, água e finos (partículas < 250  $\mu\text{m}$ ) são ajustadas para alcançar a resistência à compressão desejada, obter a necessária viscosidade, e uma baixa tensão de cisalhamento, compatíveis para um comportamento de autoadensamento do concreto. Nesse método de dosagem foi calculada a quantidade mínima de pasta para determinado espaço livre entre as armaduras e utilizado fíler para criar a quantidade de pasta necessária. O bloqueio do concreto foi pesquisado através de

testes com agregados de diferentes diâmetros máximos, mantendo-se constante a quantidade de pasta. Foi estudada também a possibilidade de substituir um percentual de fíler da mistura por um agente modificador de viscosidade. O método de dosagem estabelece a quantidade necessária de pasta que deve ser utilizada para evitar o bloqueio. O método para a dosagem da mistura do CAA, proposto por Petersson et al.(1996), está esboçado na Figura 7.

FIGURA 7 – Processo simplificado para a dosagem da mistura de CAA



Fonte: Gomes e Barros (2009)

Os Critérios de Construção são determinados através dos parâmetros especiais particulares de cada projeto. Alguns deles podem ser: resistência do concreto, resistência inicial do concreto, durabilidade e espaçamento entre as armaduras. Para dada resistência de projeto do concreto é especificada a relação água/cimento, adequada para a relação normal entre a resistência do concreto e a relação água/cimento. A resistência inicial do concreto é função da relação água/cimento e do tipo de cimento especial especificado. Para atender os critérios de durabilidade são necessários o uso de tipos de cimentos especiais, de agentes incorporadores de ar e outros tipos de especificações de acordo com o caso específico. No concreto convencional o procedimento normal dos critérios de construção é dar as especificações, para a dosagem da mistura, excluindo a abertura entre as armaduras. No CAA essa informação é necessária e obrigatória.

O passo seguinte é achar o volume de pasta mínimo da mistura entre o agregado miúdo e o graúdo. Isso é feito medindo a quantidade de vazios para as diferentes relações entre os agregados miúdo e graúdo. A relação entre os

agregados miúdos e graúdos não afetam apenas a quantidade de vazios, mas também a área total de superfície de agregados. O volume de pasta mínimo deve ocupar todo o espaço vazio entre os agregados e cobrir também toda a superfície das partículas de agregado. Duas diferentes misturas de agregados miúdo e graúdo podem ter diferentes áreas de superfície, mesmo se eles tiverem o mesmo volume sólido. Uma maior superfície de agregado requer maior cobertura de volume de pasta para dar a mesma deformabilidade.

Quanto aos critérios de bloqueio foi estudado o mecanismo da fluência da argamassa por entre os vazios e do vazio da areia no bloqueio da argamassa fresca. Foi chegada a conclusão que o risco de bloqueio pode ser computado pela adição linear do efeito de cada tamanho de areia.

O cálculo do Risco de Bloqueio está apresentado na EQUAÇÃO 3.

$$(n_{si} / n_{sbi}) = 1 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

$n_{si}$  é a relação de volume de agregado do grupo de tamanho  $i$  (pelo volume total de concreto);

$n_{sbi}$  é a relação de volume bloqueado de agregado do grupo de tamanho  $i$  (pelo volume total de concreto).

A areia era definida como partículas maiores que 1/10 dos vazios aproximadamente. Partículas menores que esse tamanho, incluindo os finos, tem diferentes papéis no bloqueio que a areia. No estudo do risco de bloqueio dos agregados se chegou a uma relação  $n_{abi} / c/D_{af}$ .

Onde:

$n_{abi} = V_{abi} / V_t$ ;  $V_{abi}$  = Volume de agregado bloqueado do grupo  $i$ ;

$V_t$  = Volume total de concreto da mistura;

$c$  = Espaço vazio entre as armaduras e,

$D_{af} = M_{i-1} + 3/4.(M_i - M_{i-1})$ , onde  $M_i$  e  $M_{i-1}$  são as dimensões da peneira superior e inferior do agregado do grupo  $i$ .

Desta forma, pode-se calcular a quantidade máxima permissível de agregado para não causar bloqueio e o volume de pasta médio mínimo, correspondente para a relação entre o agregado graúdo e o agregado total de acordo com o critério de bloqueio. Nesse método além de se obter o volume de pasta mínimo no ponto da

relação ideal entre os agregados graúdo e miúdo, estuda-se também o volume de pasta ideal em função do espaço livre entre as armaduras. Os estudos do uso dos diferentes tipos de cimentos e filers, em pastas e argamassas para o CAA foram executados através da utilização de Viscosímetros. A quantidade de superplastificante para os diversos tipos de misturas é calculada através de percentuais em cima da massa de finos, enquanto que a quantidade dos agentes modificadores de viscosidade utilizados é encontrada através de percentuais em cima da massa de água.

Podem ser encontradas as quantidades adequadas de Superplastificantes e Agentes modificadores de viscosidade, para o CAA, através de testes da argamassa no Viscosímetro de pasta. O estudo das diversas misturas de concreto permite a elaboração de curvas, para cada tamanho de abertura entre as armaduras, do volume de pasta por m<sup>3</sup> de concreto (em litros) versus relação brita / total de agregado (em massa), onde nos pontos da curva e acima da curva não ocorre bloqueio. Desta forma essas curvas fornecem o volume de pasta que deve ter o concreto para cada tipo de abertura entre armaduras e para cada relação brita/agregado, para que não ocorra bloqueio.

Todos os fatores influenciam no comportamento do bloqueio. O número de barras das armaduras é de grande influência, principalmente quando a largura da caixa é constante. A recomendação é manter a quantidade de armaduras constante (3 barras) e usar 1,4 vezes da abertura entre as barras, para a abertura entre barras e parede da caixa, pelo fato do efeito de parede ser maior do que o efeito de barra. O espalhamento decresce mais rapidamente seu valor quando a quantidade de agente modificador de viscosidade é aumentada. Desta forma conclui-se que o uso do agente modificador de viscosidade só pode substituir uma quantidade de fíler, da mistura, de no máximo 10%.

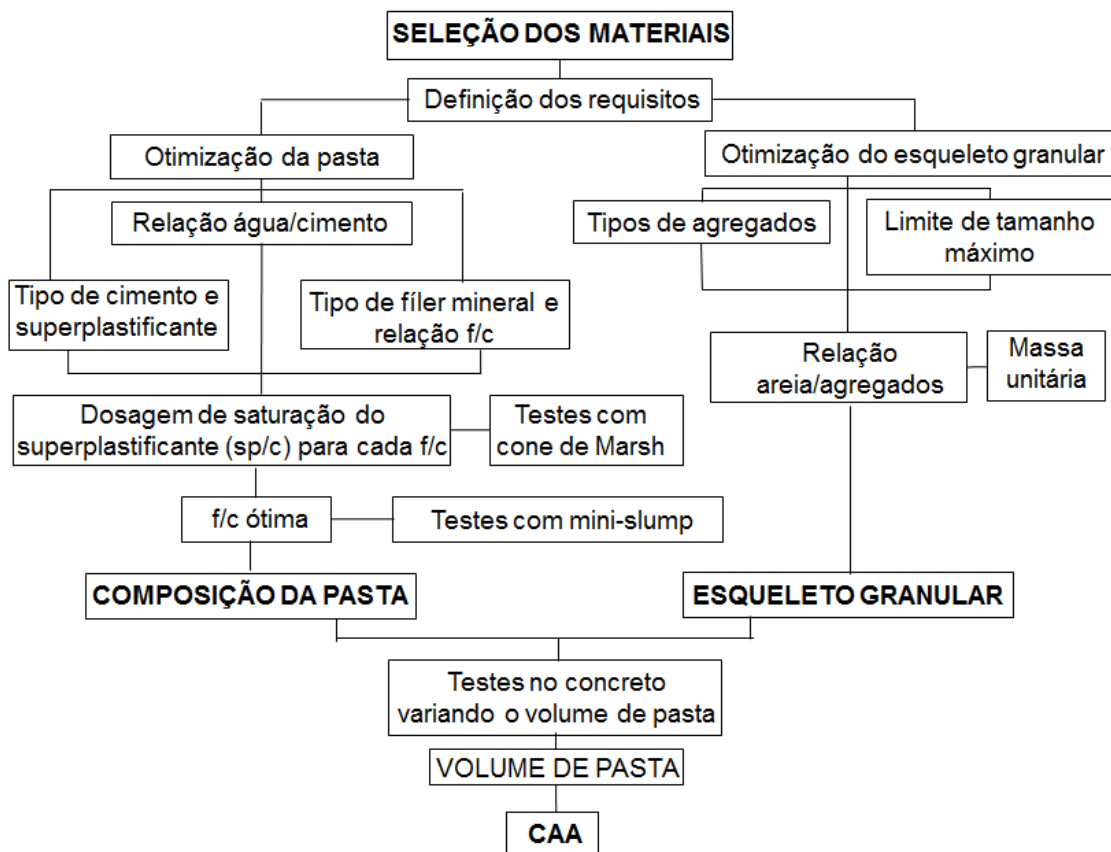
### **2.6.3 Método de Gomes, Gettu e Agulló (2003)**

A metodologia propõe a obtenção de CAA de alta resistência através da otimização da composição da pasta e do esqueleto granular em separado. Gomes e Barros (2009) sugerem, ainda, que a viscosidade e fluidez da pasta governem o

comportamento de fluxo do concreto. Para isso, é executado em três fases: seleção do conteúdo de pasta, obtenção da composição da pasta e a determinação da proporção de mistura dos agregados (GOMES e BARROS, 2009). A Figura 8 apresenta um esboço dos passos adotados pelo método.

A composição final do concreto é obtida buscando-se o conteúdo de pasta necessário para que o concreto apresente as características de um CAA. O modelo sugere que a viscosidade e a fluidez da pasta governem o comportamento de fluido do concreto.

FIGURA 8 – Diagrama do método de dosagem de Gomes *et al* (2003)



Fonte: Gomes e Barros (2009, p.145)

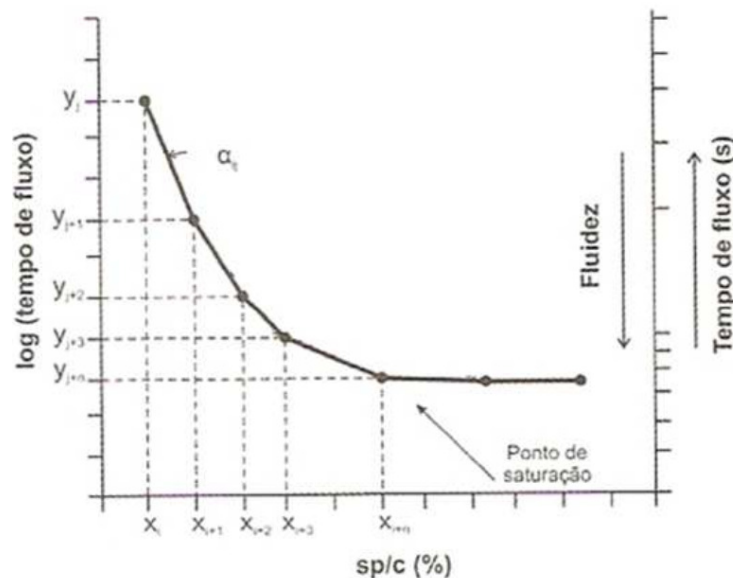
### 2.6.3.1 Seleção dos materiais

Na escolha dos materiais utilizados na mistura, deve-se atentar para as propriedades desejadas do concreto e da disponibilidade de materiais.

### 2.6.3.2 Definição da composição da pasta

Primeiramente, é escolhida uma relação a/c, conforme propriedades desejadas do concreto. A relação superplastificante/cimento (SP/c) ideal para o CAA é determinada através do ensaio do cone de Marsh, onde é medido o tempo de fluxo (T) necessário para 500 ml de pasta fluir pela abertura inferior do cone. Variando a relação SP/c na pasta, obtém-se uma curva log T versus SP/c, conforme Figura 9, com objetivo de definir o ponto de saturação da dosagem do SP.

FIGURA 9 – Exemplo da curva log T versus SP/C para determinação da dosagem de SP (Gomes *et al*, 2003)



Fonte: Gomes e Barros (2009, p.148)

A relação finos/cimento (f/c) adequada é aquela que atenda determinados requisitos do ensaio do miniabatimento: diâmetro de extensão final de 180 mm  $\pm$  10 mm e um tempo T115 (tempo que a pasta leva para alcançar a marca de 115 mm) no intervalo de 2 s a 3,5 s, e também apresente boa coesão. Verifica-se que o ponto de saturação do SP varia com a relação f/c. Portanto, para cada relação f/c, é definida uma relação SP/c ótima.

A dosagem de superplastificante é determinada através do método citado, que consiste em medir o tempo em que um (1) litro do fluido leva para escoar através do funil com diâmetro pré-determinado que, no presente estudo, correspondeu a 5 mm. As medições do tempo de escoamento da pasta são feitas



em intervalos de tempo de 5, 30 e 60 minutos, de modo a verificar as variações no tempo de fluxo de pastas com o passar do tempo. Mais detalhes podem ser obtidos em (FORMAGINI, 2005).

A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e das relações dos demais componentes da pasta em função da massa do cimento, como:

- \_ Relação água/cimento (aglomerante) (a/c);
- \_ Relação superplastificante/cimento (sp/c);
- \_ Relação pozolanas/cimento (sf/c);
- \_ Neste caso, foi utilizada sílica de casca de arroz e cinza volante (sf) e,

As equações utilizadas na obtenção das pastas são:

- \_  $P_a = (a/c) * C$ , massa de água;
- \_  $P_{sf} = (sf/c) * C$ ; massa de pozolanas;
- \_  $P_{sp} = (sp/c) * C$ , massa de superplastificante sólido;
- \_  $P_{spl} = P_{sp}/(T_{sp}/100)$ , massa do superplastificante líquido e;
- \_  $P_{asp} = P_{sp} * [(100/T_{sp}) - 1]$

Onde  $T_{sp}$  é o teor de sólido do superplastificante e  $P_{asp}$  é a massa de água contida no superplastificante. A massa de água real adicionada é corrigida subtraindo-se a água contida no superplastificante. Então, a massa de água corrigida é:  $P_{ac} = P_a - P_{asp}$ .

O volume de pasta é obtido pela EQUAÇÃO 4:

$$V_p = \frac{C}{\rho_c} + \frac{P_a}{\rho_a} + \frac{P_{sf}}{\rho_{sf}} + \frac{P_{spl}}{\rho_{sp}} - \frac{P_{asp}}{\rho_a} \quad \text{Eq. (4)}$$

### 2.6.3.3 Definição do esqueleto granular

Entende-se por esqueleto granular a composição de agregados graúdos e miúdos que constituem o concreto. O esqueleto granular é obtido experimentalmente, escolhendo a mistura não compactada com menor teor de

vazios. As proporções entre os agregados (areia e brita) encontradas no experimento são avaliadas como adequadas e serão utilizadas na confecção dos concretos.

A composição do esqueleto granular é obtida medindo-se a densidade de misturas de agregados secos não compactados e escolhendo-se a maior densidade da mistura de agregados com o menor teor de vazios.

O procedimento consiste em juntar manualmente as misturas de agregados em um misturador e, posteriormente, colocá-las em um recipiente de volume conhecido sem nenhuma compactação. A densidade aparente ou o peso unitário de diversas combinações, variando a relação percentual entre os agregados miúdos e graúdos, é medida e utilizada para determinar o teor de vazios, conforme método proposto por Gomes *et al.* (2003).

#### **2.6.3.4 Determinação da composição do CAA**

Nesta etapa, busca-se o volume da pasta suficiente para preencher os vazios entre os agregados e assegurar a distância de separação entre as partículas desses. O volume de pasta adequado é aquele que possibilita o concreto atender requisitos de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação. Os ensaios utilizados para verificar estes requisitos são espalhamento ou funil V, caixa L e Caixa U.

A escolha da relação a/c é feita em função das propriedades desejadas do concreto. Quando uma pozolana é utilizada, sua dosagem, como adição ou substituição ao cimento, depende das propriedades que se quer obter no concreto. Geralmente ela pode variar de 5% a 15% da massa do cimento (GOMES *et al.*, 2003).

#### **2.6.4 Método de Empacotamento Compressível (MEC)**

Onde sua conceituação baseia-se num modelo de empacotamento de partículas para a otimização de misturas granulares visando à máxima compacidade possível.

Segundo Formagini (2005), os métodos de dosagem de concretos com resistência normal e de alto desempenho existentes na literatura, limitam-se ao uso de poucos materiais, não abordando critérios de otimização da mistura granular, além de fornecer como produto final um material heterogêneo de baixo ou moderado desempenho. Dentro deste contexto, a utilização do método de empacotamento compressível (MEC) surge como uma ferramenta de dosagem que possibilita a seleção e otimização de vários materiais na constituição do concreto, aumentando a compacidade da mistura granular e diminuindo o risco de segregação, com objetivo de proporcionar o mais alto desempenho ao produto final que, aliado à baixa relação a/c, torna o concreto coeso e com baixa porosidade.

A utilização do MEC na dosagem de concreto de resistência normal, de alto desempenho ou altíssimo desempenho, apresenta vantagem nos seguintes aspectos:

- O desenvolvimento deste método segue princípios científicos, ou seja, é fundamentado em uma observação dos fenômenos, levantamento de hipóteses, estabelecimento de modelos matemáticos que representam os fenômenos e nas comprovações experimentais dos modelos estabelecidos;
- Possibilidade de dosar misturas com os novos materiais que atualmente são utilizados na produção dos concretos, como as sílicas, fíler, fibras, dispersantes, entre outros;
- É um método capaz de ser implementado computacionalmente.

Com base em mais de uma década de estudo de sua equipe, De Larrard (1999) conseguiu construir uma teoria que soluciona a questão de empacotamento de misturas secas em todos os componentes utilizados na dosagem do concreto. Estes estudos levaram ao desenvolvimento do MEC, que é uma versão aprimorada

dos diversos modelos de empacotamento desenvolvidos pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC).

O MEC pode ser entendido como sendo um modelo construído em dois módulos:

- No primeiro módulo é estabelecido pela dedução das relações entre os grãos para o empacotamento virtual, onde o empacotamento máximo de uma mistura polidispersa (constituída por grãos de diversos tamanhos) é obtido quando os grãos de diâmetros menores preenchem por completo os espaços vazios entre os grãos de diâmetros maiores. Define-se empacotamento virtual como sendo aquele obtido quando se arranjam as partículas uma a uma, correspondendo a um arranjo geométrico ideal. Por exemplo, caso tenham-se partículas cúbicas idênticas, consegue-se a compactação máxima, ou compacidade virtual de 100%. Caso se tenham partículas esféricas correspondendo a um arranjo cúbico de face centrada (CFC), consegue-se uma compactação ou compacidade virtual máximo de 74%, já que não é conhecido, nos dias de hoje, nenhum arranjo de esferas que permita uma compacidade maior que aquela atingida no arranjo CFC.
- No segundo módulo, são estabelecidas as relações (principalmente físicas e experimentais) que ligam as propriedades virtuais (geométricas) às propriedades reais da mistura granular submetida a um procedimento de empacotamento. Por exemplo, tomando-se um recipiente com um grande número de partículas cúbicas, não se consegue nunca, através de um processo real de compactação, obter a compactação máxima de 100% correspondendo ao arranjo virtual, o mesmo ocorrendo com as partículas esféricas que não chegariam a uma compactação de 74%. O MEC relaciona então o empacotamento virtual (que pode ser obtido através das equações do Modelo de Empacotamento Virtual) ao empacotamento real, caracterizado por um parâmetro intrínseco ao procedimento real de empacotamento adotado, que é o chamado índice de compactação (K).

O modelo assim estruturado é chamado de Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), apresentado formalmente por De Larrard, (1999).

O MEC é um modelo que permite correlacionar o máximo empacotamento possível de materiais granulares secos (empilhando todos os seus grãos um a um sem alterar a sua forma) com um procedimento físico de compactação dos grãos a

partir de um protocolo de empacotamento. A teoria do MEC foi implementada em um software (MECCOPPE\_1.0) para a otimização de misturas granulares secas em função da máxima compacidade. Os resultados fornecidos pelo MECCOPPE\_1.0 se ajustaram muito bem aos resultados experimentais obtidos por De Larrard (1999) e no presente estudo, indicando a precisão do modelo e que sua implementação computacional foi bem sucedida. Dentro do contexto desta pesquisa será usado na verificação de um traço de concreto autoadensável, que será apresentado posteriormente.

#### **2.6.4.1 Determinação da compacidade experimental**

Para a obtenção do traço do CAA são utilizados procedimentos experimentais baseados nos seguintes conceitos: A mistura é composta por um determinado número de classes granulares, sendo que cada classe granular ajusta-se dentro de uma faixa de distribuição granulométrica.

