

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAPHAEL PAIM MARTINS

**AVALIAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA COM A UTILIZAÇÃO DE UMA
BLENDAS DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ E CINZA VOLANTE**

**Alegrete
2018**

RAPHAEL PAIM MARTINS

**AVALIAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA COM A UTILIZAÇÃO DE UMA
BLENDAS DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ E CINZA VOLANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Ederli Marangon

Coorientador: Marcelo de Oliveira

**Alegrete
2018**

RAPHAEL PAIM MARTINS

**AVALIAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA COM A UTILIZAÇÃO DE UMA
BLENDAS DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ E CINZA VOLANTE**


Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 junho de 2018.

Banca examinadora:



Prof. Doutor Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA



Eng. Mestre Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
Coorientador
UNIPAMPA



Prof. Doutor Fladimir Fernandes dos Santos
UNIPAMPA



Prof. Mestre Marília Ferreira Tamiosso
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Daisy Paim, minha irmã Priscila Paim e Rosemere Pedroso pelo apoio incondicional durante esta e outras etapas de minha vida.

Ao meu pai Nilton Carloto e minha prima Eloísi Paim, que embora não estejam mais presentes, foram exemplos fundamentais de resiliência e superação em minha graduação.

Ao Prof. Dr. Ederli Marangon pelo incentivo e orientação, que não estiveram limitados à elaboração deste trabalho, mas também, pela dedicação quase paternal em meu desenvolvimento acadêmico e profissional no percurso desta jornada acadêmica.

Ao Eng. Ms. Marcelo Dias pelo suporte e apoio na elaboração deste trabalho. Assim como, pelos conselhos sempre a mim dados de bom grado e de forma amistosa.

Aos meus amigos e colegas; Pedro Jucá, Letícia Larré, Gabriel Mendes, Ângelo Magno, Vinicius Bordoli, Jéssica Silveira, Thiago Amorin, Diego Perez, Débora Bretas, Sidney Apratto, Everton Soares, Thalita Vieira, Danielle Pozzebon Débora Righi e Lucas Khöler. Em especial Eduardo Pachla.

Aos meus Amigos Murilo Cervi, Enzo Ceolin, Guilherme Ceolin, Fabio Carvalho, Cristhian Soares, Gabriel Ceolin que embora sejam da mesma área, me apoiaram na elaboração deste Trabalho.

Aos professores Fladimir Santos, Marília Tamiosso e demais professores deste curso.

Aos técnicos de laboratório da UNIPAMPA Raquel Machado e Eng. Dieison Fantineli pelo auxílio nesta pesquisa.

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo principal a determinação dos teores de substituição do cimento Portland por uma blenda de sílica de casca de arroz (SCA) e cinza volante (CV), que fossem capazes de mitigar os efeitos deletérios, do fenômeno de reação álcali-sílica, em limites toleráveis. Em vista disto, estabeleceu-se um programa de pesquisa que compreende, em um primeiro momento, como análise complementar a determinação do comportamento mecânico dessas misturas, pelos ensaios de tração na flexão e compressão simples, (ABNT NBR 13279/2005). Em um segundo instante, buscou-se a análise das expansões das barras de argamassa submetidas ao ensaio acelerado de acordo a norma (ABNT NBR 15577- 4/2009). Além disso, buscou-se determinar a perda de massa oriunda dos deslocamentos das barras submetidas ao ensaio acelerado. Para a execução destes ensaios, foram moldadas uma mistura de referência, sem uso substituições e quatro misturas com substituições, em massa, de: 3% de SCA e 10% de CV; 3% SCA e 20% CV; 10% SCA e 10% CV; 10% SCA e 20% CV. A correlação entre os resultados obtidos e os teores de substituição, evidenciaram a eficiência do uso da cinza volante no combate às expansões, assim como, na melhora do desempenho mecânico. Por outro lado, foi verificado que o uso de sílica de casca de arroz nesses teores tende a favorecer o fenômeno da reação álcali-sílica, determinando o caráter reativo da pozolana.

Palavras-chave: reação álcali-sílica; sílica de casca de arroz, cinza volante.

ABSTRACT

The present work had as main objective the determination of the Portland cement substitution contents by a mixture of rice husk silica (SCA) and fly ash (CV), which were able to mitigate the deleterious effects of this pathology, within tolerable limits . As a result of this, a research program was established that initially includes as a complementary analysis the determination of the mechanical behavior of these mixtures by the simple compression tests and flexural tensile tests, (ABNT NBR 13279/2005). In a second, the analysis of the expansions of the mortar bars submitted to the accelerated test according to the norm (ABNT NBR 15577-4/2009) was sought. In addition, we sought to determine the mass loss from the displacements of the bars subjected to the accelerated test. For the execution of these tests, a reference mixture, unused substitutions and four mixtures with bulk substitutions of: 3% SCA and 10% CV were cast; 3% SCA and 20% CV; 10% SCA and 10% CV; 10% SCA and 20% CV. The correlation between the obtained results and the substitution levels, evidenced the efficiency of the use of fly ash in the combat to the expansions, as well as, in the improvement of the mechanical performance. On the other hand, it was verified that the use of silica of rice husk in these contents tends to favor the phenomenon of alkali-silica reaction, determining the reactive character of pozolana.