- Estudo de compatibilidade entre cimento e superplastificante, sendo que, para isso, é necessário determinar um teor ótimo de dispersante através de ensaios de fluidez de pastas de cimento utilizando o funil de Marsh.
- A quantidade mínima de água necessária para transformar a mistura pulverulenta em uma pasta fluida pode ser estimada através do ensaio de demanda de água. O índice de vazios da mistura granular seca corresponde à soma da demanda dos volumes de água, dispersante e ar aprisionado.
- Após a seleção da mistura, de acordo com a quantidade mínima de água demandada, uma quantidade ideal de água é otimizada envolvendo condições físicas mais globais como condições de lançamento e adensamento do concreto. Na prática, a quantidade de água usada para processar a mistura é um pouco maior que a quantidade teórica determinada pela demanda de água.

Os procedimentos para a otimização de concretos utilizando o MECCOPPE\_1.0 são realizados em três etapas. Primeiramente faz-se a elaboração de um banco de dados com as propriedades dos materiais. A segunda etapa

consiste na otimização do esqueleto granular dos agregados. Por fim, realiza-se a otimização da pasta da mistura com base nas propriedades desejadas para o concreto.

Onde, inicialmente, é introduzida a teoria que fundamenta o cálculo da compacidade de uma mistura granular em dois módulos: no primeiro, é estabelecida uma álgebra que deduz as relações para o empacotamento virtual; no segundo, são estabelecidas as relações (principalmente físicas e experimentais) que ligam as propriedades virtuais (geométricas) às propriedades reais da mistura granular submetida a um procedimento de empacotamento. Em seguida, aplica-se a teoria descrita nos dois módulos para o caso de misturas polidispersas contendo  $m$  materiais distribuídos em  $n$  classes (FORMAGINI, 2005).

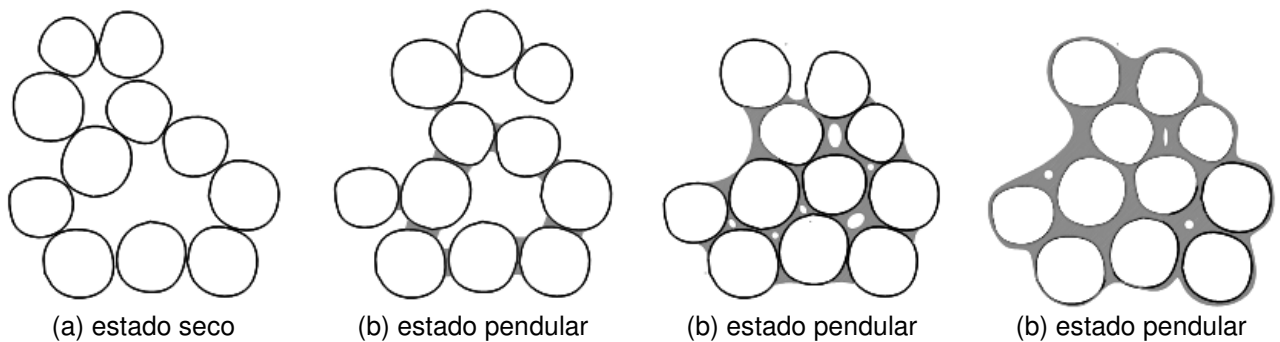
#### **2.6.4.2 Determinação da compacidade dos materiais com diâmetro $d < 100 \mu\text{m}$**

O empacotamento dos materiais compostos por partículas finas é determinado através do ensaio de demanda de água. O método consiste em adicionar água ao pó que se encontra seco, até que estes formem uma pasta homogênea. A massa de água necessária para fazer a mistura passar do estado seco a uma pasta homogênea é definida como demanda de água do material. Essa quantidade de água equivale à quantidade necessária para preencher os vazios da mistura granular seca adicionada de um pequeno excedente, o qual produz um leve afastamento entre os grãos, facilitando a sua mobilidade, isto é, permitindo que a mistura granular se torne fluida.

A compacidade de misturas formadas por partículas finas é fortemente influenciada pelas forças de superfícies e intermoleculares, cuja importância relativa à força originada do campo gravitacional (peso) depende do tamanho das partículas. A ação destas forças, assim como a influência da adição de compostos que agem quimicamente na dispersão das partículas, tem influência determinante na aplicação do MEC para a simulação de misturas granulares para a produção de qualquer tipo de concreto (FORMAGINI, 2005).

Como comentado anteriormente, o objetivo do ensaio de demanda de água é determinar qual a quantidade (em massa) de água necessária para preencher todos os vazios de uma mistura granular. A água tem, por um lado, a função de lubrificante e, por outro, a função de unir as partículas através do efeito da tensão superficial em pontes líquidas. Com a adição de água, a mistura de grãos passa por diversas fases como mostrado na FIGURA 10.

FIGURA 10 – Fases do empacotamento durante o ensaio de demanda de água



Fonte: Formagini (2005)

Segundo FORMAGINI (2005) estas fases estão descritas da seguinte forma:

A primeira fase do empacotamento corresponde ao material no estado seco. Este estado é marcado por um arranjo desordenado de partículas, conferindo ao material um alto índice de vazios. Adicionando-se água à mistura que se encontra no estado seco, inicia-se a fase denominada pendular. Neste estado a água se condensa entre os contatos dos grãos, formando pequenas pontes líquidas. O número de pontes aumenta gradativamente em função do incremento de água na mistura. Com a formação da ponte, a tensão superficial do líquido tende a unir os grãos, empacotando-os de forma aleatória. Essa fase perdura até o instante em que as superfícies de todos os grãos são molhadas por completo pela água, que é marcada pela presença de bolhas de ar no interior da mistura. A esta fase dá-se o nome funicular.

A fase capilar tem início quando todos os vazios entre os grãos são completamente preenchidos pela água (ponto de saturação). Desse ponto em diante, um simples incremento na quantidade de água da mistura irá produzir um leve afastamento entre os grãos, diminuindo a compacidade e tornando a mistura fluida. Acredita-se

que o ponto caracterizado como demanda de água do material encontra-se no início do estado capilar.

Na FIGURA 11, são mostradas fotografias das quatro fases distintas do empacotamento molhado, que ocorrem ao longo do ensaio de demanda de água do cimento. Na pasta da FIGURA 11-a, o cimento seco apresenta-se solto com porosidade elevada (fase seca). Na FIGURA 11-b, nota-se a formação de aglomerados de partículas, onde a água aprisionada em seu interior as mantém unidas (estado pendular). Na FIGURA 11-c, o cimento mostra-se brilhoso, mas não apresenta água suficiente para manter todos os grãos unidos (estado funicular). Na FIGURA 11-d, a mistura se apresenta homogênea e acredita-se que foi atingida a demanda de água de mistura, estando a mesma no início do estado capilar.

FIGURA 11 – Fases do empacotamento durante ensaio de demanda de água



(a) estado seco



(b) estado pendular



(c) estado funicular



(d) início do estado capilar  
ponto de demanda d'água

Fonte: Formagini (2005)



Este método deve ser executado de acordo com o seguinte procedimento:

- Pesar aproximadamente 350 g do material completamente seco;
- Caso haja mais de um material, homogeneizar bem a mistura;
- Colocar todo o material seco no misturador e adicionar 50% da quantidade de água prevista para atingir a demanda de água;
- Ligar o misturador em velocidade média e adicionar pequenas quantidades de água, em intervalos pré-estabelecidos de 1 minuto até formarem-se aglomerados;
- Deixar a mistura em repouso por 30 segundos. Enquanto isso, raspar o recipiente com a espátula;
- Deixar a mistura bater em velocidade alta por aproximadamente 1 minuto;
- Terminar o ensaio quando uma pasta homogênea e adensada se formar no fundo do recipiente;
- Anotar o consumo de água.
- Um tempo razoável para a realização deste ensaio é de aproximadamente 10 minutos.

Após ser determinada a quantidade de água correspondente ao estado de demanda de água, a compacidade pode ser determinada de acordo com o número de materiais constituintes da mistura.

O cálculo da compacidade experimental (C), no caso de um único material é utilizado a EQUAÇÃO (5) e para o caso de mais de um material se utiliza a EQUAÇÃO (6).

$$C = \frac{1}{1 + me_1 \frac{M_{H_2O}}{M_1}} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$C = \frac{1}{1 + \frac{me_1 me_2}{me_2 \frac{M_1}{M_T} + me_1 \frac{M_2}{M_T}} \left( \frac{M_{H_2O}}{M_T} \right)} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

$m_{e_1}$  é a massa específica do material 1 (g/cm<sup>3</sup>);

$m_{e_2}$  é a massa específica do material 2 (g/cm<sup>3</sup>);

$M_1$  é a massa do material 1 (g);

$M_2$  é massa do material 2 (g);

$M_{H_2O}$  é massa de água ao atingir o ponto de saturação (g) e,

$M_T = M_1 + M_2$  é massa total da mistura granular seca (g).

#### 2.6.4.3 Determinação da compacidade dos materiais com diâmetro $d > 100 \mu\text{m}$

A compacidade experimental das partículas com diâmetro maior que 100 $\mu\text{m}$  deve ser determinada usando-se o protocolo de empacotamento que utiliza vibração associada à compressão. Este ensaio, proposto teoricamente, por De Larrard, foi implementado por Silva (2004) e Formagini (2005) no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ através do desenvolvimento de equipamentos e adaptação do procedimento à mesa de vibração e métodos de medição.

O ensaio consiste em adicionar um volume padrão do material dentro de um cilindro com 160 mm de diâmetro e 320 mm de altura, e aplicar sobre este uma pressão constante de 10 kPa, somado a um efeito de vibração, com frequência e tempo pré-definidos. A equação que fornece o valor da compacidade real (experimental) da mistura para o protocolo descrito é dada pela EQUAÇÃO (7).

$$C = \frac{4 M_s}{\pi D_c^2 h \rho_s} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

$\rho_s$  é a massa específica do material;

$M_s$  é a massa do material seco;

$D_c$  é o diâmetro interno do cilindro;

$h$  é a altura final da camada do material compactado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa e os métodos experimentais utilizados nos estudos da pasta, da composição do esqueleto granular, das propriedades do CAA no estado fresco e da resistência mecânica no estado endurecido.

#### 3.1 Matéria-prima

##### 3.1.1 Agregados

Foi utilizado como agregado miúdo areia quartzosa de rio proveniente da região central do estado do Rio Grande do Sul. As amostras utilizadas nos ensaios de caracterização física foram obtidas seguindo a metodologia das normas NBR NM 26 (2001) Agregados – Amostragem e NBR NM 27 (2001) Agregados – Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório. As características físicas do agregado miúdo utilizado são apresentadas na TABELA 2.

TABELA 2 – Características físicas do agregado miúdo

Agregado	Características	Resultados	Normalização
Areia Fina	Diâmetro máximo (mm)	2,40	NBR NM 248/2003
	Módulo de finura	2,06	
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,56	NBR NM 52/2003
	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,50	
	Absorção de água (%)	0,81	NBR NM 30/2001
	Teor de material pulverulento (%)	0,83	NBR NM 46/2001
	Impurezas orgânicas	Sem presença	NBR NM 49/2001

Fonte: Próprio Autor

Como agregado graúdo, utilizou-se um único tipo de agregado, brita 0 de origem basáltica proveniente da região central do estado do Rio Grande do Sul. Foram realizados ensaios de caracterização física seguindo a metodologia das

normas NBR NM 26 (2001) Agregados – Amostragem e NBR NM 27 (2001) Agregados – Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório. As características físicas do agregado miúdo utilizado são apresentadas na TABELA 3.

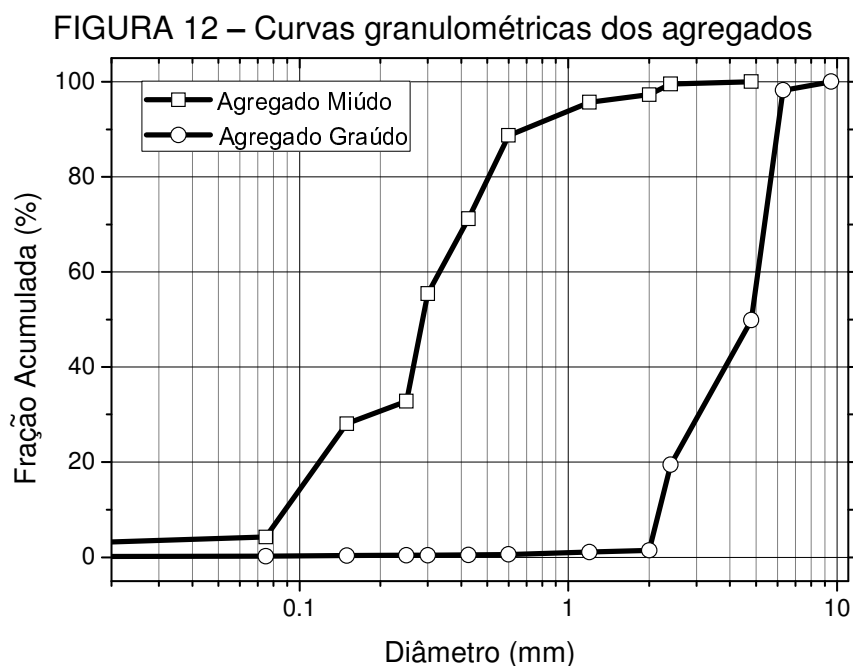
TABELA 3 – Características físicas do agregado graúdo

Agregado	Características	Resultados	Normalização	
Pedrisco (Brita 0)	Diâmetro máximo (mm)	9,50	NBR NM 248/2003	
	Módulo de finura	5,79		
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,70		
		Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	NBR NM 53/2009
		Absorção de água (%)	3,94	
		Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,33	NBR NM 46/2001
		Teor de material pulverulento (%)	0,04	NBR NM 46/2001

Fonte: Próprio Autor

Os ensaios para a obtenção das distribuições granulométricas dos agregados (graúdos e miúdos) foram realizados seguindo o procedimento indicado pela norma NBR NM 248/2003.

Na FIGURA 12 são apresentadas as curvas das composições granulométricas dos agregados miúdo e graúdo utilizados neste trabalho.



Fonte: Próprio Autor

### 3.1.2 Materiais aglomerantes

Os materiais com características aglomerantes utilizados e caracterizados para a produção do CAA foram: cimento CPV ARI-RS, sílica de casca de arroz e cinza volante.

#### 3.1.2.1 Cimento Portland

Utilizou-se neste trabalho o cimento brasileiro CPV-ARI-RS da marca Votoran mostrado na FIGURA 13, cimento este usado frequentemente nas indústrias de pré-moldados no Brasil, por possuir uma alta resistência inicial e ser resistente a sulfatos em ambientes agressivos, além de possuir uma quantidade mínima de adições (entre 0 e 5% de material carbonático), segundo NBR 5733 (1991).

FIGURA 13 – Cimento CPV ARI – RS



(a) Embalagem apresentado comercialmente



(b) Aparência do material

Fonte: Próprio Autor

Este cimento foi utilizado por possuir uma quantidade mínima de adições, uma granulometria compatível com os demais materiais aglomerantes e por fornecer respostas mais rápidas quanto à atividade pozolânica da SCA.

O melhor cimento para realizar este estudo seria o CP I por ser o mais puro, porém não se encontra no mercado local. Da mesma forma, não foi possível conseguir no mercado local o cimento que não fosse RS (resistente a sulfatos) porque seria um cimento mais puro que o adotado.

As principais características do cimento do lote 075904 com data de fabricação agosto/2014, segundo dados fornecidos pela Votoran, são: Finura Blaine de 498,5 m<sup>2</sup>/kg, massa específica de 2,98 g/cm<sup>3</sup>, área superficial de 1700 m<sup>2</sup>/kg. resistência média à compressão de 24,2; 34,6; 39,7 e 48,3 MPa nas idades 1, 3, 7 e 28 dias, respectivamente, para a relação água/aglomerante (w/aglom) 0,45.

A distribuição granulométrica do cimento foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Pavimento - COPPE/UFRJ, utilizando-se o equipamento granulômetro a laser da marca Malvern, modelo Mastersizer 2000. O ensaio foi realizado com dispersão por via úmida (dispersante Ethanol), analisado em uma faixa de tamanho de partículas de 0.02µm para 2000µm. Esta curva é apresentada na FIGURA 17 juntamente com as curvas das adições minerais para uma melhor visualização da distribuição do tamanho dos grãos.

### **3.1.2.2 Sílica da casca de arroz**

Para esta pesquisa foi utilizada a SCA proveniente da empresa Sílica Verde do Arroz Ltda., do Município de Alegrete-RS (FIGURA 14).

FIGURA 14 – SCA comercializada pelo Grupo Pilecco Nobre com nome comercial Sílica Nobre



(a) Embalagem apresentado comercialmente

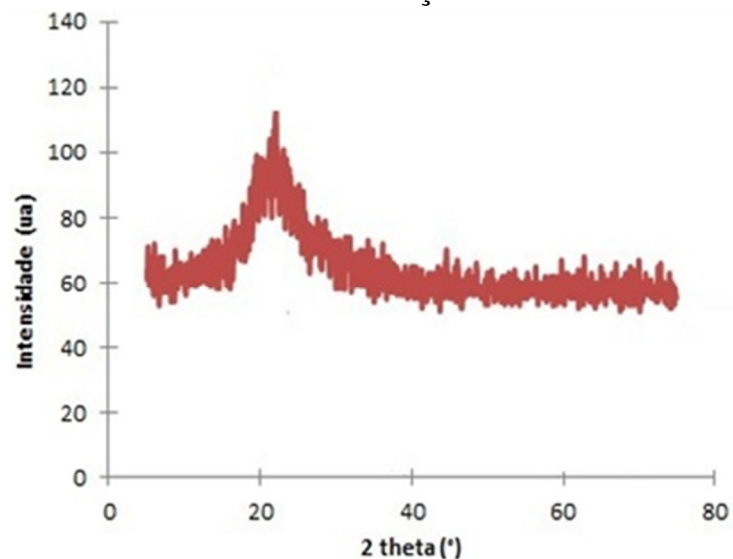


(b) Aparência do material

Fonte: Próprio Autor

A área superficial para a sílica da casca do arroz, é de aproximadamente 21000m<sup>2</sup>/kg, encontrada por Marangon *et al.* (2013). Estes autores também realizaram a análise de difração de raios-X da SCA mostrada na FIGURA 15. De acordo com a FIGURA 15, é possível observar que a SCA apresenta uma estrutura tipicamente amorfa, uma vez que o difratograma mostra um alargamento dos seus picos e o aparecimento de bandas.

FIGURA 15 – Análise de difração de raios-X da SCA.



Fonte: Marangon *et al.* (2013)

A massa específica da SCA foi determinada por meio do frasco de Le Chatelier de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NM 23/2001, onde foi obtido o valor 2,16g/cm<sup>3</sup>.

As características químicas da SCA, assim como também os valores de perda ao fogo e área específica estão apresentadas na TABELA 4.

TABELA 4 – Composição química da sílica da casca de arroz.

<b>Componente</b>	<b>Composição</b>
Perda ao Fogo	3,50%
Dióxido de Silício - SiO <sub>2</sub>	91,48%
Óxido de Cálcio - CaO	0,36%
Óxido de Magnésio - MgO	0,32%
Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05%
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00%
Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O	0,04%
Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O	1,40%
Óxido de Manganês - MnO	0,32%
Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>	0,15%
Pentóxido de Difósforo - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,45%
Área Específica	21142m <sup>2</sup> /kg

Fonte: Marangon *et al.* (2013)

A NBR 12653 (2015), que classifica os materiais pozolânicos, lista algumas exigências químicas e físicas com as quais estes materiais devem estar em conformidade. Segundo esta norma, o limite máximo de perda ao fogo para as pozolanas é de 6%. Observa-se na TABELA 4 que para a sílica em estudo esse valor está abaixo do especificado em norma. Além disso, a SCA apresenta um somatório dos compostos SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 91,53%, atendendo à exigência da norma, que é de no mínimo 50% do somatório destes compostos. Outros teores limites apresentados na norma são 4% de Anidrido Sulfúrico (SO<sub>3</sub>) e 1,5% de Óxido de Sódio (Na<sub>2</sub>O), e os valores obtidos como mostrados na TABELA 4, são de 0,15% para (SO<sub>3</sub>) e 0,04% para (Na<sub>2</sub>O) estando bem abaixo do especificado.

O fator mais determinante para a utilização da sílica de casca de arroz é o teor de 91,48% de (SiO<sub>2</sub>) que reagirá com o hidróxido de cálcio proveniente das reações de hidratação do cimento Portland, formando silicatos de cálcio hidratado (CSH) adicionais.



A distribuição granulométrica da SCA foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser no Laboratório de Geotecnia e Pavimento - COPPE/UFRJ, utilizando-se o equipamento granulômetro a laser da marca Malvern, modelo Mastersizer 2000. O ensaio foi realizado com dispersão por via úmida (dispersante Ethanol), analisado em uma faixa de tamanho de partículas de  $0.02\mu\text{m}$  para  $2000\mu\text{m}$ . A curva de granulometria é apresentada na FIGURA 17, juntamente com as curvas do Cimento Portland e da cinza volante.

### 3.1.2.3 Cinza Volante

Foi empregada a Cinza Volante proveniente da combustão do carvão mineral utilizado na termoeletrica Presidente Médici, por ser um rejeito comumente aproveitado na produção de CAA para melhorar as propriedades reológicas no estado fresco. Na FIGURA 16 mostra a aparência in natura da cinza volante empregada neste trabalho.

FIGURA 16 – Cinza Volante proveniente da Usina Termoeletrica Presidente Médici



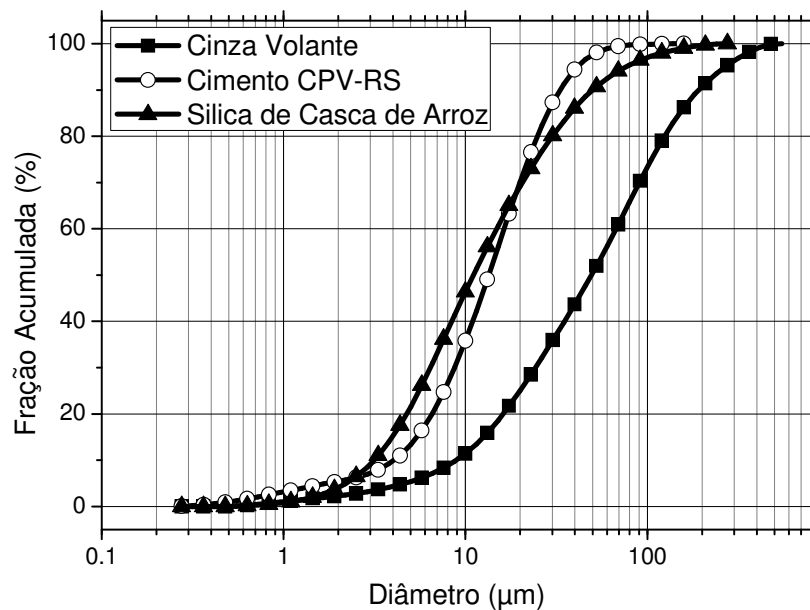
Aparência do material *in natura*

Fonte: Próprio Autor

A massa específica da Cinza Volante foi determinada por meio do frasco de *Le Chatelier* de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NM 23/2001, onde foi obtido o valor  $1,98 \text{ g/cm}^3$ .

A distribuição granulométrica da Cinza Volante foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser no Laboratório de Geotecnia e Pavimento - COPPE/UFRJ, utilizando-se o equipamento granulômetro a laser da marca Malvern, modelo Mastersizer 2000. O ensaio foi realizado com dispersão por via úmida (dispersante Ethanol), analisado em uma faixa de tamanho de partículas de  $0.02\mu\text{m}$  para  $2000\mu\text{m}$ . Essa curva granulométrica, juntamente com as do Cimento Portland e as SCA são apresentadas na FIGURA 17.

FIGURA 17 – Comparativo entre as curvas granulométricas do material aglomerante



Fonte: Próprio Autor

Como pode ser visto na Figura 17, a sílica de casca de arroz e o cimento CPV ARI - RS possuem praticamente a mesma distribuição granulométrica, porém a SCA tem uma dispersão em relação ao diâmetro médio levemente superior ao do cimento. A cinza volante possui diâmetros maiores que os dos materiais citados, o que pode ajudar a preencher os espaços vazios deixados entre os materiais aglomerantes e os agregados miúdos.

### 3.1.3 Aditivos químicos

Entre os principais tipos de aditivos químicos utilizados na produção de concreto estão: superplastificantes, plastificantes, aceleradores e retardadores de pega, incorporadores de ar, modificadores de viscosidade e ainda outros tipos de aditivos, tais como: hidrofugantes, impermeabilizantes, inibidores de corrosão, expansores e redutores de retração, utilizados normalmente em aplicações mais específicas, podendo assim conferir aos concretos desempenhos diferenciados, quando necessário.

Aditivos superplastificantes ou redutores de água de alta eficiência são componentes essenciais do CAA. Contudo, outros aditivos tais como os modificadores de viscosidade também possuem grande aceitação na produção deste tipo de concreto.

#### 3.1.3.1 Superplastificante

Nesta pesquisa foi utilizado o dispersante à base de policarboxilato mostrado na FIGURA 18. Esse produto tem teor de sólidos de 30,0 %, massa específica de 1,073 g/cm<sup>3</sup> e pH 6,2, segundo dados fornecidos pela Grace Brasil Ltda.

FIGURA 18 – Superplastificante (Grace ADVA™ CAST 525)



Fonte: Próprio Autor

O método utilizado para avaliar o ponto de saturação e o teor ótimo de superplastificante foi o ensaio de fluidez de pastas através do uso do Funil de Marsh, utilizado por Aïtcin (2000).

### 3.1.3.2 Modificador de viscosidade

Foi adicionado à mistura úmida, durante a produção dos concretos, um agente modificador de viscosidade (VMA) em pó, de nome comercial Rheomac UW 410, fabricado pela empresa BASF. O Rheomac UW 410 é um produto com base química de polímeros de celulose de alto peso molecular. A FIGURA 19 mostra uma imagem do agente modificador de viscosidade Rheomac UW 410.

FIGURA 19 – Agente modificador de viscosidade Rheomac UW 410



Fonte: Próprio Autor

## 3.2 Produção das amostras

Após todo o processo de coleta, caracterização e preparação dos materiais que farão parte da constituinte dos concretos, foram confeccionadas a partir do método de dosagem escolhidas para produção do CAA amostras de argamassas e concretos que serão submetidos aos ensaios específicos no estado fresco e endurecidos.

### 3.2.1 Dosagem pelo Método de Gomes *et al.* (2003)

O objetivo principal deste trabalho é dosar um concreto com propriedades autoadensáveis baseado em de um método de dosagem que possibilite a máxima otimização da composição da pasta e do esqueleto granular, separadamente.

O método de dosagem proposto por Gomes *et al.* (2003), foi escolhido por apresentar um procedimento de caráter experimental para obtenção da dosagem do concreto autoadensável.

#### 3.2.1.1 Ensaio de eficiência e ponto de saturação do superplastificante

O método utilizado para avaliar o ponto de saturação e o teor ótimo de um determinado tipo de dispersante sobre as partículas de cimento e/ou materiais aglomerantes é o ensaio de fluidez de pastas, através do uso do funil de Marsh (GOMES e BARROS, 2009). A FIGURA 20 ilustra os equipamentos utilizados no ensaio.

FIGURA 20 – Ensaio de eficiência e ponto de saturação do cimento com o dispersante



(a) Misturador tipo industrial



(b) Funil Marsh e proveta de 1 litro

Fonte: Próprio Autor.

Além da avaliação do ponto de saturação do cimento CP V ARI-RS, foram realizados ensaios de pastas produzidas com cinza volante e sílica de casca de arroz com diferentes dosagens de superplastificante e diferentes porcentagens de substituição de CP por SCA. Estes ensaios foram realizados para avaliar o teor de superplastificante necessário para dispersar as partículas destes pós.

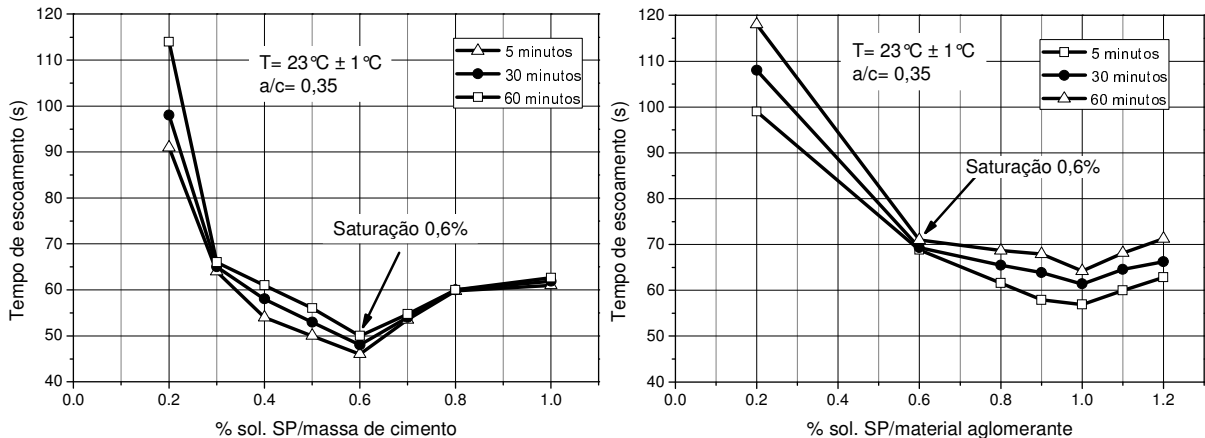
O ensaio para avaliar o tempo de fluxo de pastas produzidas foi realizado com uma relação água/material aglomerante de 0,35. Os resultados mostram que o superplastificante é compatível e eficiente para dispersar as partículas dos materiais utilizados para composição do concreto.

De acordo com De Larrard (1999), quando adições minerais são utilizadas em conjunto com o cimento Portland, pode ocorrer uma mudança no ponto de saturação e/ou no tempo de escoamento nas misturas cimentícias. Como se pretende utilizar, no presente estudo, uma blenda de materiais aglomerantes, foi realizado também o ensaio para obtenção do ponto de saturação de uma blenda ternária (75% de cimento, 25% de SCA e 15% de CV) com o superplastificante à base de policarboxilato.

A FIGURA 21-a e FIGURA 21-b mostram, as curvas tempos de escoamento *versus* o teor de dispersante relativo aos ensaios de compatibilidade executados em pastas de cimento.

Como se observa nestas figuras foi obtido o ponto de saturação a um teor de 0,6% de superplastificante para uma mesma relação água/material aglomerante (0,35). Nas FIGURA 21-a e FIGURA 21-b, nota-se que as pastas apresentaram os pontos ótimos da dosagem de superplastificante bem definidos, com ângulos internos da curva no ponto de saturação dentro do estabelecido por Gomes *et al.* (2003), isto é,  $140^\circ \pm 10^\circ$ . Porém, o tempo de escoamento da mistura com 80% de cimento, 15% de CV e 25% de SCA foi 32% maior do que o do cimento CP V ARI-RS, que pode ter sido motivado pela maior área superficial da SCA, a qual proporcionou uma maior viscosidade, fazendo com que aumentasse o tempo de escoamento.

FIGURA 21 – Curvas de saturação (a) cimento CP V ARI-RS; (b) Materiais aglomerantes: 15% adição de CV e 25% substituição de SCA ao cimento.



Fonte: Próprio Autor.

Os resultados obtidos através do ensaio Marsh indicam que quando ocorreu a substituição de 25% de cimento por sílica de casca de arroz, não houve alteração do ponto de saturação, porém aumentou o tempo de escoamento (FIGURA 21-b), observando-se que tanto na pasta com substituição de cimento por SCA quanto na pasta sem substituição foi acrescentado 15% de cinza volante em massa referente ao cimento ou material aglomerante.

### 3.2.1.2 Determinação do esqueleto granular

A composição selecionada foi obtida experimentalmente, seguindo os procedimentos descritos por Gomes *et.al.* (2003) e mostrados na FIGURA 22-a e FIGURA 22-b.

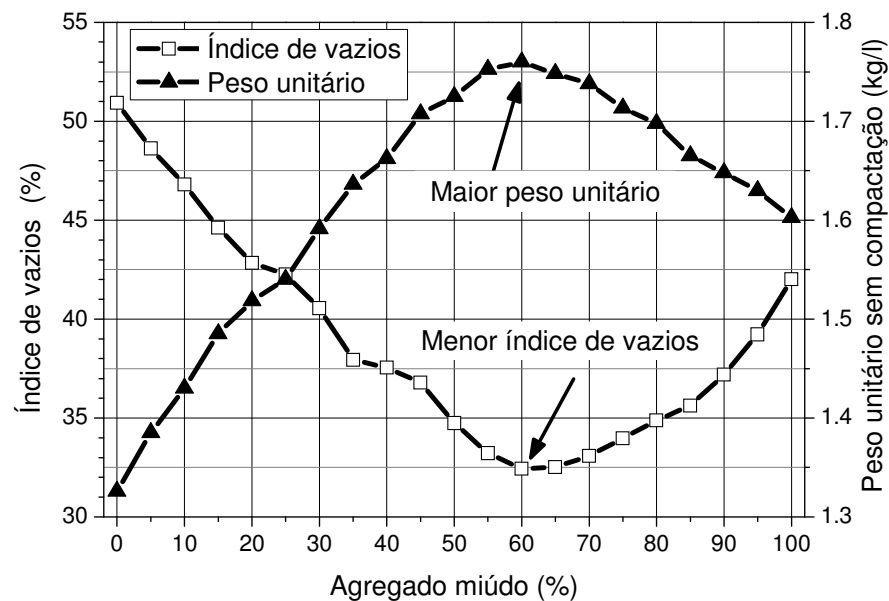
FIGURA 22 – Realização do ensaio de determinação do esqueleto granular



Fonte: Próprio Autor

A partir das densidades e do peso dos agregados foi obtido o peso unitário e o volume de vazios de cada mistura, conforme mostrado na FIGURA 23.

FIGURA 23 – Relação do menor índice de vazios versus percentagem de agregado miúdo.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com o procedimento descrito, a relação encontrada, para o menor volume de vazios entre os agregados miúdo e graúdo, foi de 60% e 40%, respectivamente, resultando na maior massa unitária sobre as misturas (1,768 kg/l), conforme a FIGURA 23



### 3.2.1.3 Definição da composição da pasta

O volume de pasta inicial foi definido em função do volume necessário para o desenvolvimento dos ensaios. A relação a/c definida e a dosagem do aglomerante foram fixadas em função do volume de pasta necessário.

A relação água/aglomerante de 0,45 foi utilizada levando em conta a maior classe de agressividade que o concreto pode vir a sofrer (classe IV), (NBR 6118/2014). Lembrando que, segundo a NBR 12655/2015, cimentos resistentes a sulfatos como o CP V ARI - RS devem ser utilizados obrigatoriamente em concretos expostos a condições severas de agressividade, com a máxima relação água/cimento de 0,45 em massa, nos concretos com agregado normal.

### 3.2.1.4 Composição do concreto pelo Método de Gomes

Com base nos resultados foi definida a utilização de 0,6% de superplastificante na produção do concreto. Quanto à composição dos agregados no concreto, a partir do menor volume de vazios entre os agregados miúdo e graúdo, que foi de 32,44%, as proporções obtidas pelo esqueleto granular foram de 60% de agregado miúdo (areia) e 40% de agregado graúdo (pedrisco).

Em base no trabalho de Gomes *et. al* (2003) foi decidido colocar 15% em massa de cinza volante para melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco é ter uma mistura mais coesa.

Como mencionado no item anterior à relação água/aglomerante utilizada é de 0,45 para o concreto realizado. Baseado em Marangon (2011) foi utilizado 254ml por m<sup>3</sup> de concreto do agente modificador de viscosidade (VMA) antes descrito. O Traço de CAA obtido pelo método de Gomes *et al.* (2003) é apresentado na TABELA 5.

TABELA 5 – Traço de CAA obtido pelo método de Gomes *et al.* (2003)

Nomenclatura	C00
Materiais	Referência (kg)
Cimento	351,44
SCA	0,00
CV	62,02
Areia	1059,52
Pedrisco	706,35
Água	180,27
Superplastificante	8,27
VMA	0,254

Fonte: Próprio Autor.

### 3.2.2 Utilização do método do empacotamento compressível (MEC) para validar a dosagem definida por Gomes *et al.* (2003)

A validação da dosagem do concreto autoadensável definida por Gomes *et al.* (2003) foi efetuada através de verificação seguindo o conceito do método do empacotamento compressível (MEC) utilizado para dosagem de concretos normais e concretos de alto e altíssimo desempenho.

A verificação da mistura granular em função da máxima compactidade foi realizada utilizando-se o MECCOPPE\_1.0.

Como proposto por Formagini (2005), para produção do CAA foram utilizados dois protocolos de empacotamento:

- Demanda de água - utilizando-se um misturador de bancada, e outro de compactação mecânica com vibração, utilizando-se um cilindro e uma mesa vibratória. O protocolo de demanda de água é utilizado para materiais compostos por partículas finas ( $d < 100 \mu\text{m}$ ) como cimentos, ou adições minerais e materiais em pó.
- Compactação mecânica com vibração - é utilizado para materiais compostos por grãos de diâmetro ( $d > 100 \mu\text{m}$ ) como agregados miúdo e graúdo.

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio de demanda de água são: um misturador de bancada (FIGURA 24), uma balança com precisão de 0,01g, uma pisseta com capacidade para 500 ml para água e duas espátulas.

FIGURA 24 – Misturador de bancada utilizado no ensaio de demanda de água



Fonte: Próprio Autor

Como pode ser visto na FIGURA 17 tanto o cimento como a CV e a SCA tem diâmetros inferiores a 100  $\mu\text{m}$  pelo que deve ser feito a análise da demanda d'água.

A compacidade experimental ( $C$ ) dos materiais com dimensões inferiores a 100  $\mu\text{m}$  está apresentada na TABELA 6. A compacidade desses materiais foi determinada sem dispersante, através método de demanda d'água proposto por De Larrard (1999).

O ensaio tem por objetivo obter uma pasta com o máximo empacotamento das partículas, proporcionado pela adição progressiva de água na mistura até atingir a condição de pasta saturada. Mais detalhes podem ser obtidos em Formagini (2005). Os valores foram encontrados utilizando a EQUAÇÃO 2.

A TABELA 6 apresenta a compacidade experimental dos materiais aglomerantes. Os valores encontrados indicam que o uso de dispersante aumenta a compacidade do material. O teor de superplastificante utilizado é referente ao ponto de saturação.

TABELA 6 – Compacidade dos materiais finos

Material	Massa Material (g)	Massa H <sub>2</sub> O (g)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Compacidade
Cimento CPV RS	350	98,158	2,98	0,545
Sílica de Casca de Arroz	350	197,998	2,12	0,455
Cinza Volante	350	123,668	1,92	0,596

Fonte: Próprio Autor

A compacidade experimental das partículas maiores que 100µm foi determinada usando-se o protocolo de empacotamento proposto por De Larrard, (1999), que utiliza energia de prensagem e vibração (índice K=9). A FIGURA 25 ilustra os procedimentos do ensaio para a obtenção da compacidade experimental do material.

FIGURA 25 – Procedimento do ensaio de compacidade para agregados com dimensões maiores que 100 µm



Fonte: Próprio Autor

Segundo a proposição de De Larrard (1999), o ensaio é realizado em diversos mono-tamanhos, que são obtidos utilizando os grãos compreendidos entre as peneiras da série normal (NM ISO 3310-1 1997).

Com a finalidade de permitir uma caracterização o agregado miúdo foi dividido em classes consideradas como mono-tamanhos. Estas classes foram chamadas de frações, onde fração fina representa partículas de diâmetro de 0,01 a 0,3 mm, fração média representa as partículas de diâmetro de 0,3 a 0,6 mm, e

fração grossa representa a classe de agregados com as partículas de diâmetro de 0,6 a 4,8mm.

Os valores experimentais da compactidade do agregado miúdo são apresentados na TABELA 7, assim como a altura final (h) de cada camada compactada. Os resultados de compactidade dos agregados miúdos apresentados na TABELA 7 foram obtidos a partir da distribuição das frações dos agregados miúdos apresentadas na curva granulométrica (FIGURA 12).

TABELA 7 – Compactidade do agregado miúdo.

Parâmetros	Fração Fina	Fração Média	Fração Grossa
	0,01 a 0,3 mm	0,3 a 0,6 mm	0,6 a 4,8 mm
Camada Compactada – h (mm)	92,5	90,6	86,5
Compactidade Real – C (K = 9)	0,641	0,642	0,671

Fonte: Próprio Autor

Assim como o agregado miúdo, os agregados graúdos foram divididos em classes consideradas como mono-tamanhos. Estas classes foram chamadas de frações, onde a fração fina representa partículas de diâmetro de 0,01 a 6,3 mm e a fração grossa representa a classe de agregados com as partículas de diâmetro de 6,3 a 12,5mm.

Os resultados de compactidade dos agregados graúdos apresentados na TABELA 8 e foram obtidos a partir da distribuição das frações dos agregados graúdos apresentadas na curva granulométrica (FIGURA 12).