Keywords: alkali-silica reaction; silica rice husk, fly ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Deposição de gel (seta) entre o agregado (a) e a pasta (P).....	20
Figura 2 – Topo de pilar de vertedouro de barragem acometido pelo RAA.....	21
Figura 3 – Fluxograma metodológico.....	35
Figura 4 – (a) Misturador mecânico, (b) produção de argamassa no misturador.....	41
Figura 5 – Ensaio de tração na flexão em três pontos.....	42
Figura 6 – Ensaio de compressão, configuração.....	43
Figura 7 – Corpos de prova utilizados para o ensaio acelerado.....	44
Figura 8 – (a) Banho Maria, (b) interior do equipamento.....	45
Figura 9 – Equipamento de medição e barra de calibragem.....	45
Figura 10 – (a) Banho termorregulador, (b) interior do equipamento.....	46
Figura 11 – Estado aparente das amostras aos 30 dias de idade, para as diferentes misturas.....	57
Figura 12 – Barras de argamassa da mistura M4, com presença de fissuras.....	57
Figura 13 – Seta (a) formação dos geles de álcali-silica, seta (b) formação de fissuras.....	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultado do ensaio de difração de raio-x de CCA cristalina.....	24
Gráfico 2 – Resultado do ensaio de difração de raio-X CCA amorfa.....	25
Gráfico 3 – Expansão das barras de argamassa com substituições de escória de aciaria.....	32
Gráfico 4 – Efeitos da adição de escória, cinza volante, metacaulim e sílica ativa na redução da expansão do agregado de basalto.....	33
Gráfico 5 – Expansão das barras de argamassa com substituições de cinza de casca de arroz.....	34
Gráfico 6 – Análise de difração de raios x da SCA.....	38
Gráfico 7 – Distribuição granulométrica representativa das adições minerais.....	39
Gráfico 8 – Resistência à tração na flexão.....	49
Gráfico 9 – Resistência à compressão simples.....	51
Gráfico 10 – Variação dimensional média das misturas analisadas.....	54
Gráfico 11 – Comparativo em porcentagem das expansões das misturas em relação à mistura de referência.....	55
Gráfico 12 – Deformação média das misturas submetidas ao ensaio acelerado.....	56
Gráfico 13 – Variação dimensional média das barras de argamassa em comparativo com resultados obtidos por Sores (2016)	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expansão em barras de argamassa, com CII-Z e com substituições de 3, 5 e 10% de sílica de casca de arroz, aos 16, 30 e 45 dias.....	29
Tabela 2 – Expansão média em barras de argamassa, com CII-Z e com substituições parciais do cimento 15% de cinza de casca de arroz natural ou moída	30
Tabela 3 – Expansão em barras de argamassa, com CII-Z e com substituições parciais do cimento por 10% de cinza de casca de arroz natural ou moída, e 10% de cinza volante.....	30
Tabela 4 – Expansão em barras de argamassa, com CII-Z e com substituições parciais do cimento por 15% de cinza de casca de arroz natural ou moída, e 20% de cinza volante.....	31
Tabela 5 – Propriedades químicas do Cimento Portland CPV-ARI.....	37
Tabela 6 – Composição química da Sílica de Casca de Arroz.....	38
Tabela 7 – Propriedades físico químicas da cinza volante.....	39
Tabela 8 – Características do agregado miúdo.....	40
Tabela 9 – Faixa granulométrica utilizada para a produção das argamassas.....	44
Tabela 10 – Resultados médios de resistência à tração na flexão aos 14 e 28 dias de idade.....	48
Tabela 11 – Análise múltipla entre os valores médios de resistência à tração na flexão.....	50
Tabela 12 – Resultados médios de resistência à compressão aos 14 e 28 dias de idade.....	50
Tabela 13 – Análise múltipla entre os valores médios de resistência à compressão....	52
Tabela 14 – Variação dimensional média das barras de argamassa aos 16 dias e classificação quanto a potencialidade reativa das misturas.....	53
Tabela 15 – Variação dimensional média das barras de argamassa aos 30 dias e classificação quanto a potencialidade reativa das misturas.....	53

Tabela 16 – Comparação múltipla de médias das expansões pelo método de Tukey.....	59
Tabela 17 – Variação mássica média.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Concreto Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
CCA – Cinza de casca de arroz
CP – Cimento Portland
CPII-Z – Cimento Portland pozolânico
CPV-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
CV – Cinza volante
MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia
MMA – Ministério do Meio Ambiente
NBR – Norma Brasileira Regulamentada
PAC – Programa de Aceleração do Crescimento
pH – Potencial de hidrogênio
RAA – Reação àlcali-agregado
RAS – Reação àlcali-sílica
RS – Rio Grande do Sul
SCA – sílica de casca de arroz
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS

Al_2O_3 – óxido de alumínio

Ca^{2+} – cátion cálcio

CaO – óxido de cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hidróxido de cálcio