TABELA 8 – Compactidade do agregado graúdo

Parâmetros	Fração Fina	Fração Grossa
	0,01 a 6,3 mm	6,3 a 12,5 mm
Camada Compactada – h (mm)	244,4	254,4
Compactidade Real – C (K = 9)	0,567	0,541

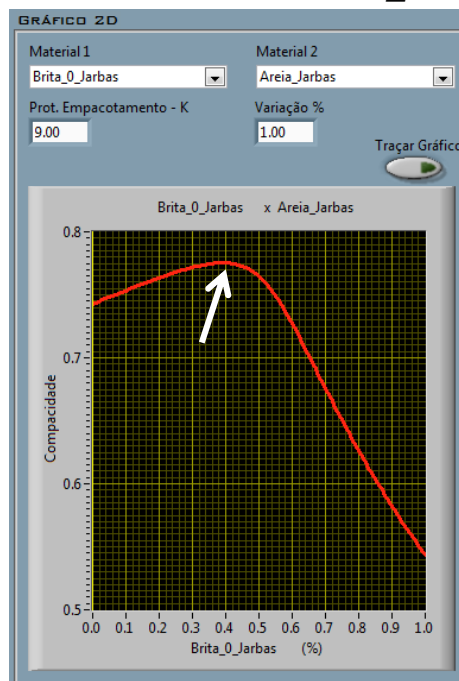
Fonte: Próprio Autor

### 3.2.2.1 Simulações realizadas com o MECCOPPE\_1.0

#### *Esqueleto granular*

Na FIGURA 26 é demonstrado o máximo empacotamento entre os agregados graúdos e miúdos obtido através do software *MECCOPPE\_1.0*. Observa-se que o pico da curva (ver seta na FIGURA 26) encontrasse para a porcentagem de 40% de agregado graúdo e 60% de agregado miúdo, sendo estes os mesmos valores de empacotamento encontrados pela determinação do esqueleto granular e índice de vazios seguindo os procedimentos apresentados na NBR NM45 (2006).

FIGURA 26 – Gráfico com o máximo empacotamento dos agregados obtido através do software *MECCOPPE\_1.0*



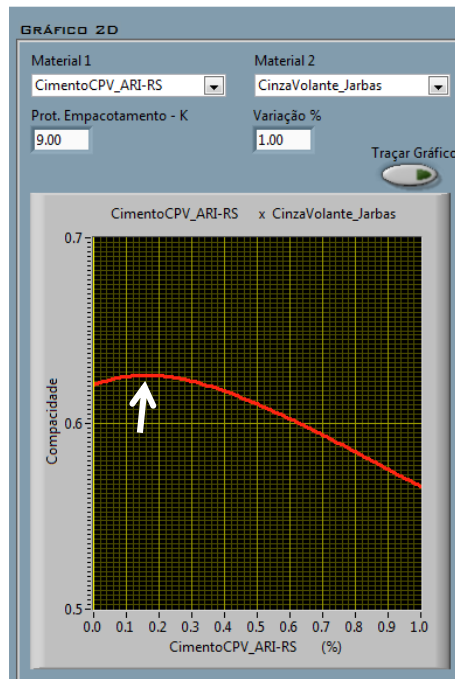
Fonte: Próprio Autor.

#### *Relação cinza volante – CP*

Na FIGURA 27 é demonstrado o máximo empacotamento entre o cimento e a cinza volante obtido através do software *MECCOPPE\_1.0*. Observa-se que o máximo empacotamento entre esses dois elementos se dá para uma proporção de 15% de cimento Portland e 85% de cinza volante.

Neste trabalho, foi colocado em ênfase a influência da sílica de casca de arroz nas propriedades do CAA, por isto em todas as misturas foi colocada a mesma quantidade de CV para comparar somente os ganhos relativos a substituição de cimento por SCA.

FIGURA 27 – Gráfico com o máximo empacotamento entre o Cimento e a cinza volante obtido através do software *MECCOPPE\_1.0*



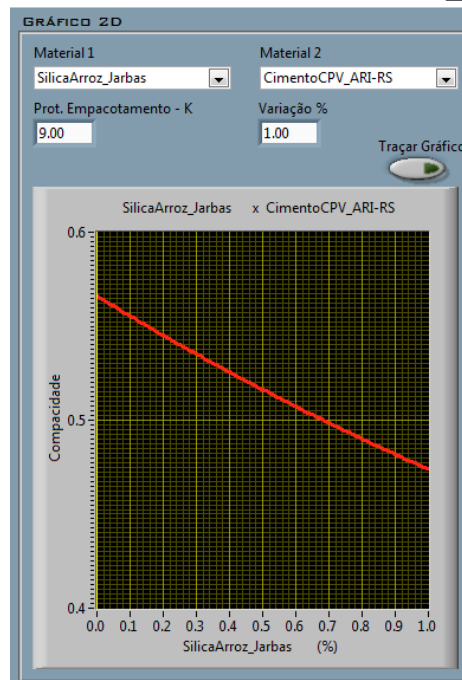
Fonte: Próprio Autor.

### **Substituições de Cimento por SCA**

Na FIGURA 28 é demonstrado o máximo empacotamento entre o cimento e a SCA, obtido através do software *MECCOPPE\_1.0*. O empacotamento da mistura binária mostra uma variação linear para quantidades de cimento entre 0 e 50% de substituições de SCA por cimento, depois destes valores a curva de compacidade aparenta em leve concavidade até chegar ao 100% de substituição.

Cabe salientar que a compacidade sempre diminui, sendo assim, o efeito físico de substituir o cimento por SCA é sempre desfavorável.

FIGURA 28 – Gráfico com o empacotamento entre o Cimento e a SCA obtido através do software *MECCOPPE\_1.0*



Fonte: Próprio Autor.

Com base em estudos realizados por Gomes *et al.* (2003), Colatto (2011) e Marangon et al. (2013), que estudaram substituições de cimento Portland por cinza e sílica de casca de arroz, foi adotado para este trabalho teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%.

Assim, foram analisadas 6 misturas constituídas de 15% de adição de cinza volante em massa sobre o peso dos aglomerantes, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de substituição de cimento CPV-ARI-RS por sílica de casca de arroz, além do traço referência (100% cimento), todos com uma relação água/aglomerante de 0,45 taxas fixas de agregado miúdo, agregado graúdo, superplastificante e agente modificador de viscosidade.

Os traços definidos assim como as quantidades de cimento e SCA utilizados em cada traço estão apresentadas por m<sup>3</sup> de concreto na TABELA 9. Onde também está descrita a denominação a ser utilizada ao longo de todo o trabalho das misturas analisadas.

Na última linha da TABELA 9 se apresentam os valores de compacidade real obtidas utilizando o software *MECCOPPE\_1.0*, para cada um dos traços definidos.



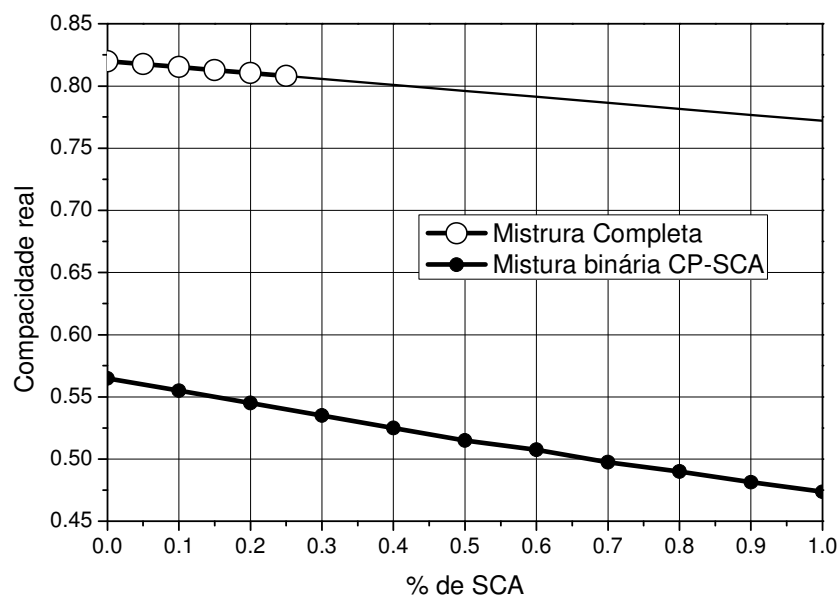
TABELA 9 – Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto (kg/m<sup>3</sup>)

Nomenclatura	C00	C05	C10	C15	C20	C25
Materiais (kg)	Referência	5% subst.	10% subst.	15% subst.	20% subst.	25% subst.
Cimento	351,44	333,87	316,30	298,73	281,15	263,58
SCA	0,00	17,57	35,14	52,72	70,29	87,86
CV	62,02	62,02	62,02	62,02	62,02	62,02
Agregado Miúdo	1059,52	1059,52	1059,52	1059,52	1059,52	1059,52
Agregado Graúdo	706,35	706,35	706,35	706,35	706,35	706,35
Água	180,27	180,27	180,27	180,27	180,27	180,27
Superplastificante	8,27	8,27	8,27	8,27	8,27	8,27
VMA	0,254	0,254	0,254	0,254	0,254	0,254
Compacidade real MECCOPPE_1.0	0,8199469	0,8176280	0,8152879	0,8129276	0,8105534	0,8081657

Fonte: Próprio Autor.

Na FIGURA 29 se mostra a variação da compacidade real com o aumento de substituição de CP por SCA tanto para a mistura binária CP-SCA como para os traços a serem estudados neste trabalho. Na figura se apresenta com linha clara a compacidade para quantidades de substituição maiores às analisadas neste trabalho. Pode-se observar uma diminuição linear da compacidade na medida em que se aumenta quantidade de SCA agregada na mistura, comportamento similar ao obtido na mistura binária CP-SCA.

FIGURA 29 – Gráfico com o empacotamento para a mistura completa e para a mistura binária CP-SCA. Dados obtidos através do software *MECCOPPE\_1.0*



Fonte: Próprio Autor.

### **3.3 Ensaaios Mecânicos**

#### **3.3.1 Ensaaios no Estado Plástico**

Os ensaios utilizados no estudo e controle dos concretos convencionais no estado fresco não são suficientes para caracterizar o CAA, sendo necessária a realização de outros ensaios específicos que foram desenvolvidos, exclusivamente, para avaliar se o concreto possui as características autoadensáveis.

Os requisitos estabelecidos ao concreto, para ser considerado autoadensável, são aqueles que atendem às seguintes propriedades: capacidade de preenchimento, capacidade de fluidez entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação. Os ensaios utilizados para avaliar as propriedades foram de espalhamento (cone de Abrams) e Funil-V, ambos para capacidade de preenchimento; Caixa-L, para capacidade de passagem por armaduras e Caixa-U para medir a fluidez e a habilidade de o CAA passar por obstáculos sem segregar.

##### **3.3.1.1 Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento pelo Método do Cone de Abrams conforme NBR 15823-2 (2010)**

O Método do Cone de Abrams, segundo NBR 15823-2 (2010), tem o objetivo de avaliar visualmente (qualitativamente) a segregação do CAA, resultando no espalhamento da massa de concreto, obtido pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro realizadas em milímetros. Simultaneamente é realizada a verificação do tempo de escoamento ( $t_{500}$ ), que é o intervalo de tempo, em segundos, entre o início e o final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde (200 mm), até cobrir totalmente a marca circular de diâmetro 500 mm (dF) da placa de base, conforme FIGURA 30.

FIGURA 30 – Ensaio de espalhamento pelo Cone de Abrams



Fonte: Próprio Autor.

Na TABELA 10 encontram-se os valores e classes de espalhamento conforme NBR 15523-1 (2010) e na TABELA 11 encontram-se os valores e classes de viscosidade plástica, definidas na mesma norma.

TABELA 10 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação segundo NBR 15823-1: 2010.

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Fonte:NBR 15823-1:2010

TABELA 11 – Classes de viscosidade plástica aparente  $t_{500}$  (sob fluxo livre) segundo NBR 15823-2: 2010.

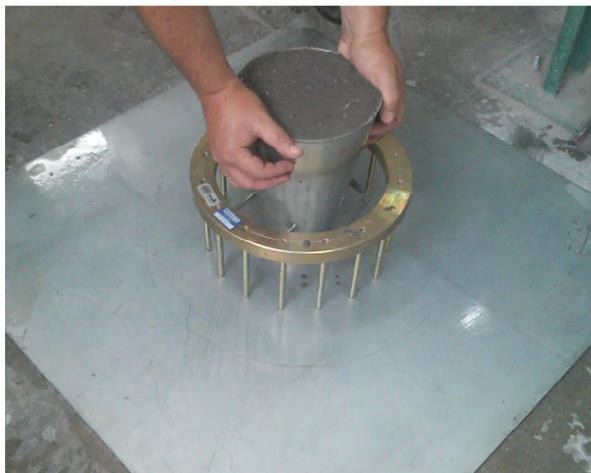
Classe	$t_{500}$ (s)
VS 1	$\leq 2$
VS 2	$> 2$

Fonte:NBR 15823-1:2010

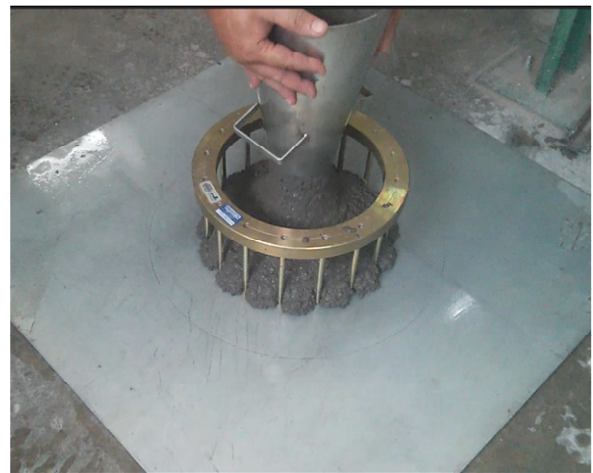
### 3.3.1.2 Determinação da habilidade passante pelo Método do Anel J conforme NBR 15523-3 (2010)

O Método do Anel J, segundo a NBR 15823-3 (2010), tem o objetivo de avaliar a habilidade passante. Neste ensaio também é utilizado o Cone de Abrams, porém o fluxo é dificultado pelos pinos fixados no anel conforme FIGURA 31-a, onde a posição do cone pode ser da forma invertida como na FIGURA 31-b ou como na FIGURA 30-a, com o maior diâmetro voltado para cima. O resultado do ensaio consiste em determinar a diferença entre o diâmetro médio do espalhamento obtido bo ensaio previsto na ABNT NBR 15823-2 (sem o anel J) e neste ensaio (com o anel J), onde o diâmetro final (dF), seja atingido pela massa de concreto, por meio da média aritmética de duas medidas (em milímetros) realizadas em direções perpendiculares.

FIGURA 31 – Ensaio Anel J



(a) Tronco de Cone Invertido



(b) Início ensaio de espalhamento com Anel J



(c) Concreto espalhando entre os obstáculos



(d) Espalhamento total

Fonte: Próprio Autor.

TABELA 12 – Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre) segundo NBR 15823-3: 2010.

Classe	Anel J (mm)
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço

Fonte:NBR 15823-3:2010

### 3.3.1.3 Determinação da habilidade passante pelo Método da Caixa L conforme NBR 15523-4 (2010)

O Método da Caixa L, segundo NBR 15523-4 (2010), tem o objetivo de determinar a habilidade passante do CAA, em fluxo confinado, mas também tem relação com a capacidade de preenchimento. Sua medição é feita da seguinte maneira: depois de cessado o escoamento, deve-se medir as alturas H1 e H2 e calcular a habilidade passante (HP), isto é, a razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da câmara horizontal (FIGURA 32).

FIGURA 32 – Ensaio Caixa L



(a) Caixa L preenchida com concreto



(b) Ensaio em andamento

Fonte: Próprio Autor.

A habilidade passante é definida pela capacidade do concreto fluir sem perder sua uniformidade ou causar bloqueio em espaços confinados, considerando a geometria da armadura. Na TABELA 13 se encontram os valores e classes de habilidade passante caixa L.

TABELA 13 – Classes de habilidade passante caixa L (sob fluxo confinado) segundo NBR 15823-4: 2010.

Classe	Caixa L (H2/H1)
PL 1	≥ 0,80 com duas barras de aço
PL 2	≥ 0,80 com três barras de aço

Fonte:NBR 15823-1:2010

### 3.3.1.4 Determinação da habilidade passante pelo Método do Funil V conforme NBR 15523-5 (2010)

O Método do Funil V, segundo NBR 15523-5 (2010), tem o objetivo de determinar a viscosidade plástica aparente do concreto, pois é de extrema importância quando se requer bom acabamento superficial ou quando a densidade de armadura for expressiva. O CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido espalhamento, porém de curta duração. Por sua vez, o CAA com alta viscosidade pode continuar a se mover de forma lenta e progressiva por um tempo mais prolongado. A viscosidade pode ser avaliada tanto pelo método descrito na NBR 15823-2 quanto pelo tempo medido no ensaio do Funil V. Aplicando o CAA preparado com agregado graúdo de dimensão máxima característica, menor ou igual a 20 mm, permitindo observar a facilidade do fluxo do concreto, sendo que, quanto menor o tempo medido, maior a fluidez do concreto (FIGURA 33).

FIGURA 33 – Ensaio Funil V



(a) Medição do tempo após a liberação concreto



(b) Concreto na caixa após fluir pelo Funil V

Fonte: Próprio Autor.

Na TABELA 14 se apresentam as Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado) segundo NBR 15823-5: 2010.

TABELA 14 – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado) segundo NBR 15823-5: 2010.

Classe	Funil V (s)
VF 1	< 9
VF 2	9 a 25

Fonte:NBR 15823-1:2010

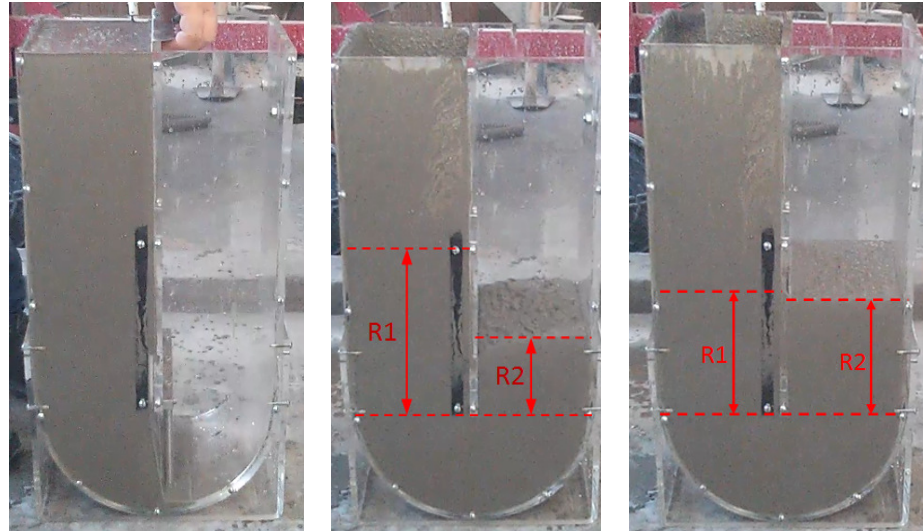
### 3.3.1.5 Determinação da fluidez e habilidade passante pelo Método da Caixa-U conforme EFNARC (2002)

O Método da Caixa-U, não possui normatização brasileira, foi desenvolvido pela Technology Research Centre of the Taisei Corporation in Japan e definido pela federação europeia EFNARC (2002). Serve para medir a fluidez e a capacidade do concreto de passar por obstáculos sem segregar. Nesse ensaio, o grau de adensabilidade pode ser indicado pela altura que o concreto alcança após fluir através de obstáculos. O ensaio da Caixa-U é mais apropriado para detectar concretos com maior possibilidade de segregação entre o agregado graúdo e a argamassa.

A Caixa-U (FIGURA 34) é posicionada sobre uma superfície estável e nivelada. O interior da Caixa-U é molhado com uma esponja ou toalha úmida, na qual qualquer excesso de água deve ser removido. A Caixa-U é preenchida com uma amostra representativa de CAA no estado fresco, cerca de 16 litros, sem vibração ou compactação externa de qualquer natureza, através do compartimento da esquerda do aparato, com a porta de passagem fechada. Após o período de espera de um minuto, a porta deslizante é aberta, fazendo com que o concreto escoe através das armaduras para o outro compartimento. Assim que o movimento se estabilizar, medem-se as alturas  $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente, a altura do material que ficou no compartimento da esquerda e a altura de material no compartimento da direita. A autoadensabilidade do CAA é avaliada através das duas alturas obtidas,  $R_1$  e  $R_2$ , conforme a EQUAÇÃO 8.

$$R_U = R_1 - R_2 \quad \text{Eq. (8)}$$

FIGURA 34 – Ensaio Caixa U



Fonte: Próprio Autor.

O  $R_U$  para o CAA deve estar entre 0 e 3 cm. Quanto maior a capacidade de preenchimento do CAA, mais próximo de zero será o valor de  $R_U$ , indicando que o concreto tem autoadensabilidade.

### 3.3.2 Ensaios no Estado Endurecido

Para a determinação das propriedades do concreto no estado endurecido, foram verificadas as resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral.

#### 3.3.2.1 Resistência à compressão axial

Para a verificação do efeito da substituição de cimento Portland por SCA na resistência à compressão axial, foram estudados os seis traços nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias. Após o preparo dos concretos, foram moldados 5 (cinco) corpos-de-prova cilíndricos de (10 cm x 20 cm) para cada mistura e cada tempo a ser



analisada, para serem submetidos a ensaio de compressão axial, confeccionados e adensados conforme NBR 5738 (2015).

A cura inicial dos corpos-de-prova foi durante um período de 24 horas, com a permanência dos concretos no interior dos moldes. Desmoldados, os corpos-de-prova foram acondicionados em tanque de imersão, onde permaneceram até as datas dos ensaios. Os ensaios foram efetuados em uma máquina de ensaios EMIC PC150 no Laboratório de Materiais de Construção Civil – Unipampa / Campus Alegrete, mostrada na

FIGURA 35, com velocidade de carregamento de 0,50 MPa/s seguindo a NBR 5739 (2007).

FIGURA 35 – Visão geral da Prensa Emic PC 150



Fonte: Próprio Autor

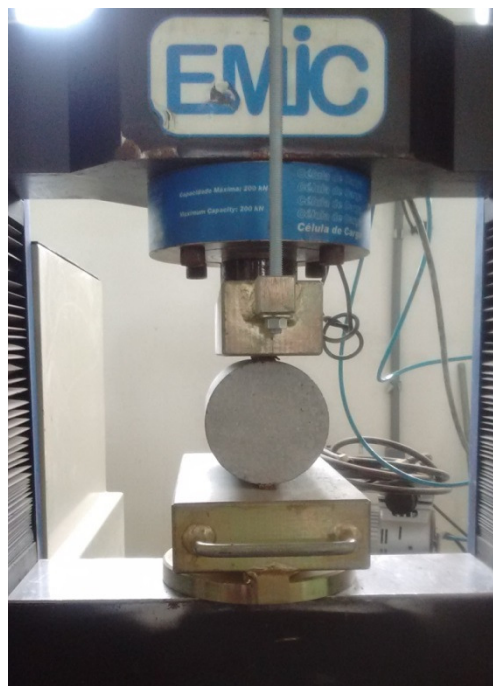
Neste ensaio foram medidos os valores máximos de resistência à compressão axial, dados esses adquiridos pelo sistema de aquisição HBM spider 8 interligados à célula de carga de capacidade de 1,5 MN.

### 3.3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para a avaliação da influência da substituição de cimento Portland por SCA na resistência à tração por compressão diametral, foram ensaiados cinco corpos-de-prova cilíndricos 10 cm x 20 cm aos 7, 28, 56 e 91 dias para cada um dos 6 traços estudados.

Os ensaios foram efetuados em na Máquina de Ensaio Universal EMIC DL20000 no Laboratório de Materiais de Construção Civil – Unipampa / Campus Alegrete, mostrada na FIGURA 36, com velocidade de carregamento de 0,05 MPa/s seguindo a NBR 7222 (2011).

FIGURA 36 – Visão geral da Prensa Emic DL 20000



Fonte: Próprio Autor

Neste ensaio foram medidos os valores máximos de resistência à tração por compressão diametral, dados esses adquiridos pelo sistema de aquisição próprio da respectiva máquina, com célula de carga de capacidade de 200 kN e obtidos através do ensaio de cinco corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) para cada mistura e cada tempo a ser analisada.

### **3.4 Análise estatística dos dados**

A verificação da existência de diferenças reais entre os teores de SCA e idade de rompimento foi feita mediante a Análise da Variância (ANOVA) de dois fatores. Quando as variáveis apresentarem diferença significativa será utilizado uma comparação múltipla das médias. Para mais detalhes ver Montgomery e Runger, (2003).

### **3.5 Viabilidade econômica quanto à substituição de cimento Portland por SCA**

O alto preço do cimento Portland, em virtude do contexto da economia do carbono, em que as empresas deverão imputar gastos sobre os materiais que produzem ao custo da sua poluição, vai influenciar a competitividade dos concretos executados com adições e/ou substituições face aos seus equivalentes de matriz cimentícia. Em termos de custo por metro cúbico, o panorama só começa a se alterar a partir de um aumento do custo expressivo do cimento, o que quer dizer que tão cedo dificilmente o cimento Portland perderá a sua competitividade. No entanto se a análise for feita em termos de razão do custo/resistência do concreto, com um aumento do custo do cimento, as adições e/ou substituições já se tornam uma alternativa efetiva. Além disso, deve ser levado em conta que a utilização de concretos com resistências superiores as resistências convencionais, permitem consideráveis reduções do consumo de aço e do próprio consumo de concreto, por redução da secção (TORGAL *et al.*, 2005).

A averiguação da existência ou não da viabilidade econômica de produzir CAA a partir da substituição de cimento Portland por SCA ficou restrito apenas à sílica da casca de arroz, uma vez que a cinza volante é um rejeito produzido a partir da queima de carvão mineral utilizado na usina termoeletrica da região, fato que dificultou muito o estabelecimento de um provável preço de comercialização, além de estar nas mesmas quantidades em todos os concretos. A sílica de casca de arroz

pelo contrário, já é disponível comercialmente pela empresa que a produz, o que permitiu prever com maior exatidão o seu preço de aquisição na região oeste do RS.

O cálculo do custo de produção de 1m<sup>3</sup> de concreto, levando-se em conta apenas o custo dos materiais, foi baseado na EQUAÇÃO 9 retirada de Barata (1998) e realizado a partir dos preços médios de aquisição da região.

$$C = (c \times \$c) + (sca \times \$sca) + (a \times \$a) + (p \times \$p) + (c \times a/c \times \$\text{água}) \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

C = custo do concreto por m<sup>3</sup>, em R\$;

\$c = custo por kilogramo de cimento CP V ARI; em R\$;

\$sca = custo por kilogramo de SCA; em R\$;

\$a = custo por kilogramo de agregado miúdo; em R\$;

\$p = custo por kilogramo de agregado graúdo; em R\$;

\$\text{água} = custo por litro de água potável; em R\$;

a/c = relação água/aglomerante da mistura;

c, sca, a, p = quantidades de cimento, SCA, agregado miúdo e agregados graúdos empregados por m<sup>3</sup> de concreto.

Utilizando a EQUAÇÃO (9) se analisa o custo de cada concreto para verificar qual é o mais econômico a assim definir qual é o melhor traço considerando este aspecto.

Como se observa na TABELA 9, todos os traços têm as mesmas quantidades de cinza volante, agregados graúdo e miúdo, água, superplastificante e agente modificador de viscosidade, variando somente as quantidades de cimento Portland e sílica de casca de arroz. Desta forma a expressão da EQUAÇÃO (10) será simplificada e a diminuição percentual do custo será calculada da seguinte forma:

$$RC\% = \frac{sca(\$c - \$sca)}{\$c} \quad \text{Eq. (10)}$$

### 3.6 Quantidades de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais aglomerantes utilizados no CAA

Foi utilizado para quantificar a emissão de CO<sub>2</sub> geradas o Método para Quantificação das Emissões de CO<sub>2</sub> (Método QE-CO<sub>2</sub>), onde é possível calcular as emissões geradas a partir do consumo de energia necessária para extração, processamento e transporte dos materiais. O Método QE-CO<sub>2</sub> consiste em uma fórmula geral (EQUAÇÃO 11), que é adaptada para cada material analisado em três Níveis de precisão de estimativas: Nível Básico, Nível Intermediário e Nível Avançado. Os materiais analisados foram o cimento individualmente e o posteriormente o concreto em toda sua formulação. Foram utilizados dados disponíveis na literatura (fatores FE, FEC e FEP) (COSTA, 2012).

Neste trabalho será utilizado o Nível Básico, que embora gere estimativas pouco precisas, é o mais elementar dentre os três níveis propostos. Ele é calculado quando estão disponíveis somente valores médios, a nível nacional, sobre consumo de energéticos, transporte e/ou composição química dos materiais.

$$\text{Emissões PROD, } j = \text{QT}_j \times \text{FP}_j \times \text{FEP}_j \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

Emissões PROD,  $j$  = emissões de CO<sub>2</sub> devido à utilização de determinado produto  $j$  em edificações, no Nível Básico, em toneladas de CO<sub>2</sub>;

QT $j$  = quantidade de produto  $j$ , em toneladas;

FP $j$  = fator de perda do produto  $j$ , adimensional;

FEP $j$  = fator de emissão de CO<sub>2</sub> devido à utilização de determinado produto  $j$  em Nível Básico, em toneladas de CO<sub>2</sub> / tonelada de produto  $j$ .

COSTA (2012) define que os fatores de emissão FEP<sub>cimento</sub>, no Nível Básico, corresponde a 0,6518 t CO<sub>2</sub>/t produto e o indicador global de perda de material (FP) na obra, por material corresponde a 95% em média.

Nos traços que contêm SCA deveria ser agregada a emissão de CO<sub>2</sub> deste material. Porém, nas indústrias de beneficiamento de arroz, a queima da casca de arroz é utilizada diretamente na secagem do arroz, através do calor gerado pelos

gases quentes passantes em um secador e na produção de vapor para utilização na parboilização do próprio grão. Se a queima for controlada em leito fluidificado, o “resíduo” do processo passa a ser um subproduto, a SCA. Desta forma é possível considerar que a produção da SCA para ser utilizada no concreto, não gera emissão de CO<sub>2</sub>, que segundo Mayer (2009) deve ser ainda considerado como um fator positivo.

Desta forma neste trabalho somente se quantificará a partir do peso de cimento utilizado em cada traço, o volume de CO<sub>2</sub> que deixaria de ser emitido na atmosfera, com a EQUAÇÃO 11.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo se analisam as misturas aglomerantes alternativas, as quais se baseiam na substituição parcial de cimento por sílica de casca de arroz e compará-las com uma mistura aglomerante de referência, composta por cimento Portland CP V ARI - RS. Cabe salientar que todas as misturas utilizadas têm adição de cinza volante.

Com a mistura de referência, totalizam-se seis misturas diferentes, as quais foram moldadas na relação água/aglomerante 0,45, permitindo um comparativo quantitativo da modificação das propriedades no estado fresco e dos valores de compressão axial e tração por compressão diametral das misturas entre si e com a mistura referencial.

### 4.1 Resultados dos parâmetros reológicos no estado fresco

Na TABELA 15 são apresentados os resultados obtidos dos parâmetros reológicos no estado fresco do CAA para as diferentes substituições, assim como os limites estabelecidos nas normas e explicados no item 3.5.1.

TABELA 15 – Resultados obtido dos CAAs no estado fresco

<b>Misturas</b>	<b>Espalhamento (mm)</b>	<b>T500mm (s)</b>	<b>Anel J (mm)</b>	<b>Funil V (s)</b>	<b>Caixa L (H2/H1)</b>	<b>Caixa U (R1-R2)(mm)</b>
C00	680	6,0	25	12,5	0,80	5
C05	680	6,0	30	10,5	0,82	6
C10	670	5,5	25	10,0	0,85	7
C15	675	5,5	30	10,5	0,84	7
C20	650	7,0	15	13,0	0,85	9
C25	645	8,0	15	14,5	0,83	10
<b>NBR 15823</b>	<b>550-850</b>		<b>0-50</b>	<b>Máx 25</b>	<b>Mín 0,80</b>	<b>Máx 30mm</b>

Fonte: Próprio Autor

Da análise dos resultados apresentados na TABELA 15, verifica-se que todos os concretos satisfizeram às normas quanto aos ensaios de espalhamento, segregação, viscosidade e fluidez através da Caixa U (R1-R2), demonstrando um concreto coeso, homogêneo e com trabalhabilidade compatível com concreto do tipo autoadensável. Desta forma todas as substituições estudadas neste trabalho podem ser utilizadas sem prejudicar à qualidade no estado fresco do CCA.

É possível observar que todas as misturas apresentaram boa retenção de água e nenhuma segregação, conforme FIGURA 37.

Como mostrado na TABELA 15, as misturas de CAA produzidas neste estudo tiveram o diâmetro de fluxo de espalhamento variando entre 645 mm e 680 mm, que foi determinado tomando a média dos dois diâmetros de fluxo medidos do concreto fluído. Os diâmetros de fluxo de espalhamento das misturas de CAA versus conteúdos SCA em diferentes níveis de substituição ao CP são apresentados na FIGURA 38-a. Nesta figura se observa que o aumento da substituição de CP por SCA houve uma diminuição do diâmetro de espalhamento.

Na FIGURA 38-b se mostra a Habilidade Passante pelo Anel J para cada mistura. O comportamento da curva mostrado nessa figura é similar ao mostrado na FIGURA 38-a.

A SCA contém partículas de tamanho similar ao cimento (ver FIGURA 17), porém a área superficial dela é muito superior ao do cimento (21000 m<sup>2</sup>/kg e 1700 m<sup>2</sup>/kg respectivamente). Esta característica da SCA (maior área superficial) aumenta o consumo de água quando é utilizado na produção de concreto.

De acordo com NBR 15823-1 (TABELA 10), as misturas C00, C05, C10 e C15 analisadas após o espalhamento são classificadas como SF2, que é adequado para muitas aplicações normais, tais como paredes, vigas e pilares. Enquanto que as misturas C20 e C25 são categorizadas como SF1, podendo ser utilizado para aplicações em lajes, revestimento de tuneis, estacas e certas fundações profundas. Analisando os resultados da habilidade passante pelo anel J (FIGURA 38-b) também há uma mudança de classe para substituições maiores a 15% (PJ1 para as misturas C20 e C25, e PJ2 para as misturas C00, C05, C10 e C15).

Assim, o aumento de substituições acima de 15 % de SCA leva a uma mudança na classificação do concreto tanto no espalhamento como no anel J.



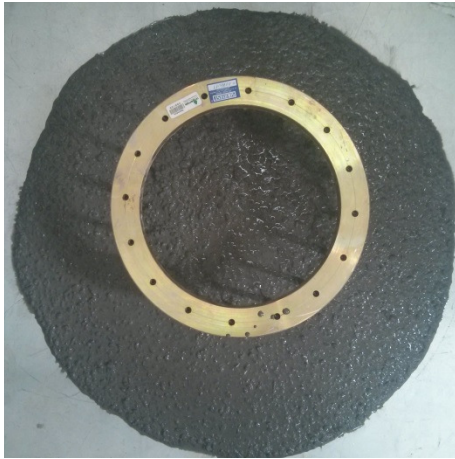
FIGURA 37 – Aspectos dos espalhamentos através do Anel J dos CAA



C00



C05



C10



C15



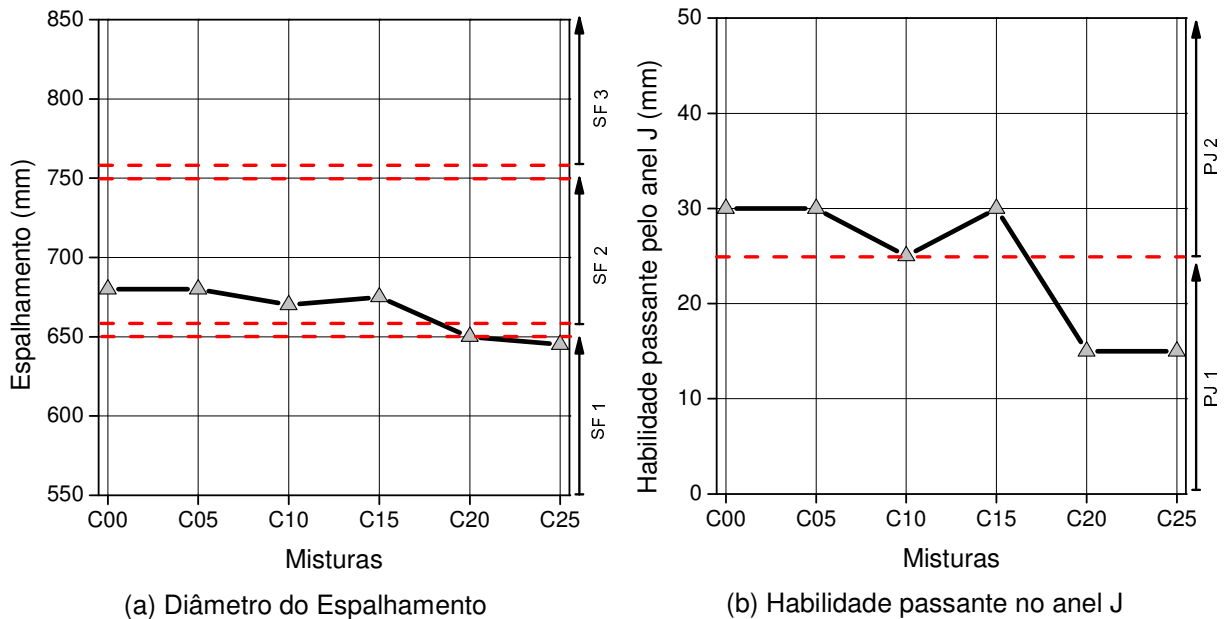
C20



C25

Fonte: Próprio Autor

FIGURA 38 – a) Diâmetro do Espalhamento e b) Habilidade passante no anel J para cada uma das misturas estudadas.



Fonte: Próprio Autor

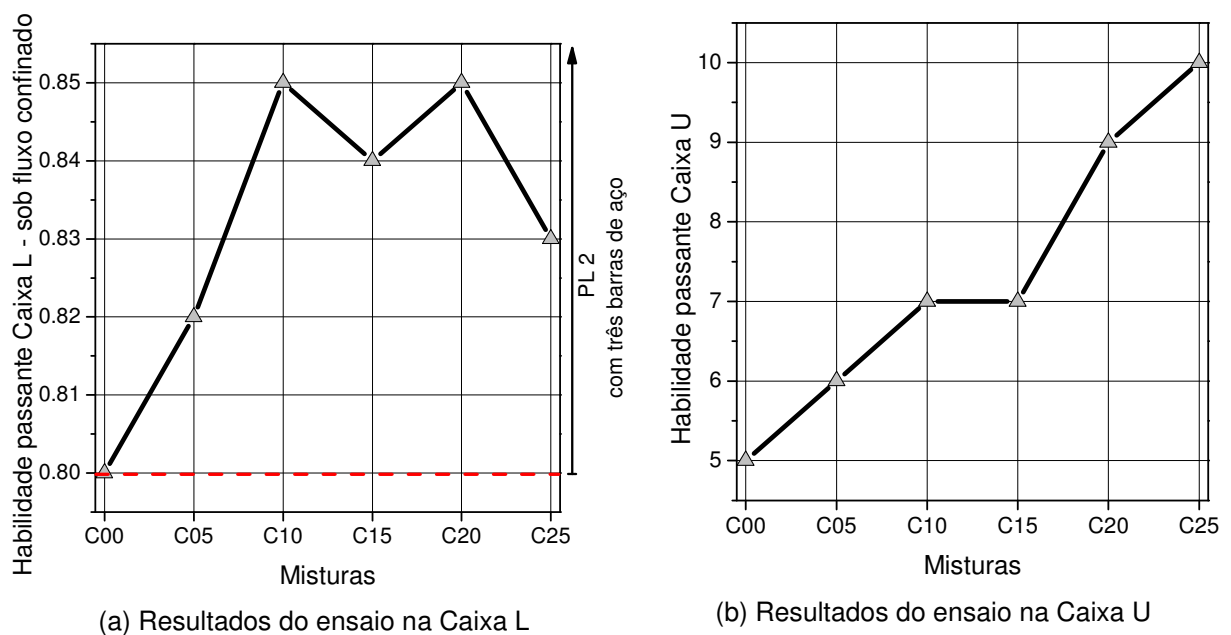
Na FIGURA 39 se apresentam os resultados obtidos da habilidade passante na Caixa L com diferentes substituições de CP por SCA juntamente com a habilidade passante obtida com a Caixa U. Estas duas metodologias foram utilizadas para analisar a habilidade passante do concreto, onde mostraram diferença significativa entre elas. A habilidade passante obtida com a Caixa U diminui com o aumento de substituição (aumenta a diferença entre R1-R2), isto é a mistura fica menos fluída com o aumento de SCA. Já os resultados da caixa L mostram um comportamento contrário e contraditório, a habilidade passante tende a se estabilizar para substituições superiores a 10% e aparentemente começaram a diminuir com quantidades superiores a 25 %. Todas as misturas com substituição se mostram mais fluidas que o traço de referência na Caixa L.

Destes dois resultados contrapostos, a habilidade passante da Caixa U corrobora com os obtidos no espalhamento e no anel J. Assim a fluidez da mistura diminui com o aumento de SCA.

Cabe salientar que os resultados da Habilidade passante Caixa L são muito sensíveis a pequenos erros nas medições das alturas H1 e H2. Um erro em mais ou menos 1 mm em somente uma das medições equivale a uma mudança da ordem de 2% na habilidade passante. O desvio padrão dos seis resultados é de 0,02; assim a

diferença entre o valor máximo e o mínimo (5%) é menor a três desvios padrão. Desta forma é possível concluir que este método não apresenta resultados estatisticamente confiáveis como para tirar alguma conclusão sobre a habilidade passante das misturas.