CO_2 – dióxido de carbono

C-S-H – silicato hidratado de cálcio

FeO_3 – óxido de ferro

K^+ – cátion de potássio

K_2O – óxido de potássio

MgO – óxido de Magnésio

MnO_2 – óxido de manganês

N – normal

Na^+ – cátion sódio

NaOH – hidróxido de sódio

Na_2O – óxido de sódio

OH^- – ânion hidróxido

SiO_2 – dióxido de silício

SO_3 – anidrido sulfúrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
OBJETIVOS DA PESQUISA.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivo Específico.....	17
1.2 Justificativa.....	17
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 Reação álcali-sílica.....	19
2.2 Mecanismos de minimização da reação álcali-sílica, adições ativas.....	21
2.2.1 Sílica de Casca de Arroz.....	23
2.2.2 Cinza Volante.....	26
2.3 Método acelerado em barras de argamassa com inibidores de RAS.....	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 Materiais.....	36
3.1.1 Cimento Portland.....	37
3.1.2 Sílica de casca de arroz.....	37
3.1.3 Cinza volante.....	38
3.1.4 Agregado miúdo.....	40
3.2 Metodologia dos ensaios.....	40
3.2.1 Misturas.....	40
3.2.2 Ensaio de tração na flexão em três pontos	41
3.2.3 Ensaio de compressão simples.....	42
3.3 Análise da reação álcali-sílica.....	43
3.3.1 Ensaio acelerado em barras de argamassa.....	43
3.3.2 Controle de variação mássica.....	46
3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	46
3.5 Análise estatística pelos testes de Tukey HSD e Fisher LSD.....	46
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	48
4.1 Resistência a tração na flexão em três pontos.....	48
4.2 Resistência à compressão simples.....	50
4.3 Avaliação da eficiência das substituições na RAA.....	52
4.4 Variação mássica.....	59
4.5 Análise microscópica das barras de argamassa.....	60

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
5.1 Conclusões.....	62
5.2 Sugestões.....	63

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2016), a indústria do cimento brasileira, motivada pelo que foi chamado de “milagre econômico”, teve seu crescimento afirmado na década de 1970, movido por inúmeros projetos habitacionais e de infraestrutura. De maneira que, na mesma época, o consumo por habitante passou de 100 kg para 227 kg por ano. Isso corroborou para que a indústria cimentícia obtivesse uma elevação na produção de cimento de 9 milhões de toneladas/ano para 27 milhões de toneladas anuais. Devido a este crescimento foi proporcionada a instalação de 24 fábricas, em território brasileiro, em vista de abastecer o mercado crescente.

Por sua vez, conforme Souza (2011), em um período mais próximo, meados de 2010, motivado por programas de infraestrutura como o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) e o Programa Minha Casa Minha Vida, assim como por eventos esportivos como a Copa do Mundo de 2014 e as Olimpíadas de 2016, que tiveram vinculados a si a construção ou reformas de hospitais, estádios, sistemas de saneamento, portos, aeroportos e construções de novas rodovias, entre outros, que proporcionaram um crescimento ainda maior na indústria do cimento no país.

Segundo relatórios apresentados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o Brasil chegou ao final de 2013 com uma produção de 71 milhões de toneladas e, mesmo hoje, enfrentando um período de recessão econômica, a indústria cimenteira aponta patamares altamente elevados de produção na margem dos 65 milhões de toneladas.

Em decorrência deste crescimento, também foi majorada a necessidade de conciliar essa demanda crescente com maneiras de redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂), provenientes do processo produtivo do cimento, que é um dos maiores contribuintes para o efeito estufa.

Em vista disto, a indústria do cimento no Brasil alinhou-se com esforços internacionais para reduzir o avanço das mudanças climáticas, como o Protocolo de Quioto, que entrou em vigor em fevereiro de 2005, conforme o Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Souza (2011) afirma que, em 2008, o SNIC, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e grupos associados fundaram o Comitê de Mudanças Climáticas que, entre outras ações, reuniu especialistas em meio ambiente do setor, dando

suporte necessário ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), na elaboração do 2º Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa.

Souza (2011) ainda declara que uma das alternativas possíveis no tocante à diminuição dos gases do efeito estufa é a utilização de cimentos com maior percentual de adições e, ou, a substituição parcial do cimento por adições minerais, vislumbrando diminuir o emprego do clínquer (principal agente emissor de CO₂).

Conforme observado por Dal Molin (2011), as adições minerais são, na generalidade, subprodutos decorrentes das indústrias e das agroindústrias que, na maioria das vezes, depositavam esses materiais em locais inadequados, prejudiciais ao meio ambiente. Por sua vez, acredita-se que o uso das adições minerais tem seu emprego justificado, na grande maioria dos casos, não somente pelo menor impacto ambiental ocasionado, mas também pelas propriedades, que o uso dessas adições confere ao concreto, técnico e economicamente, como ganhos nas propriedades mecânicas e de durabilidade que, como consequência, vêm a reduzir os custos de manutenção das obras confeccionadas com este tipo de material (NEVILLE, 1997; SOUZA, 2011).