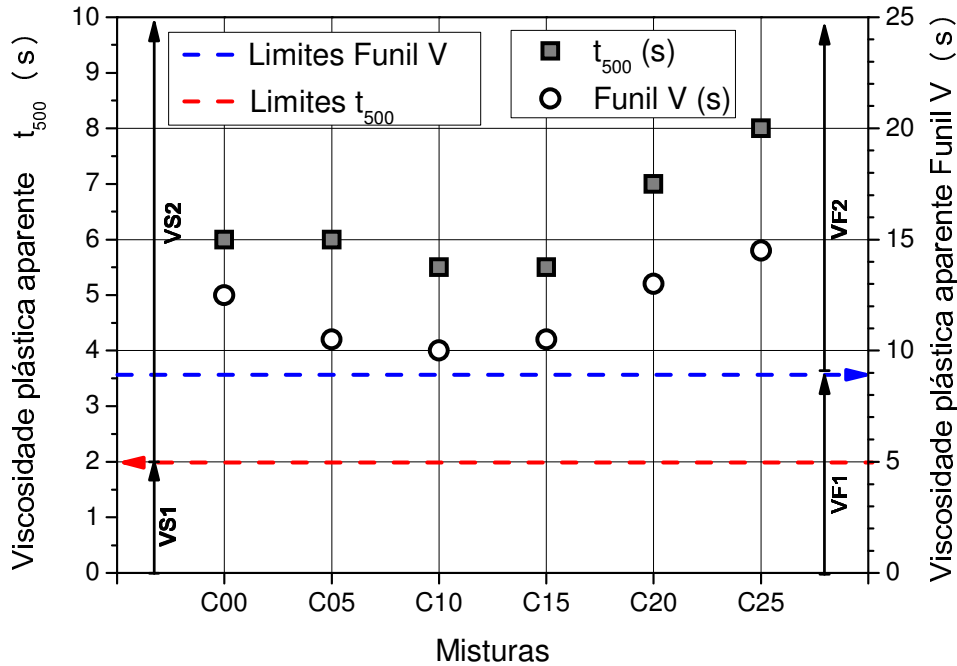
FIGURA 39 – Habilidade passante: a) Caixa L e b) Caixa U, para cada uma das misturas estudadas.



Fonte: Próprio Autor

Na FIGURA 40 se mostram as viscosidades aparentes  $T_{500}$  e Funil V, obtidas para cada uma das misturas analisadas. Todos os ensaios foram filmados e os tempos apresentados na TABELA 10 foram obtidos das gravações. Como se observa na FIGURA 40 o comportamento das duas curvas é similar o que confirma que os resultados são corretos já que foram obtidos resultados similares com métodos diferentes. Neste caso não existe mudança de classificação do concreto com o aumento da substituição de SCA por CP. É interessante notar que para pequenas substituições (misturas C05, C10 e C15) a viscosidade tende a diminuir e depois aumenta.

FIGURA 40 – Viscosidade plástica aparente  $T_{500}$ , e Funil V, para cada uma das misturas estudadas.



Fonte: Próprio Autor

A diminuição da viscosidade aparente para quantidades pequenas de substituição não concorda com os resultados de habilidade passante e empalhamento. Um estudo mais minucioso das formas das partículas ou de reações químicas que ocorrem na pasta deveria ser feito, para poder explicar este fenômeno.

#### 4.1.1 Resumo dos resultados reológicos no estado fresco

Da análise dos parâmetros reológicos no estado fresco mostrados no item anterior é possível concluir que o aumento de SCA na mistura faz com que ela se torne menos fluida, podendo até mudar a classificação do concreto (mudaria a utilidade que se poderia dar ao concreto). Assim, quanto menor a quantidade de substituição de CP por SCA, melhor será para a obtenção de um CAA mais fluido.

## 4.2 Resultados dos ensaios mecânicos

Para a determinação das propriedades do concreto no estado endurecido foram verificadas as resistências à compressão axial e as resistências à tração por compressão diametral de todas as misturas produzidas. Os resultados dos ensaios mecânicos foram analisados com base em análise estatística para auxiliar nas conclusões obtidas. Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, através da análise ANOVA, cujo objetivo é observar a existência de interação entre os fatores e testar se as mesmas são ou não estatisticamente significativas.

### 4.2.1 Resistência à compressão axial

São apresentados na TABELA 16 os resultados de resistência à compressão axial obtidos com a média de cinco corpos-de-prova par cada uma das idades de 7, 28, 56 e 91 dias.

TABELA 16 – Valores médios de resistência à compressão axial

Misturas	7dias	28dias	56dias	91dias
	$\sigma$ (MPa) – CV (%)	$\sigma$ (MPa) – CV (%)	$\sigma$ (MPa) – CV (%)	$\sigma$ (MPa) – CV (%)
<b>C00</b>	25,73 – 5,80	34,17 – 2,91	38,22 – 5,26	47,39 – 4,80
<b>C05</b>	24,86 – 3,28	35,36 – 1,11	46,93 – 2,77	49,79 – 2,81
<b>C10</b>	21,06 – 5,80	30,51 – 2,91	37,67 – 5,26	45,58 – 4,80
<b>C15</b>	23,70 – 2,63	36,61 – 1,09	46,16 – 2,31	53,53 – 2,35
<b>C20</b>	20,09 – 0,91	32,61 – 3,52	45,21 – 0,78	50,80 – 1,65
<b>C25</b>	20,52 – 1,84	33,18 – 1,25	43,48 – 2,57	52,04 – 1,87

CV = Coeficiente de Variação

Fonte: Próprio Autor

Todos os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial dos CAAs foram utilizados para realizar uma análise com o método estatístico ANOVA, apresentados na TABELA 16.

TABELA 17 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial dos CAAs com substituição parcial de Cimento Portland por Sílica de Casca de Arroz.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F crítico
% SCA	496,60	5	99,321	90,434	2,3092
Tempo	12496,46	3	4165,488	3792,744	2,6993
Interação	390,85	15	26,056	23,725	1,7718
Erro	105,43	96	1,098		
Total	13489,36	119			

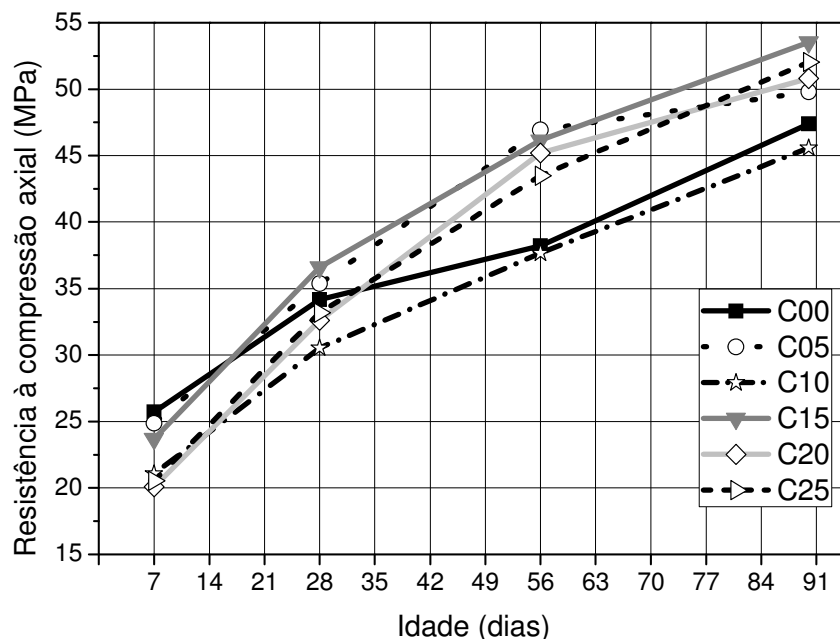
Notas: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.

Fonte: Próprio Autor

Na TABELA 17 se observa que o F é maior que o F crítico sempre. Isto significa que, segundo o resultado da ANOVA para o grau de confiança de 95%, é possível garantir que, tanto a variação da porcentagem de SCA substituída no CAA, como o tempo que no qual foram realizados os ensaios, são variáveis estatisticamente significativas. A interação entre esses dois fatores também é estatisticamente significativa, isto é, que o efeito da porcentagem de CP substituído por SCA muda com o decorrer do tempo.

A FIGURA 41, mostra a variação da resistência à compressão axial das diferentes misturas analisadas aos 7, 28, 56 e 91 dias. Nesta figura fica evidente o efeito do tempo nos resultados, quanto maior for o tempo maior a resistência do CAA, independente da porcentagem de substituição.

FIGURA 41 – Comparativo das curvas de resistência média à compressão axial



Fonte: Próprio Autor

A resistência média à compressão axial do CAA da mistura de referência (C00) obtida aos 7 dias, é superior ao das outras misturas de CAAs, motivado pela característica do cimento CP V ARI – RS, que é a alta resistência inicial aos primeiros dias. No entanto, as misturas produzidas com substituição parcial de CP por SCA obtêm um ganho significativo de resistência com o passar da idade, pois o material pozolânico necessita de  $\text{CH} + \text{H}_2\text{O}$  para reagir. Então nos primeiros dias o CP reage e forma  $\text{CSH} + \text{CH}$  e este CH juntamente com a presença  $\text{H}_2\text{O}$  forma novos produtos de hidratação, CSH adicional.

O cimento CP V ARI – RS por suas características específicas reage com a água com maior velocidade, atingindo altas resistências já nos primeiros dias de aplicação. No entanto, as partículas de sílica da SCA reagem, porém de forma mais lenta, com o hidróxido de cálcio (CH), produzido pelas reações de hidratação do cimento e também pela finura da SCA que potencializou tais reações, além de atuar como material mais fino, possibilitando maior nucleação de cristais. A partir disso, obtiveram-se resistências superiores ao de referência aos 28, 56 e 91 dias.

Para que possa ser analisada a interação entre o tempo e a substituição de CP por SCA, é necessário que seja feita uma comparação múltipla de médias. A FIGURA 42 mostra os valores médios de resistência à compressão axial para cada porcentagem de substituição estudada, e para cada idade.

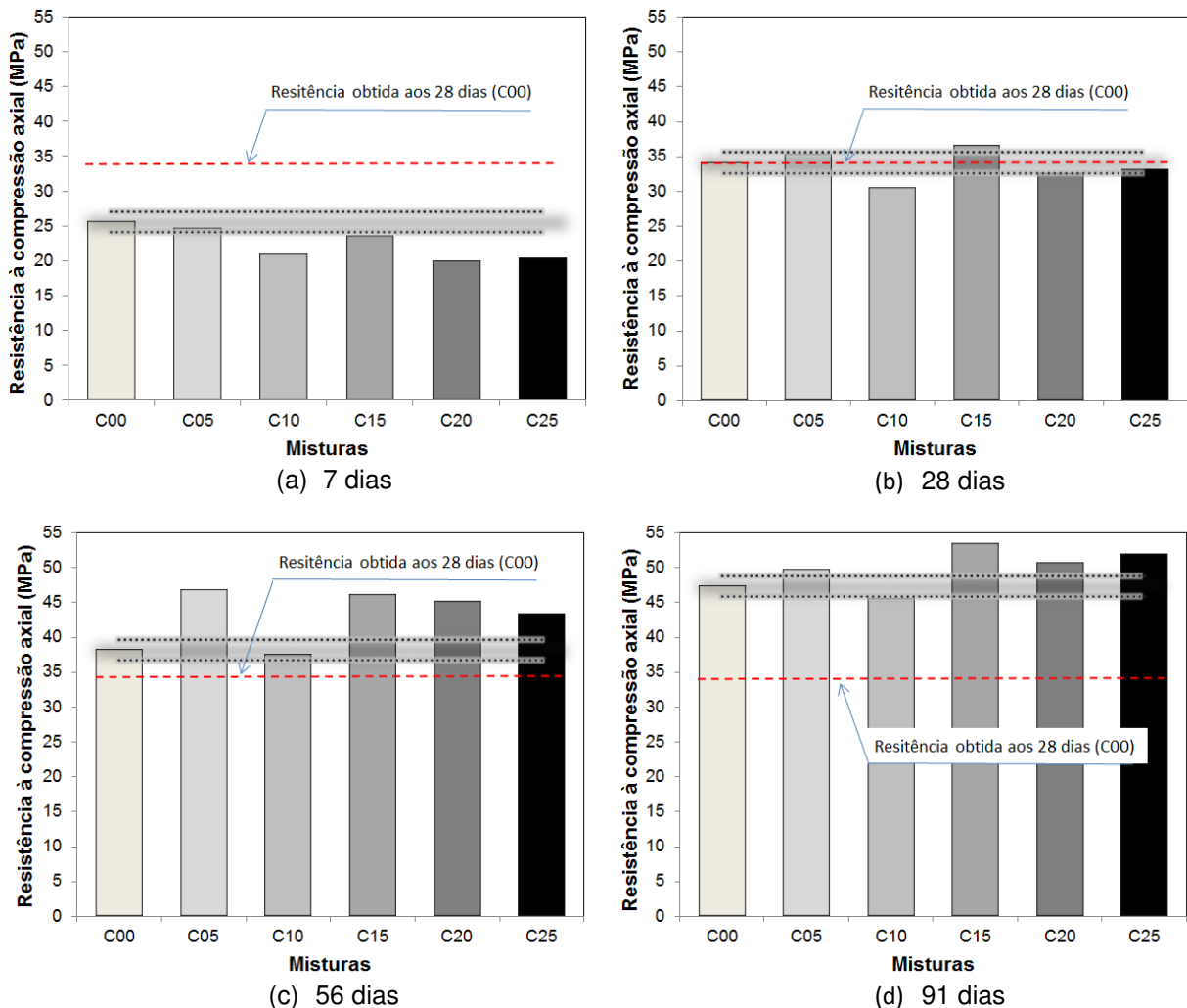
Assim, na FIGURA 42-a são apresentadas as médias das resistências à compressão dos CAAs estudados aos 7 dias de idade. Na região destacada (entre as linhas pontilhadas) estão marcados 3 desvios padrões das médias,  $\pm 1,47 \text{ MPa}$  ( $\text{Erro}/\sqrt{n}$ ); segundo Barros Neto (2001). Nessa Figura é possível verificar que, não existe diferença estatisticamente significativa entre as resistências mecânicas à compressão axial aos 7 dias, entre as misturas C00 e C05. Também não há diferença estatisticamente significativa entre as resistências mecânicas à compressão axial aos 7 dias das misturas C10, C20 e C25. Adicionalmente, para os 7 dias se observa uma diminuição de resistência à compressão com o aumento de substituição, que está de acordo com o esperado uma vez que se diminui a quantidade de cimento. Nessa idade, aparentemente não houve tempo suficiente para a reação do hidróxido de cálcio (CH), formado na hidratação do cimento, com a SCA.

A FIGURA 42-b mostra as médias das resistências à compressão axial dos CAAs aos 28 dias de idade. Observa-se que nesta idade não existiram diferenças

estatisticamente significativas nas resistências mecânicas à compressão axial entre as misturas C00, C05, C20 e C25. A mistura C10 tem resistência pouco menor que a de referência e a C15 pouco maior. Em geral se pode dizer que aos 28 dias praticamente não há mudanças nas resistências mecânicas à compressão axial com o aumento de substituição de cimento por SCA.

Tanto aos 56 como aos 91 dias, conforme a FIGURA 42-c e FIGURA 42-d, existe um aumento da resistência à compressão axial, exceto a mistura C10, comparando com o concreto de referência para todas as misturas estudadas. Essas figuras mostram também que à medida que ocorreu o aumento das quantidades de substituição, aumentaram as resistências à compressão axial para os CAA produzidos com SCA aos 56 e 91 dias, porém, embora a mistura C10 também aumentasse, ela se manteve com a resistência inferior ao C00.

FIGURA 42 – Comparação múltipla de médias da resistência à compressão axial aos 7, 28, 56 e 91 dias para os CAAs estudados.



Fonte: Próprio Autor



Os resultados da FIGURA 42 mostram também que, os CAA com substituição obtiveram valores de resistência muito próximos uns dos outros em todas as idades, com exceção aos 56 dias, onde o C00 e o C10 ficaram com valores significativamente inferiores aos demais.

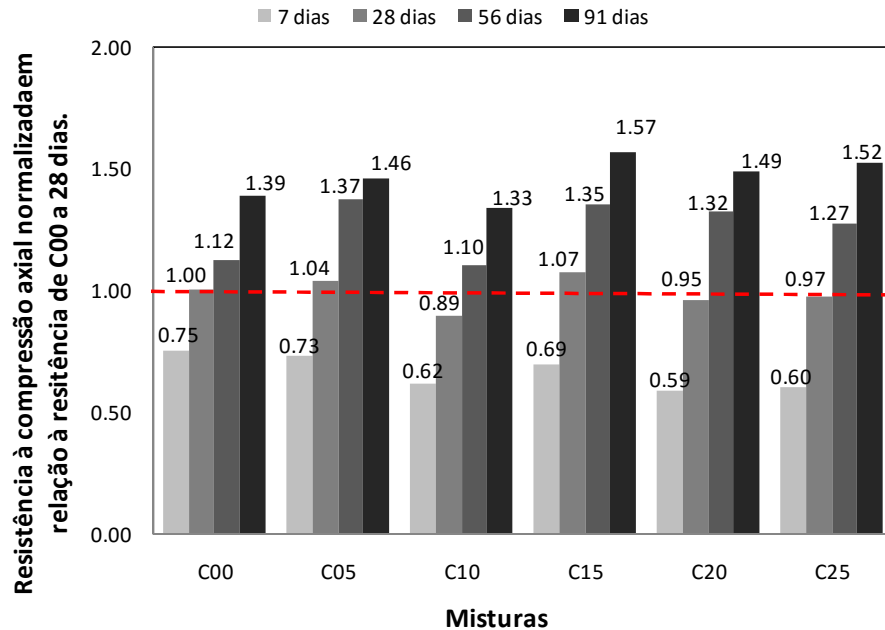
Segundo Krug (2011), em suas análises quanto à influência do teor de substituição de CCA nas propriedades do concreto no estado endurecido, misturas com 20% de substituição apresentaram resistências à compressão axial superiores às misturas com 10% da mesma cinza, ou seja, o aumento do percentual de substituição se mostrou favorável ao desempenho da resistência à compressão axial aos 91 dias.

Marton *et al.* (2013) em pesquisa sobre utilização da sílica de casca de arroz na produção de pisos intertravados para utilização em vias de tráfegos de veículos comerciais ( $f_{ck} \geq 35 \text{MPa}$ ) e vias de tráfego especiais ( $f_{ck} \geq 50 \text{MPa}$ ), relata que valores encontrados para a resistência à compressão dos pisos intertravados na idade de 28 dias, mostram que os concretos com adições de 5% de SCA obtiveram ganho de resistência frente ao concreto referência. Porém nos concretos em que houve uma substituição de 10% em massa de cimento por 10% de sílica de casca de arroz a resistência característica foi menor.

É mostrado na FIGURA 43 o comparativo das resistências médias à compressão agrupadas por porcentagem de substituição. Em esta figura as resistências de compressão estão normalizadas em relação à resistência de compressão da mistura de referência (C00) na idade de 28 dias. Fica claro que o ganho aos 91 dias aumenta de 39% no concreto de referência para valores da ordem de 50% nas misturas C05, C15, C20 e C25. Somente a mistura C10 teve um ganho inferior à mistura de referência.

Nesta figura é também possível observar que enquanto a mistura de referência obteve um acréscimo de resistência de 84,21% no rompimento aos 7 dias até os 91 dias, as misturas com substituição obtiveram 100,28%, 116,38%, 125,90%, 152,88% e 153,57% com os traços C05, C10, C15, C20 e C25 respectivamente.

FIGURA 43 – Comparativo de ganho de resistência à compressão com o decorrer das idades *versus* diferentes misturas



Fonte: Próprio Autor

Analisando a taxa de crescimento da resistência à compressão (inclinação da curva da FIGURA 41 e TABELA 18) é possível ver que entre 7 e 28 dias existe um aumento da taxa de crescimento com o aumento de substituição de SCA. Entre 28 e 56 dias os concretos com substituições tem uma taxa bem maior que a do concreto de referência, porém não se observa tendência definida, as taxas de resistência oscilam. Para o período de 56 a 91 dias as taxas de resistência parecem se estacionar sendo a taxa do concreto de referencia levemente superior.

Na TABELA 18 estão apresentadas as taxas de crescimento das resistências médias à compressão nos períodos estudados, isto é, a inclinação da curva da FIGURA 41 para cada período de tempos e cada mistura.

TABELA 18 – Taxa de crescimento das resistências (valores em MPa/dia)

<b>Período</b>	<b>C00</b>	<b>C05</b>	<b>C10</b>	<b>C15</b>	<b>C20</b>	<b>C25</b>
0/7	3.68	3.55	3.01	3.39	2.87	2.93
7/28	0.40	0.50	0.45	0.61	0.60	0.60
28/56	0.14	0.41	0.26	0.34	0.45	0.37
56/91	0.26	0.08	0.23	0.21	0.16	0.24

Fonte: Próprio Autor

Assim, supõe-se que a taxa inicial, referente à hidratação do cimento, está influenciada tanto pela quantidade de cimento como pela compacidade da mistura (diminui com o aumento de substituição). Entre 7 e 56 dias o efeito pozolânico da SCA parece ser determinante no ganho de resistência, isto é o consumo de CH. E após os 56 dias de idade, o aumento é estabilizado pelo que aparenta ser devido à pozolanidade da cinza volante presente em todas as misturas. Assim, é esperado que todas as curvas sigam apresentando taxas similares para idades mais avançadas.