Uma problemática ao uso das adições é o fenômeno da reação álcali-sílica (RAS) que, segundo Hasparyk (2011), é uma patologia proveniente do envolvimento da sílica livre presente em algumas adições minerais, ou ainda, nos agregados potencialmente reativos, com o hidróxido de cálcio dissolvido a partir dos álcalis dos cimentos Portland. Assim, faz-se necessário a investigação aprofundada desse fenômeno, buscando-se alternativas como a adoção de blendas de diferentes combinações de adições minerais.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar a avaliação das expansões oriundas da reação álcali-sílica em argamassas produzidas com blendas de sílica de casca de arroz e cinza volante em substituição parcial do cimento Portland CPV-ARI.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram estabelecidos de modo a garantir o objetivo principal deste trabalho, estando listados a seguir:

- a) Analisar a resistência mecânica por intermédio dos ensaios de tração na flexão e de compressão simples.
- b) Analisar os efeitos expansivos oriundos da reação álcali-sílica em barras de argamassa compostas pelas blendas de adições minerais em substituição, em massa, do cimento Portland CPV-ARI, com teores de substituição de: 3% de SCA e 10% CV; 3% SCA e 20% CV; 10% SCA e 10% CV; 10% SCA e 20% CV.
- c) Análise do desprendimento de massa por intermédio do controle das variações de massa dos corpos de prova submetidos ao ensaio de reação álcali-sílica.

1.2 Justificativa

Embora o avanço da tecnologia relacionada ao concreto tenha sido muito grande nas últimas décadas, e muitas pesquisas já tenham sido feitas no que tange a reação álcali-agregado, segundo Mehta e Monteiro (2008), a reação álcali-sílica ainda é uma problemática pouco esclarecida e bastante acentuada em situações em que a estrutura esteja exposta a difusão da umidade e, ou, na presença de severos teores de álcalis, como ambientes marinhos.

Nestas condições, as manifestações desse fenômeno, não somente podem vir a degradar, mas também em muitas situações, segundo Hasparyk (2011), acabam por comprometer o uso dessas estruturas, podendo alterar a estabilidade de diversos componentes, sejam estas alterações decorrentes das expansões geradas no concreto, pelo surgimento de fissuras, assim como, proporcionadas pelas movimentações das estruturas, deslocamentos, entre outras manifestações nocivas.

Conforme o quadro ocorrido na barragem da Usina Hidroelétrica Apolônio Sales de Oliveira (Moxotó), onde que, de acordo com Dechichi (1998), foi corroborada a desativação da usina logo após a verificação da presença de atrito entre as pás das turbinas e a estrutura devido às expansões geradas pela reação. De maneira semelhante ao ocorrido na barragem de Moxotó, conforme Hasparyk (2011), outras

barragens brasileiras foram acometidas pela reação álcali-sílica, como as barragens de Joanes, de Peti, dentre outras.

Dechichi (1998) afirma que a reação não se detém a obras de caráter hidráulico, de modo que a presença do fenômeno também já foi observada em blocos de fundações, como o caso ocorrido no Edifício Areia Branca em Recife/PE.

Em vista disso, como ainda não são difundidos métodos eficazes de recuperação de estruturas que apresentem essa patologia, a prevenção e a análise do comportamento de concretos elaborados com o emprego de adições de diversas naturezas, frente a essa patologia, tornam-se de relevante importância.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Reação álcali-sílica

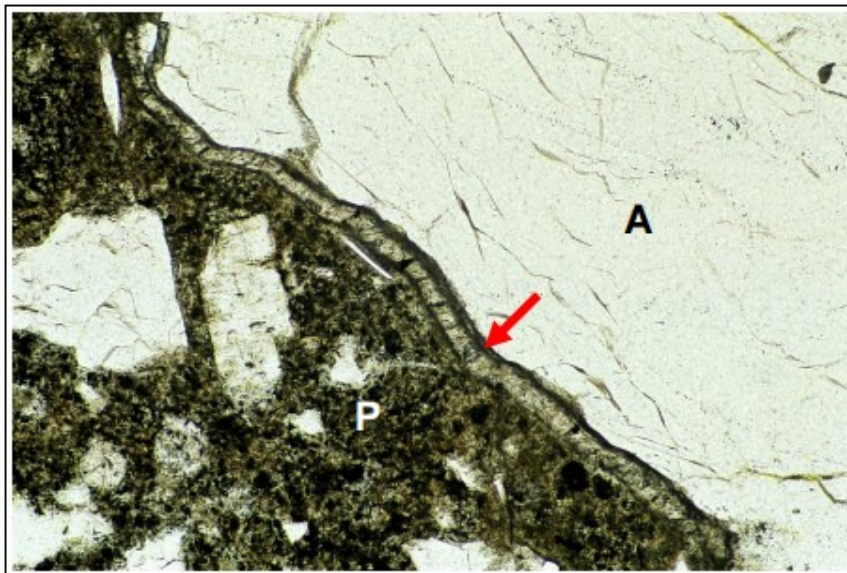
A reação álcali-sílica é um dos três tipos de manifestação da reação álcali-agregado. Advinda do envolvimento da sílica ativa dos agregados e, ou, das adições minerais pelo hidróxido de cálcio dissolvido a partir dos álcalis dos Cimentos Portland (ANDRADE; FIGUERÔA, 2007; HASPARYK, 2011).

Munhoz (2007, p. 12) assegura que há a existência de três fatores condicionantes para o início da reação álcali-sílica no concreto: umidade, presença de fases reativas no agregado e, adições e concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros. De modo que, na ausência de um destes fatores a reação não possui meios favoráveis à sua ocorrência.

Embora que Poole (1992, p.28) e diversos outros autores afirmem que um ambiente de umidade possua vital importância para o desenvolvimento do RAS, servindo como transporte de álcalis e hidroxilas, e contribuindo para o inchamento do gel higroscópico, Hasparyk (2011), por sua vez, afirma que a reação álcali-sílica também pode ter sua ocorrência dada em ambientes secos, desde que haja internamente umidade relativa suficiente para o desenvolvimento da reação, nas margens de 80% a 85%.

Em suma, segundo Poole (1992, p. 21-22), a reação álcali-sílica acarretará na hidrólise da sílica ativa presente nos agregados e, ou, adições minerais, pela adsorção dos íons Ca^{2+} , Na^+ , K^+ e a hidroxila OH^- da pasta do cimento. Ocorrendo a dissolução da superfície da sílica pelas hidroxilas e a adsorção de íons Ca^{2+} , para a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Prosseguindo até que a taxa de cristalização do C-S-H for maior que a dissolução da sílica, proporcionando, desta forma, a formação de silicato de cálcio hidratado em sua superfície. Caso contrário, há a continuidade da dissolução, de maneira, em que é proporcionada a penetração do sódio e do potássio, ocasionando o desenvolvimento de um gel higroscópico de álcali-sílica, que absorve a água ampliando seu volume, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Deposição de gel (seta) entre o agregado (a) e a pasta (P)



Fonte: ABCP apud Munhoz (2007, p. 70)

No entanto, conforme Forum (1965, p. 164), o gel formado pode ou não ser expansivo, devido ao efeito da concentração de cálcio ou de álcalis. Havendo a expansão somente se a concentração de álcalis for maior, resultando na formação de um gel expansivo de álcali-sílica. Caso contrário se formará um gel não expansivo de cal-álcali-sílica.

Estudos realizados por Thomas et al. (1991) mostraram que inicialmente o gel formado na reação tende a apresentar grandes quantidades de sódio e potássio, assim como, pequenas quantias de Ca^{2+} , apresentando aspecto fluídico com capacidade de se dispersar por entre os poros da pasta de cimento.

Por sua vez, na medida em que os álcalis do gel são trocados por íons Ca^{2+} , gera-se um gel viscoso, com menor capacidade de dispersão. Onde que, a embebição desse gel leva ao inchamento do mesmo e a elevação das tensões internas, que segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 170), podem proporcionar o surgimento de fissurações e deslocamentos, que ocasionam no colapso da estrutura, como pode ser observado no caso apresentado por Kuperman et al., (1997, p. 215), onde que houve a fissuração do topo de um pilar de vertedouro de uma barragem devido ao fenômeno mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Topo de pilar de vertedouro de barragem acometida pelo RAA



Fonte: Kuperman et al. (1997, p. 215)

Foi observado que na reação álcali-sílica tem-se inicialmente o “[...] módulo de elasticidade como o principal afetado, podendo ser reduzido no tempo de forma importante em função do intenso quadro de fissuração produzido pelas expansões [...]” (HASPARYK, 2011, p. 936).

Posteriormente, segundo Figuerôa e Andrade (2007), tais processos podem ter diferentes ramos direcionais, podendo haver perturbações nas resistências à compressão e tração do concreto.

É importante salientar que, segundo Hasparyk (2011), no que se refere a resistência à compressão, podem haver ganhos mecânicos em decorrência de produtos gerados no interior do concreto, que acarretam em falsos resultados, dificultando o diagnóstico do fenômeno. Desta forma, em função do estágio em que se encontra a reação, pode ter-se um grave comprometimento da durabilidade da estrutura e de seu desempenho.

2.2 Mecanismos de minimização da reação álcali-sílica, adições ativas

Existem quatro teorias propostas por Glasser (1992) e por Munhoz (2007, p. 36), as quais explicam a eficiência do uso de adições ativas na redução do RAS, que são: a diluição dos álcalis, a maior retenção dos álcalis na estrutura do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a mitigação da permeabilidade e a diminuição do pH. Porém, não há existência de um consenso no meio técnico sobre esses mecanismos.