#### 4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para a avaliação da influência da substituição de cimento Portland por sílica de casca de arroz na resistência à tração por compressão diametral foram ensaiados cinco corpos-de-prova cilíndricos aos 7, 28, 56 e 91 dias.

Na TABELA 19 estão apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral obtidos com a média dos valores. Assim ao substituir o cimento pela sílica de casca de arroz, notam-se alterações nos valores de resistência à tração em relação à mistura de referência.

TABELA 19 – Resultados experimentais de resistência à tração compressão diametral

Misturas	7dias	28dias	56dias	91dias
	$\sigma$ (MPa) – CV (%)	$\sigma$ (MPa) – CV (%)	$\sigma$ (MPa) – CV (%)	$\sigma$ (MPa) – CV (%)
<b>C00</b>	2,76 – 11,84	3,23 – 9,56	3,72 – 7,53	4,35 – 6,52
<b>C05</b>	2,84 – 8,29	3,76 – 6,60	4,06 – 8,94	4,13 – 6,27
<b>C10</b>	2,61 – 2,50	3,05 – 9,94	3,55 – 8,09	4,71 – 1,20
<b>C15</b>	2,67 – 7,67	3,42 – 5,95	4,01 – 8,35	5,20 – 3,62
<b>C20</b>	2,49 – 3,70	3,38 – 8,05	3,91 – 8,02	4,92 – 6,62
<b>C25</b>	2,30 – 3,34	3,18 – 7,36	4,09 – 5,48	5,23 – 8,09

CV = Coeficiente de Variação

Fonte: Próprio Autor

Também foi utilizado a ANOVA para analisar os dados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos CAAs, conforme apresentado na TABELA 20.

TABELA 20 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência à tração por compressão diametral dos CAAs com cinza volante e sílica de casca de arroz.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F crítico</i>
% SCA	1,6518	5	0,3303	4,7650	2,3092
Tempo	73,8835	3	24,6278	355,2196	2,6993
Interação	7,0556	15	0,4703	6,7844	1,7718
Erro	6,6558	96	0,0693		
Total	89,2468	119			

*Notas: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ = SQ/GL – média quadrada; F – valor calculado de F; Fcrítico – valor tabelado de F para nível de significância 0,05.*

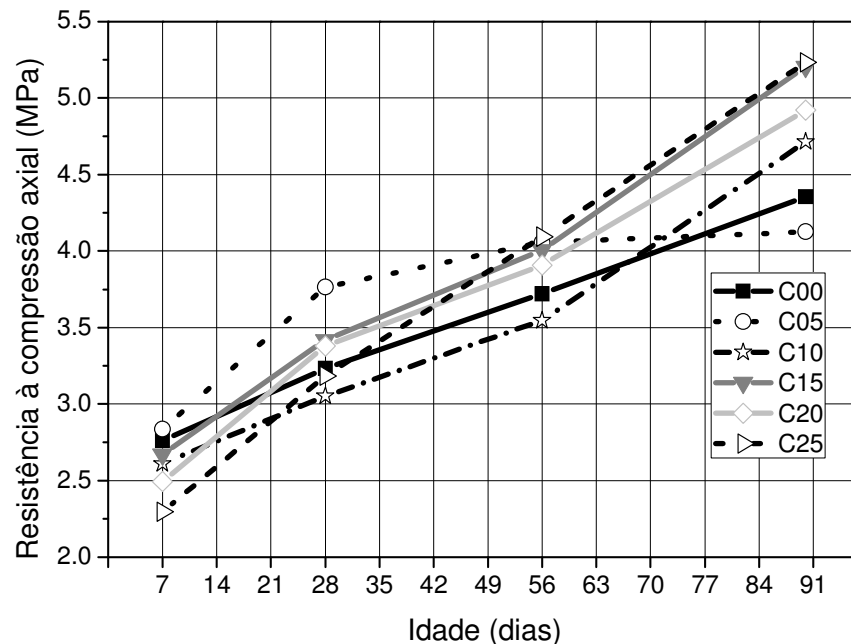
Fonte: Próprio Autor

Visto que os valores de F crítico, para um nível de significância de 0,05, são menores que os valores F calculados mostrados na TABELA 20, se pode garantir que, tanto a variação da quantidade de SCA substituída no CAA, quanto o tempo em que foram realizados os ensaios são variáveis estatisticamente significativas, com um grau de confiança superior a 95%. Também se observa a existência de uma interação entre a quantidade de sílica substituída e a idade do concreto que é estatisticamente significativa, isto é, que o efeito da porcentagem de CP substituído por SCA muda com o decorrer do tempo.

A FIGURA 44 apresenta a variação da resistência média à tração por compressão diametral para todas as misturas analisadas nas diferentes idades estudadas.

Na FIGURA 44 se observa que os valores de resistência à tração por compressão diametral dos CAAs da mistura C00 para a idade de 7 dias somente é inferior à C05. Nessa Figura também se observa que à medida que ocorreu o aumento das quantidades de substituição, aumentaram também as resistências médias à tração por compressão diametral aos 28, 56 e 91 dias, com exceção ao do teor de 5% de substituição (C05) que se manteve com a resistência constante após 56 dias.

FIGURA 44 – Comparativo de resistência média à tração por compressão diametral

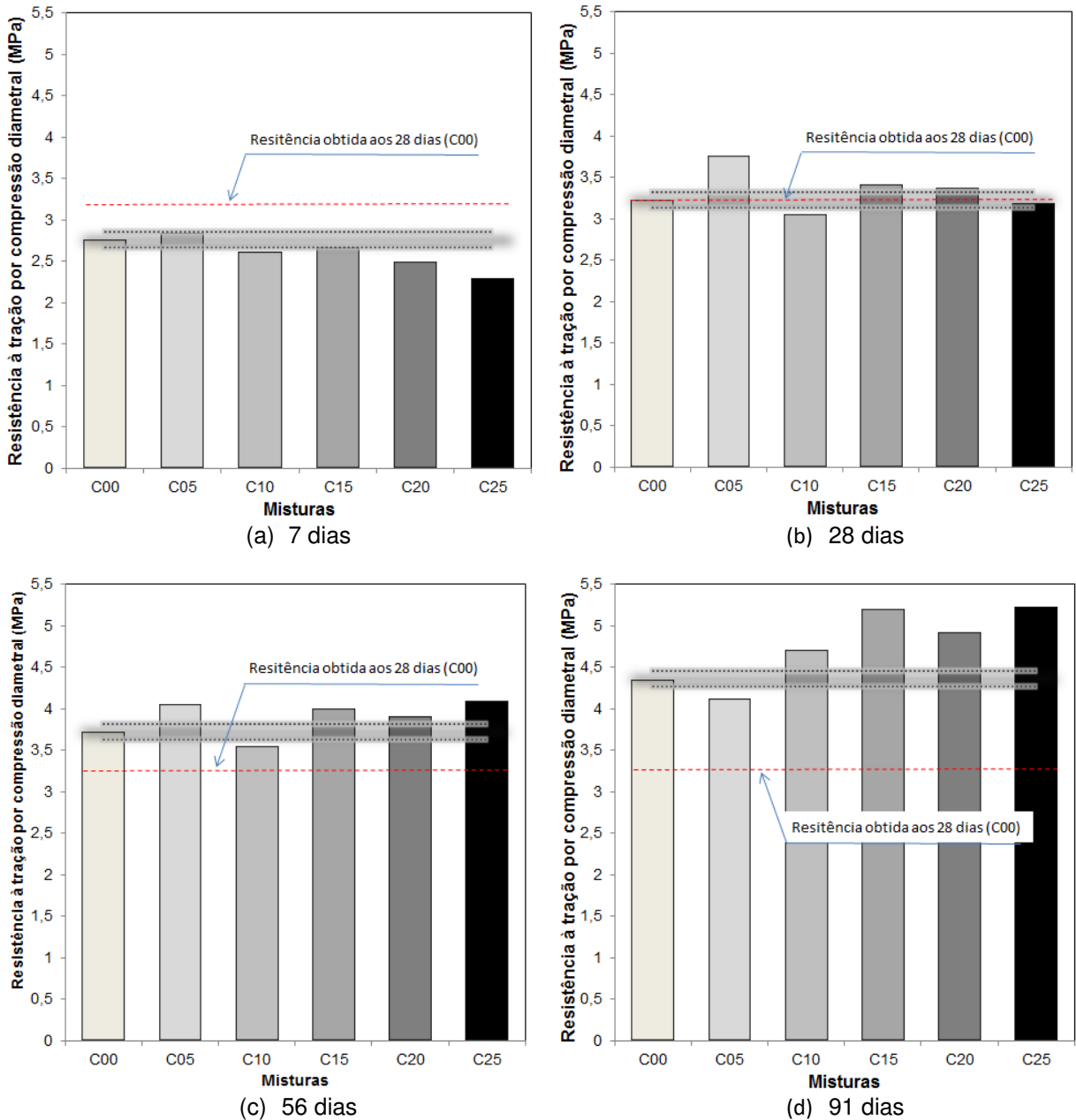


Fonte: Próprio Autor

Neste caso, também é necessário realizar uma comparação múltipla das médias para analisar se a interação entre o tempo e a porcentagem de substituição é significativa ou não. Assim, a FIGURA 44 mostra os valores médios de resistência à tração por compressão diametral para cada mistura estudada, nas diferentes idades.

Na FIGURA 45-a estão representadas as médias das resistências à tração por compressão diametral dos CAAs estudados para os 7 dias. Nessa Figura é possível verificar que, não existe diferença estatisticamente significativa das resistências mecânicas à tração por compressão diametral aos 7 dias, entre as misturas C00, C05 e C15 (estão dentro da faixa do limite de decisão de 3 desvios padrões das médias). Tampouco há diferença estatisticamente significativa das resistências mecânicas à tração por compressão diametral aos 7 dias entre as misturas C10 e C20. Para os 7 dias de idade do concreto se observa uma acentuada diminuição de resistência à tração por compressão diametral para as substituições maiores de 15%. Este efeito é similar ao observado na resistência à compressão, já comentado anteriormente.

FIGURA 45 – Comparação múltipla das médias da resistência à tração por compressão diametral aos 7, 28, 56 e 91 dias.



Fonte: Próprio Autor

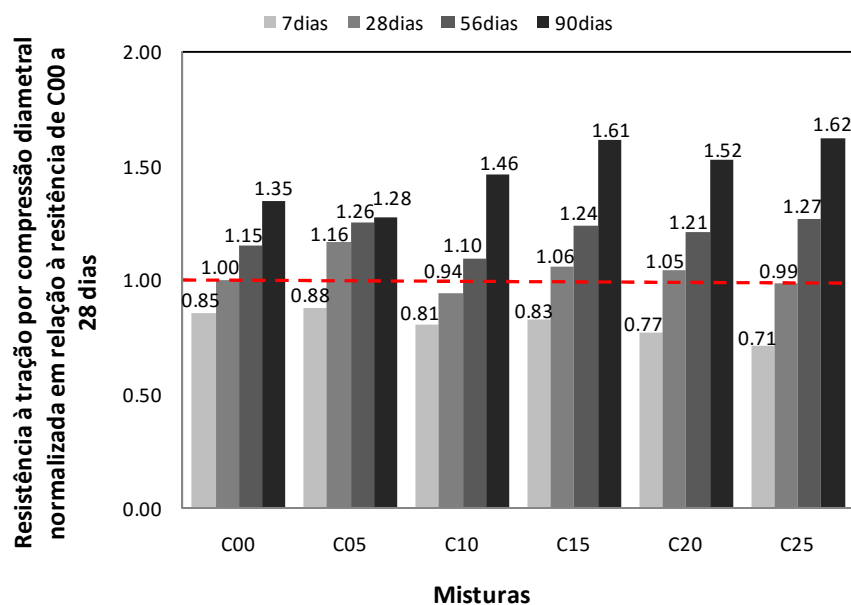
A FIGURA 45-b mostra as médias das resistências à tração por compressão diametral aos 28 dias. Observa-se que nesta idade não existiram diferenças estatisticamente significativas nas resistências mecânicas à tração por compressão diametral entre as misturas C00 e C25. A mistura C10 tem resistência menor que a de referência e a C05 maior.

Como se observa na FIGURA 45-b, c e d, a partir dos 28 dias os CAAs produzidos com as misturas C15 C20 e C25 apresentam resistências à tração por

compressão diametral maiores que a C00, ganhando mais resistência com o aumento das idades. A mistura C10 também mostrou esta inversão, porém foi mais lenta, no entanto, aos 91 dias ultrapassou a resistência do concreto de referência. A mistura C05 mostrou um comportamento bem diferenciado desde o começo, pois aos 7 dias tinha resistência à tração por compressão diametral levemente superior ao C00, mas aumentou significativamente aos 28 dias. A partir dessa idade a taxa de aumento da resistência à tração por compressão diametral começou a diminuir chegando a ser menor que a do concreto de referência aos 91 dias.

Na FIGURA 46 é mostrado o comparativo das resistências médias agrupado por porcentagem de substituição. Nesta figura é possível observar que enquanto aos 7 dias o ganho foi diminuindo com o aumento de substituição, tal comportamento aparentemente ocorreu por não ter havido tempo suficiente para a reação do hidróxido de cálcio (CH), formado na hidratação do cimento, para reagir com a pozolana (SCA). Aos 91 dias esse comportamento foi oposto, chegando a ter ganhos de até 30% em relação ao C00. Também se pode ver que enquanto a mistura de referência obteve um acréscimo de resistência de 57,74% do primeiro rompimento aos 7 dias até os 91 dias, as misturas com substituição obtiveram 45,46%, 80,67%, 94,80%, 97,32% e 127,96% nos traços C05, C10, C15, C20 e C25 respectivamente. Sendo a mistura C05 a de resultado inferior a de referência, portanto de menor acréscimo de resistência.

FIGURA 46 – Comparativo de ganho de resistência à tração com o decorrer das idades *versus* misturas



Fonte: Próprio Autor

Na análise de compacidade (item 3.4.2.4.), foi observado que a medida em que se aumenta a substituição de CP por SCA diminui a compacidade, assim, era esperado que a resistência mecânica do concreto diminuiria, uma vez que o incremento de SCA provocaria um desordenamento no arranjo do esqueleto granular. Isto acontece para as primeiras idades dos concretos com substituição. Percebe-se que os ganhos de resistência mecânica aos 7 dias diminuem com o aumento da substituição tanto na resistência à compressão axial como à tração por compressão diametral (FIGURA 43 e FIGURA 46 respectivamente).

A partir dos 28 dias essa tendência começa a mudar. Com o incremento da substituição, aumentam ambas as resistências mecânicas medidas. Assim, conclui-se que a atividade pozolânica da SCA é a responsável por estes aumentos de resistência mecânica.

Na FIGURA 47 se mostram os valores de resistência à compressão axial versus a resistência a tração por compressão diametral para os diferentes traços analisados comparados com os limites sugeridos pelo código CEB-FIP (MADANDOUST E MOUSAVI 2012). Os limites são:

$$\begin{array}{ll} \text{Limite superior} & f_t = 1,85(f_{cy} / 10)^{0,67} \\ \text{Limite inferior} & f_t = 0,95(f_{cy} / 10)^{0,67} \end{array} \qquad \text{Eq. (12)}$$

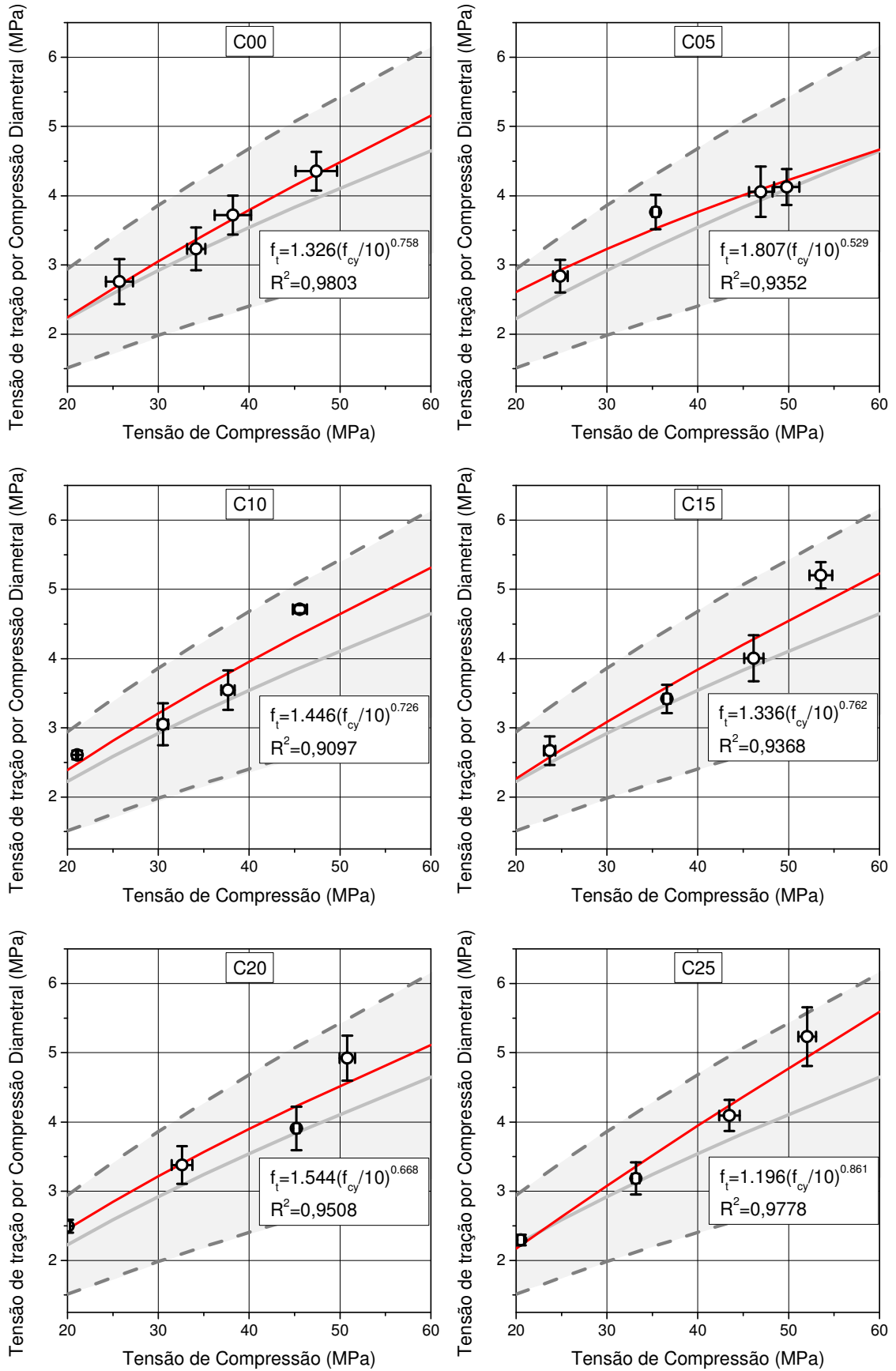
Onde  $f_t$  é a resistência à tração e  $f_{cy}$  a resistência à compressão.

Na mistura de referência (C00) as resistências aos 7 e 28 dias (os valores mais baixos) coincidem com a curva média do código, porém quando a idade aumenta a curva obtida vai se defasando para o limite máximo. Nas misturas com substituições maiores que 5% são observados comportamentos similares, porém quanto maior a substituição esse efeito é mais evidente.

Nestas figuras também é possível ver que em todas as misturas com idades de 7 dias (resistências mais baixas) os pontos médios obtidos são próximos à curva média do Código CEB-FIP, sem efeito pozolânico. Porém a medida que aumenta a idade e as resistências, os valores médios obtidos nos ensaios se afastam da curva média do Código. É importante salientar que isto também acontece com o concreto de referência, motivado pela adição de 15% de cinza volante na mistura, material que também possui propriedades pozolânicas.



FIGURA 47 – Tensão de compressão axial *versus* a tensão de tração por compressão diametral, comparados com os limites sugeridos pelo código CEB-FIP



### **4.2.3 Resumo dos resultados dos ensaios mecânicos**

Levando em conta exclusivamente os ensaios mecânicos, é possível concluir que a quantidade de substituição de CP por SCA ideal é de 15%, já que tanto a resistência à compressão axial quanto a resistência à tração por compressão diametral, para essa mistura foram as maiores comparadas com as demais misturas. Porém, as misturas C20 e C25, que tem maior quantidade de substituição os resultados seguiram sendo bons já que ultrapassaram os valores do concreto de referência.