- I) Diluição dos álcalis: De modo que o clínquer é a principal fonte de álcalis do cimento Portland, à maneira em que é feita substituição do clínquer por adições ativas, apresenta-se uma diluição dos álcalis, desde que os teores de álcalis presentes nas adições sejam inferiores aos do clínquer.
- II) Retenção dos álcalis no C-S-H: As expansões são evitadas, por boa parte dos álcalis presentes na estrutura que ficam indisponíveis para reagir com o agregado, devido ao silicato de cálcio hidratado formado a partir da reação do hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento Portland com as adições ativas. O efeito das pozolanas é reduzir a basicidade dos produtos hidratados do cimento Portland.
- III) Redução da permeabilidade: as adições ativas diminuem e, ou fragmentam a percolação de água no interior do concreto, por meio do refinamento do tamanho dos poros, reduzindo sua permeabilidade. Desta forma, limitando o ingresso de umidade e a difusão dos álcalis para reagirem com os minerais.
- IV) Redução do pH: A hidratação do cimento Portland com os componentes reativos das adições reativas, geram uma reação do hidróxido de cálcio, reduzindo-o e, por consequência, o pH necessário para o desenvolvimento da reação álcali-sílica.

Resumidamente, devido aos fatores necessários para a formação do fenômeno da reação álcali-sílica, uma das alternativas apontadas para esse estudo consiste no uso de adições minerais, cinza de casca de arroz produzida com queima controlada e cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland CPV-ARI.

Uma vez que, conforme Mehta e Monteiro (2008), os efeitos proporcionados pelo uso de algumas adições conferem ao concreto uma redução significativa na porosidade das pastas, propiciando um refinamento dos grãos. Há também, uma quebra na continuidade dos poros, devido ao efeito filler atribuído às adições, distribuindo em caráter de maior homogeneidade os produtos de hidratação do cimento e diminuindo o transporte de fluidos no interior do concreto, sejam eles provenientes de imersão, capilaridade e, ou, difusão. Além disso, também se observa, em alguns casos, um aumento da resistência mecânica.

Segundo Isaia (1995), a finura e a pozolanicidade são as principais propriedades que justificam o uso no concreto de adições minerais. Com base nisso,

o uso de adições minerais no concreto tende a melhorar a sua durabilidade e sua resistência mecânica, além de trazer um forte auxílio no que se refere na diminuição dos impactos ambientais gerados, pela não disposição no meio ambiente desses materiais e pelo menor consumo das matérias primas na fabricação do cimento Portland, como o clínquer.

2.2.1 Sílica de Casca de Arroz

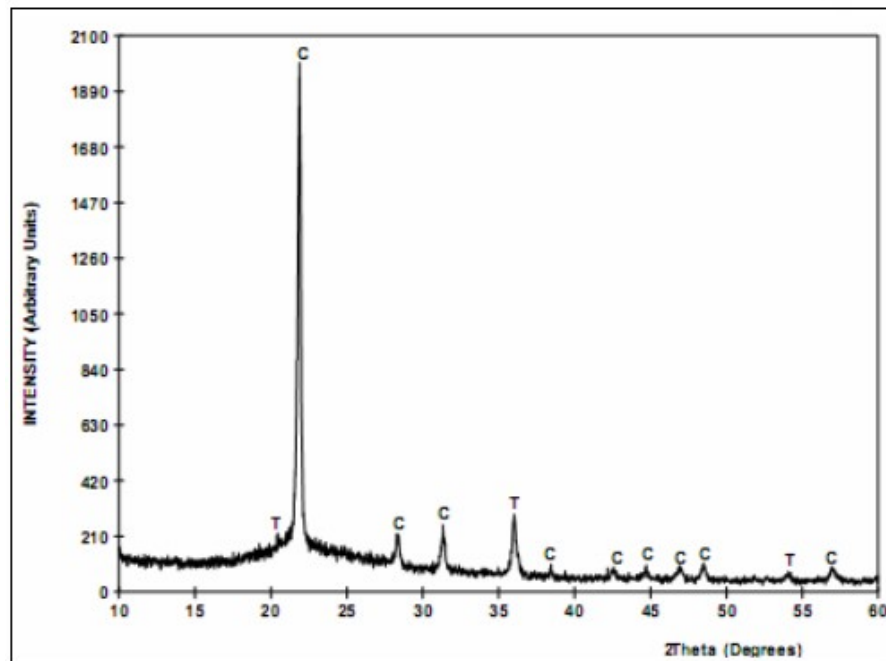
A cinza de casca de arroz é um subproduto da cadeia orizícola resultante da combustão da casca de arroz, usada como fonte de energia térmica no processo de geração de calor e vapor, fundamentais para os processos de secagem e parbolização dos grãos na indústria de beneficiamento de arroz. Devido a sua alta capacidade calorífica também se tem utilizado a casca do arroz no processo de geração de energia elétrica.

Conforme Mehta e Monteiro (2011), para cada tonelada de arroz em casca gerada, são produzidas duzentos quilogramas de casca que, passando pelo processo de combustão, geram 40kg de cinza.

Souza (2011) afirma que o uso de cinza de casca de arroz na construção civil tem sido justificado pelo elevado teor de sílica, entre 90% a 95%, presentes na sua composição, podendo ser aplicada na produção de concretos, argamassas, cerâmicas, vidros, na estabilização de solos, entre outras aplicações. O que, segundo Hasparyk (2011), tem-se no seu processo de obtenção relação direta quanto a sua eficácia como material pozolânico.

Deste modo, observa-se que, quando a combustão ocorre de forma não controlada, geralmente se obtém um produto com grande proporção de minerais cristalinos (não reativos), com reduzido valor pozolânico, devendo ser micronizado para potencializar a atividade pozolânica, conforme é observado por Barbosa, M. et. al., (2006), no Gráfico 1, onde pode-se perceber a presença de cristais em uma amostra CCA com queima não controlada através de picos no ensaio de difração de raio-X.

Gráfico 1 – Resultado do ensaio de difração de raio-x de CCA cristalina

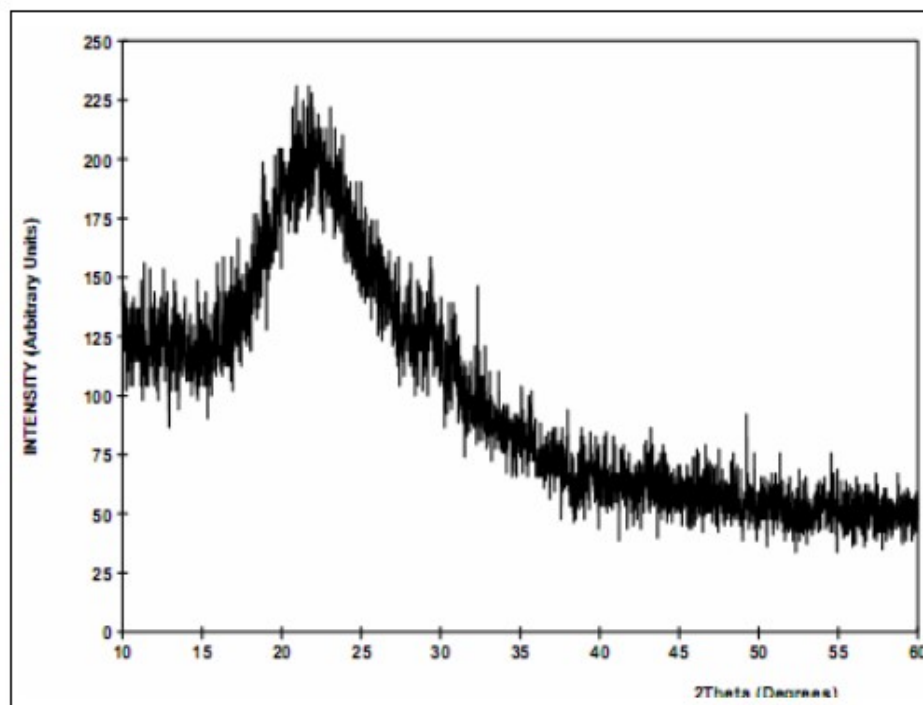


Fonte: Barbosa, M. et al. (2006b, p. 62)

Souza (2011) afirma que essas cinzas de queima não controlada, ou “in natura”, podem, devido a reação entre a sílica sob a forma microcristalina e os álcalis presentes no cimento, apresentarem efeitos expansivos do tipo RAS.

Por outro lado, conforme Mehta e Monteiro (2008), quando o processo de obtenção da cinza ocorre de forma controlada, se obtém uma pozolana altamente reativa, constituída essencialmente de sílica pura, na forma não cristalina, e em uma estrutura celular comumente denominada de Sílica de casca de arroz, como pode ser visto no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Resultado do ensaio de difração de raio-X CCA amorfa



Fonte: Barbosa, M. et al. apud Souza (2011, p. 67)

Foi observado por Houston (1972), por meio de análises químicas, que amostras de cinza de casca de arroz de queima controlada apresentam teores de sílica variando entre 87% a 97%, e os teores de álcalis, de 1% a 5%, sendo que os álcalis, juntamente com o carbono, são as maiores impurezas presentes no subproduto. O álcali em maior quantidade presente na cinza é o potássio (K_2O), oriundo da fertilização feita nas lavouras de arroz.

Segundo Hasparyk (2011), com a adição de cinza de casca de arroz há uma fragmentação dos poros do concreto e há a redução do teor de hidróxido de cálcio conjugado com a sílica, resultando num melhoramento na interface entre a pasta e o agregado.

Devido a essas e outras características positivas que a cinza de casca de arroz de queima controlada confere ao concreto, tem-se justificado o interesse da comunidade acadêmica por esse tipo de material.

No entanto, como visto, algumas cinzas de casca de arroz, principalmente as naturais, podem comportar-se de maneira expansiva devido à reação álcali-sílica, como observado por Höer (2011). Por isso, torna-se interessante o uso de cinza

volante na formação de misturas ternárias, como a solução para mitigar a expansão gerada pela reação álcali-sílica.

2.2.2 Cinza Volante

Segundo Souza (2011, p. 70), a cinza volante é um material finamente particulado que contém alto teor de sílica e alumina, proveniente da precipitação eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão mineral, pulverizado em altas temperaturas, para geração de energia, em usinas termoelétricas.