As misturas com substituições de 5 e 10 % apresentaram resultados inferiores aos da mistura de referência na tração por compressão diametral e na compressão axial respectivamente, pelo que não se recomenda utilizar estas porcentagens de substituição de CP por SCA levando em consideração unicamente a resistência.

### **4.3 Resultados da viabilidade econômica quanto à substituição de cimento Portland por SCA**

O estudo da viabilidade econômica do emprego de misturas de CAA com substituição parcial de CP por SCA ficou restrito apenas ao CP e a SCA, já que todos os outros componentes das misturas são os mesmos e nas mesmas quantidades. A SCA está disponível comercialmente na indústria local, o que permite prever com maior exatidão o seu preço de aquisição na região oeste do estado do RS.

Tendo em vista que para viabilizar o emprego da SCA ela deve ser viável economicamente, para isso, foi feito um levantamento de custos do cimento CP V – ARI e da SCA comercializado na região.

Os valores de comercialização do cimento CP V – ARI (saco de 50 kg) em julho de 2016, nas lojas de materiais de construção da região varia em torno de R\$ 33,91 a R\$ 55,70. Considerando o valor mais econômico encontrado no mercado, representa R\$ 678,20 a tonelada.

Os valores praticados comercialmente em julho de 2016 da de SCA no Estado do RS, segundo dados fornecidos pela empresa que produz e comercializa o produto são os seguintes:

Granel: R\$ 323,00 a tonelada;

Big Bag: R\$ 450,00 a tonelada (big bag de 1.250 kg);

Sacos: R\$ 470,00 a tonelada (R\$ 9,40 o saco de 20 kg).

Será analisado o valor dos sacos de SCA para comparação com os sacos de Cimento, já que a compra deste material em grandes quantidades também diminui.

Considerando estes valores na EQUAÇÃO (13) se obtém:

$$RC\% = \frac{sca(678,20 - 470)}{678,20} \times 100 = 30,6989 \times sca \quad \text{Eq. (13)}$$

Assim, o concreto C05, com 5% de substituição de CP por SCA, terá uma redução de custo de  $30,6989 \times 0,05 = 1,53\%$  em relação ao concreto de referência C00, sem substituição. Da mesma forma os concretos C10, C15, C20 e C25 terão redução do custo de 3,06%; 4,60%; 6,14% e 7,67% em relação a C00, respectivamente.

Desta forma é possível concluir que quanto maior a quantidade de CP substituído por SCA o mais econômico será o concreto resultante. No entanto é necessário que seja realizada novas pesquisas com teores de substituição maiores que os mostrados neste trabalho para termos parâmetros sobre o comportamento no estado fresco. Cabe salientar que não é possível a substituição total do Cimento Portland.

#### **4.4 Resultados da Quantificação de CO<sub>2</sub> geradas na produção de cimento utilizado no CAA**

Como foi explicado no (item 3.8) da metodologia, será analisada a geração total de CO<sub>2</sub> em razão das emissões geradas pela produção do cimento necessário para produzir 1m<sup>3</sup> de concreto. Como foi explicada antes, a emissão de CO<sub>2</sub> da SCA não será considerada porque se teria a mesma quantidade de emissão no resíduo

do processo da queima da casca que seria descartado. E todos os outros materiais entram na mesma proporção nos traços analisados.

Então, uma diminuição de 5% de CP na mistura equivalerá a uma diminuição de 5% na emissão de CO<sub>2</sub>. Desta forma quanto maior for a substituição de cimento por SCA mais sustentável será o concreto devido a que maior será a redução da emissão de CO<sub>2</sub> liderada ao meio ambiente.

#### **4.5 Análise quanto a melhor quantidade de substituição.**

Fazendo um resumo geral das diferentes análises realizadas é possível dizer que quanto menos SCA contida no concreto, melhor será o seu comportamento no estado fresco, porém quanto mais SCA no concreto, mais econômico e sustentável ele será. Se for analisada as resistências (compressão e tração por compressão diametral) no estado endurecido o melhor desempenho foi o do CAA C15, porém com valores muito próximos ao C25. Assim em geral poderíamos dizer que o melhor concreto sem mudar nenhuma classe é o C15. No entanto, quando possível, é aceitável uma diminuição da fluidez no estado fresco (mudança de classe), onde o melhor desempenho neste estado seria o C25.

## 5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a viabilidade do emprego da Sílica de casca de arroz, produzida sob condições controladas de queima em leito fluidizado, como substituição parcial ao cimento CPV ARI-RS na produção de CAAs, para fins em concreto estrutural, tendo sido comparados CAAs produzidos com SCA, nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de substituição de cimento por SCA e adição de 15% de cinza volante, com relação a/agl. de 0,45. Para isso, foram realizados ensaios de espalhamento, fluidez, habilidade passante e capacidade de preenchimento no estado fresco. Também foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral no estado endurecido, onde posteriormente, foram comparados os resultados obtidos pelos concretos com SCA em relação ao concreto de referência (sem substituição).

### 5.1 Conclusões

A partir dos resultados apresentados nesta pesquisa, são apresentadas as seguintes conclusões.

#### ***Dosagem***

Utilizando o método de Gomes, Gettu e Agulló, foi possível dosar um concreto com características de autoadensável e a partir desta dosagem foram produzidos outros concretos com substituição de CP por SCA que também possuem propriedades autoadensáveis. Foram obtidas as compacidades destes traços utilizando o Método do Empacotamento Compressível (MEC). Observou-se que a compacidade da mistura diminui com o aumento de substituição. Esta variação é linear para as porcentagens de substituição estudadas neste trabalho, onde a partir das análises, pode ser considerado linear para quantidades de substituição maiores também.

### ***Reologia no estado fresco***

Foram produzidos os concretos dosados com adição de 15% de CV e substituição em massa de CP por SCA, nos teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% e sem substituição (concreto de referência). No que tange à reologia no estado fresco foi possível observar que com o aumento da substituição de CP por SCA houve piora das características de fluidez e habilidade passante do concreto, porém todos eles apresentaram características de autoadensáveis. Com substituições acima de 15% observou-se que há uma mudança na classificação do concreto, segundo a NBR 15823-2, para o espalhamento e a habilidade passante do anel J o que restringiria o uso deste concreto em determinados elementos estruturais. Observou-se ainda, que com o aumento do teor de substituição de cimento por SCA houve um acréscimo na coesão e na viscosidade do concreto no estado fresco quando comparado ao concreto de referência.

Foi possível observar também que o método da caixa L é muito sensível a erros de medição o que dificultou a comparação entre as propriedades das diferentes misturas. O método da caixa U se apresenta como uma opção mais interessante já que erros na medição aparentam não alterar significativamente os resultados.

Das análises realizadas no estado fresco é possível concluir que quanto menos SCA se substitui pelo CP melhor será o comportamento do concreto.

### ***Características no estado endurecido***

Quanto à resistência à compressão axial, a substituição de cimento por SCA melhorou o desempenho dos concretos em relação ao de referência, com exceção do teor com 10% de substituição que, embora tenha obtido um ganho de resistência de 100,28% ao longo dos 91 dias, sempre esteve com resistência à compressão axial inferior ao concreto de referência. Todos os outros concretos obtiveram ganhos superiores ao concreto de referência sendo o que mais resiste, em média, o com substituição de 15%. Este concreto apresentou ganhos de resistência à compressão axial da ordem de 18% em relação ao traço de referência aos 91 dias. Com relação aos traços com 20 e 25% de substituição na idade de 91 dias, os mesmos

apresentaram ganhos superiores a 10% em relação á referência, reforçando a ideia que o melhor teor estaria acima dos 15% de substituição.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, com exceção da mistura com 5% de SCA, todos os concretos apresentaram ganhos de resistência superiores ao concreto de referência. Os maiores ganhos, aos 91 dias de idade, foram as misturas com 15 e 25% de substituição (sem diferença estatisticamente significativa entre elas).

Tanto a resistência à compressão axial quanto à resistência a tração por compressão diametral aos 7 dias mostraram diminuição da resistência com o aumento de substituição. É possível concluir que a resistência inicial (até 7 dias de idade) é governada pela hidratação do cimento Portland. Quanto mais cimento tem a mistura mais resistência ele atingirá. Entre os 7 e 56 dias o efeito pozolânico da SCA começa a mudar as características da resistência já que nessa etapa os concretos com substituição apresentam maiores taxas de crescimento que o concreto de referência. Depois dos 56 dias, aparenta ser o efeito pozolânico da CV o principal responsável pelos ganhos de resistência de todos os concretos. Isto é suposto pelo motivo de que todos os concretos apresentam taxas de ganho similares nestas idades.

Levando em conta a resistência à compressão axial do concreto, o melhor concreto é o que tem 15% substituição de CP por SCA, mas seriam boas substituições também as de 20 e 25%. Os concretos com 5 e 10% de substituição de CP por SCA não são recomendáveis desde a ótica da resistência.

### ***Viabilidade econômica e a sustentabilidade***

Da análise econômica da elaboração do concreto assim como das emissões de CO<sub>2</sub> produzidas é possível concluir que quanto mais CP for substituído por SCA melhor será, pois as emissões geradas pela produção de 1m<sup>3</sup> de concreto com 100% de cimento, podem ser reduzidas em 25% com substituições de 25% de cimento por SCA. Também os custos com materiais cimentantes na produção de 1m<sup>3</sup> de concreto com 100% de cimento, podem ser reduzidos em até 7,67%, quando substituídos ao cimento na proporção de 25% de SCA.

## **Conclusões gerais**

Levando em conta todos os estudos realizados neste trabalho é possível dizer que o concreto com 15% de substituição de CP por SCA é a melhor opção técnica, econômica e ambiental. Isto por não apresentar modificações na classe no estado fresco e no estado endurecido ter as melhores características.

Porém dependendo o uso que terá o concreto a substituição de 25 % de CP por SCA pode ser uma ótima escolha, já que é embora um pouco mais denso, o concreto segue sendo considerado autoadensável com ganhos de resistência mecânica e econômicos em relação ao concreto sem nenhuma substituição, além de contribuir para a preservação do meio ambiente.

Diante desse fato, pode-se afirmar que o uso da SCA é viável e acredita-se que ela pode ser utilizada como uma fonte complementar ou alternativa do cimento para a produção de concretos autoadensáveis e contribuir para a maior sustentabilidade da construção civil.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Os resultados obtidos neste trabalho foram muito interessantes, porém não foram conclusos em alguns pontos. Por este motivo se recomenda seguir a pesquisa da utilidade da SCA como substituição parcial do CP em CAAs. Os itens mais importantes são:

- Realizar misturas com substituições de CP por SCA superiores a 25%;
- Realizar ensaios mecânicos com idades superiores aos 91 dias para ver que acontece com as resistências depois desta idade;
- Verificar a influência de outras proporções de cinza volante como adição nas propriedades estudadas dos concretos e encontrar a quantidade ótima de cada componente;
- Avaliar a durabilidade dos concretos estudados em condições de meios agressivos, entre eles ataques por sulfatos e íons cloretos;



- Avaliar a utilização de novos aditivos do tipo plastificantes e superplastificantes, a fim de verificar o comportamento da SCA quando em contato com os mesmos;
- Realizar ensaios de DRX para avaliar o consumo de CH;
- Realizar ensaios dos índices físicos, tais como: absorção capilar, absorção total e porosidade;
- Realizar ensaios reológicos no estado fresco através de reômetros para obtenção dos parâmetros de viscosidade plástica e tensão de escoamento e compara-los com os analisados;
- Realizar ensaios de tração direta e tração na flexão.

## 6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1**: Concreto auto-adensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-2**: Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-3**: Concreto auto-adensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de Janeiro 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-4**: Concreto auto-adensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de Janeiro 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-5**: Concreto auto-adensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49:** Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM ISO 3310-1:** Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2010.

**ASTM C989/C989M:** Especificación Normalizada para Cemento de Escoria para Uso en Concreto y Morteros, 2014.

AÏTCIN, P.C.; **Concreto de alto desempenho**, Editora Pini, São Paulo, 2000.

BANFILL, P. F. G.; **The rheology of fresh cement and concrete - a review**. In: Proceedings of the 11th international cement chemistry congress, 2003.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no Estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BARROS NETO, B; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R.E.; **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Ed. Unicamp, Campinas, SP, 2001.

BOUKENDAKDJI O, KENAI S, KADRI EH, ROUIS F. **Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete**. Constr Build Mater 2009;23:2593–8.

CINCOTTO, M. A., AGOPYAN, V., JOHN, V. M., **Optimization of rice husk ash production**. In: International Symposium on Vegetable Plants and Their Fibers as Building Materials, Salvador, Brazil, v. 2, pp. 334-342., 1990.

COLLATTO, D.; VIECILI, F. A.; ARNDT, J. A.; JESUS, R. T. **Utilização da Sílica da Casca de Arroz na Produção de Concreto Usinado em Central**. In: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2011, Florianópolis. Anais eletrônicos. Florianópolis: Centrosul, 2011. Disponível em: <<http://www.ibracon.org.br/eventos/53cbc/artigos.asp>>. Acesso em: 12 agos. 2015.

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

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.9, n.4, p.99 - 107, 2009.

COSTA, B. L. C.; **Quantificação das Emissões de CO2 Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da cinza de casca de arroz**. 2001. 191 f. Tese Doutorado em Engenharia Civil –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DAL MOLIN, D.C., **Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. (Ed). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, p. 290, 2011.

DALCIN, J.D.; MARANGON, E.; KOSTESKI, L.E.; **Concretos autoadensáveis com substituição parcial de cimento Portland por sílica de casca de arroz obtida através da queima controlada em leito fluidizado: Desempenho nos estados fresco e endurecido**. IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável – BAC2015. Materiais constituintes. Composições, Porto – Portugal, p. 215-223, 2015.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, p.421, 1999.

EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. Applications to reproduce all or part of this document should be made to EFNARC at the address shown on the title page. Reino Unido, 2002. ([www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)).

ERHAN G., MEHMET G., ASRAA A., SÜLEYMAN I.; **Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete**. Construction and Building Materials 95 (2015) 29–44

FORMAGINI, S.. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2005.

FREITAS, E. G. A., **Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para uso em construção civil**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 197 p., 1996.

FREITAS, E. G. A., RODRIGUES, E. H. V., ARAÚJO, R. C. L., FAY, L., **Efeito da adição de cinzas de bagaço de cana na resistência à compressão de argamassa normal**, In: XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, v. 4, Poços de Caldas, Brasil, pp. 219-221, 1998.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R.. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. EditoraPini, São Paulo, 2009.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. **Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais**. In: V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO. São Paulo – Brasil, 2003.

GUNEYISI E, GESOGLU M, OZBAY E. **Effects of marble powder and slag on the properties of self compacting mortars**. Mater Struct 2009;42:813–26.

GUNEYISI E, GESOGLU M, OZBAY E. **Evaluating and forecasting the initial and final setting times of self-compacting concretes containing mineral admixtures by neural network**. Mater Struct 2009;42:469–84.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. INDICADORES – **Produção Agrícola**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>>. Acesso em: 12 de fev. 2015.

KANNING, R. C., **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento portland**. Tese doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2013.

KHATIB JM, HIBBERT JJ. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. Constr Build Mater 2005;19:460–72.

KHATIB JM. **Performance of self-compacting concrete containing fly ash**. Constr Build Mater 2008;22:1963–71.

KRUG, L. F.; **influência do beneficiamento por Peneiramento no comportamento da cinza de Casca de arroz: estudo como adição Pozolânica em concretos**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.

MACEDO, P.C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinzas de bagaço de cana**. (Dissertação). Ilha Solteira, FEIS/UNESP. 2009.

MARANGON, E.; **Caracterização material e estrutural de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço**. Tese de Doutorado, COPE, UFRJ. 2011.

MARANGON, E.; MARTON, L. F. M.; SOARES, E. L.; MENDES, G. G.; MARTINS, R. P.; SILVA, D. M. G.; **Atividade pozolânica da sílica da casca de arroz produzida por combustão em leito fluidizado**. 55º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, Gramado, RS. 2013.

MARANGON, E.; OLIVEIRA, L.L.; OLIVEIRA, M.; BARONI, M.; BUDNY, J.; **Índice de atividade pozolânica da sílica de casca de arroz silca nobre SCI proveniente da combustão em leito fluidizado**. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis,Guimarães, Portugal, 2014 – 523

MARTÍNEZ, J.D.; PINEDA, T.; LÓPEZ, J.P.; BETANCUR, M.;**Assessment of the rice husk lean-combustion in a bubbling fluidized bed for the production of amorphous silica-rich ash**: Energy, .Elsevier, vol. 36, 3846-3854 p., 2011.

MARTON, L. F. M.,OLIVEIRA, M. D.,MARANGON, E.,ROSADO, D., PADOIN, D. G., MARTINS, R.; **Avaliação da utilização em pisos intertravados da sílica de casca de arroz obtida através da combustão em leito fluidizado**. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2013, Gramado. Anais eletrônicos. Gramado:, 2013. Disponível em: <<http://www.ibracon.org.br/eventos/55cbc/artigos.asp>>. Acesso em: 12 agos. 2015.

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K., **Pozzolanic and cementitious materials**, 1ªed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 191 p., 1996.

MAYER, F. D.; **Aproveitamento da casca de arroz em uma micro central termoelétrica – avaliação dos impactos econômicos e ambientais para o setor arrozeiro do rio grande do sul**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, RS, Brasil, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini LTDA, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.; Concrete – **Microstructure, Properties and Materials**.3rd ed. Editora McGraw-Hill, New York, U.S.A. Pag.475, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.; Concrete – **Microestrutura, Propriedades e Materiais**. N. P. Hasparyk. 2ª Edição, São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P.K.; Concrete – **Technology for sustainable development**. Concrete International. V. 21, n.11, 1999, p. 47-53.

MENDES, G. G.; MARTINS, R. P.; SILVA, D. M. G.; MARANGON, E.;OLIVEIRA, M. J. D.; **Durabilidade de concretos com adição de sílica da casca de arroz obtida em leiro fluidizado à penetração de íons cloretos**. Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Guimarães, Portugal, p. 697-707, 2014.

MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J.; FERREIRA, H. S. NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas**. Revista Cerâmica. vol. 55 n335. São Paulo, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; **Applied statistics and probability for engineers** —3rd ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY- USA, 2003.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete**, Structural Concrete, v. 1, n. 1, p. 3-17, 2000.

OKAMURA, H.; Ouchi M. **Self-compacting Concrete**. Journal of Advanced Concrete Technology, Japan, v.1, p. 5-15, 2003.

OLIVEIRA, I. R., STUART, A. R., PILEGGI, R. G., PADOLFELLI, V. C., **Dispersão e empacotamento de partículas**, 2ª ed. São Paulo: Fazendo Arte, Editorial, 224 p., 2000.

PETERSSON, Ö.; BILLBERG, P.; VAN, B. K. (1996) **A Model for Self-Compacting Concrete**. In: International Rilem Conference on Production Methods And Workability Of Concrete, P.J.M. Bartos, D.L. Marris e D.J. Cleand (editores), E & FN Spon, 483-492.

POUEY, M. T. F., **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2006.

RAHMAN, M.E.; MUNTOHAR, A.S.; PAKRASHI, V.; NAGARATNAM, B.H.; SUJAN, D.; **Self compacting concrete from uncontrolled burning of rice husk and blended fine aggregate**: Materials and Design, .ELSEVIER, vol. 55, p. 410-415, 2014.

SAHMARAN M, YAMAN IO, TOKYAY M. **Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash**. Cem Concr Compos 2009;31:99–106.

SANTOS, P. G. C., **Desenvolvimento de um queimador em leito fluidizadoborbulhante para queima de biomassa. Adaptação a caldeira pré-existente**. Dissertação de Mestrado. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

SENSALE, G. R. B., 2000, **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz**. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 182 p.

SILVA, G. J. B., **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Fevereiro, 2005.

SILVA, A. S. M. da, **Dosagem de Concreto Pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Aitcin-Faury Modificado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março, 2004.

SILVA, M. G. Cimento Portland com adições minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, p. 761, 2007.

SKARENDAHL A, PETERSSON O. **Self-Compacting Concrete: State of the Art**. RILEM Tech Comm 174-SCC 2001:154.

TORGAL, F. P.; GOMES, J. P.C.; JALALI, S.; **Cimento Portland Versus Ligantes Geopoliméricos: Considerações Económicas Sobre as Implicações do Mercado do Carbono no Custo dos Betões**. Conferência Engenharia 2005 – Inovação e Desenvolvimento: actas. Covilhã : Universidade da Beira Interior, 2005

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D.C.. **Concreto Auto-Adensável**. Editora Pini, 1ª ed. São Paulo, 2008.

UYSAL M, SUMER M. **Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures**. Constr Build Mater 2011;25:4112–20.

UYSAL M, YILMAZ K. **Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete**. Cem Concr Compos 2011;33:771–6.

VIACAVA, I. R.; SENSALE, G.R.; CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A.: **Directrices de dosificación para hormigones autocompactantes de baja y media resistencia**. 3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante. Avances y oportunidades, Madrid. p. 35-44, 2012.