Conforme Souza (2011, p. 70), a cinza volante é formada pela combinação de fases amorfas ou vítreas (60-90%) e fases cristalinas, constituídas principalmente por silicatos (SiO_2 , 1-35%), alumina (Al_2O_3 , 10-30%), óxidos de ferro (FeO_3 , 4-20%) e de cálcio (CaO , 1-35%).

Quando a cinza volante é utilizada em substituição parcial do cimento Portland, diversos são os efeitos que podem ser observados, tanto na fase fresca quanto endurecida do concreto. O que, segundo Dal Molin (2011), poderá proporcionar melhorias tanto na coesão, quanto na trabalhabilidade do concreto, diminuído a segregação e a exsudação. Assim como, na diminuição da sua temperatura atrelada às reações de hidratação, aumento na idade de cura, aumento no tempo de pega, ganhos de resistência mecânica, dentre outros.

Sherata et al. (1999, p. 1915) elucidam que na ocorrência dessa mistura, dependendo de alguns fatores – tais como o teor de substituição, o teor de álcalis do cimento, a disponibilidade de álcalis, a finura e o teor de sílica –, há uma diminuição significativa na concentração de álcalis (Na^+ e K^+) e hidroxilas (OH^-) na solução dos poros do concreto, promotores da RAS.

Em estudos realizados por Bleszynski e Thomas (1998) foi observado que concretos com cinza volante apresentaram uma redução da disponibilidade de cálcio, evitando o desenvolvimento de produtos expansíveis, devido à redução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando geles de caráter fluídico com capacidade de dispersão pela matriz cimentícia, tendendo à diminuição das tensões internas. Os autores também explanaram que as possíveis expansões que podem ser geradas acabam por ocorrer pelo consumo parcial do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, devido a reação álcali-sílica ocorrer mais rapidamente que a reação pozolânica, onde formas muito reativas de sílica estão

presentes, assim como pelo alto teor de cálcio da cinza volante, ou ainda pela quantidade insuficiente de cinza volante ou por sua baixa atividade pozolânica.

Bleszynski e Thomas (1998) vinculam a eficácia da cinza volante no combate da RAS à redução da alcalinidade da solução dos poros, da redução da disponibilidade de cálcio, do refinamento da estrutura dos poros reduzindo a mobilidade iônica e permeabilidade à água.

Sherata e Thomas (2000, p. 1069) asseguram que, independentemente dos teores de cinza volante utilizados na substituição, é possível observar melhorias do concreto frente ao RAA, particularmente o RAS, em relação a concretos produzidos sem substituição. Os referidos autores afirmam ainda que os teores de substituição possuem relação direta com diminuição das expansões. Onde constataram que cinzas com altos teores de álcalis ou cálcio, ou seja, de menor eficiência, necessitam de teores maiores para que sejam minimizados os efeitos expansivos.

Sherata e Thomas (2000) ainda observaram em seus estudos que quando adotada a substituição de 25% do cimento Portland por uma cinza volante com alto teor de cálcio é possível de se manter a expansão abaixo de uma taxa 0,04%, mesmo depois de um período de dois anos. No entanto, ao se utilizar uma cinza volante com alto teor de cálcio ou álcalis, por sua vez, necessitar-se-á de um teor de substituição nas margens de 40% a 50% para que seja mantido o mesmo limite de expansão.

Outras características importantes do uso da cinza volante em substituição parcial do cimento no concreto, apontadas por Dal Molin (2011), estão vinculadas ao fato de a cinza proporcionar a formação de compostos hidratados com maior homogeneidade e com baixo teor de CH e C-S-H com menor relação C/S, aumentando a densidade da pasta, de modo a lhe conferir um refinamento e uma melhora na distribuição dos poros que, por consequência, diminuem a permeabilidade e o coeficiente de difusividade de cloretos da mistura melhorando as propriedades do concreto frente à reação álcali-sílica.

Deste modo, a incorporação de cinzas volantes à composição do concreto vem a trazer não somente benefícios de ordem técnica, assim como traz ganhos ao meio ambiente, pois há aproveitamento de um rejeito das usinas termoelétricas, do mesmo jeito que há redução da emissão de CO₂ consequentes da fabricação do clínquer.

2.3 Método acelerado em barras de argamassa com inibidores de RAS

Segundo Höehr (2011), os ensaios que utilizam adições minerais frente à reação álcali-sílica são de certa forma muito recentes. De maneira que o fenômeno pode ser avaliado tanto em concretos, quanto em argamassas.

Os ensaios realizados em concretos, tendem-se a se aproximar mais da realidade ocorrida "in loco", no entanto, devido à grande demora de obtenção de resultados que o ensaio proporciona, que segundo Höehr (2011), demoram cerca de 1 a 2 anos, tem-se justificado o uso de ensaios acelerados em argamassas, o que, segundo Hasparyk (2011, p. 966), permitem a avaliação da potencialidade reativa do agregado frente a RAS em até 30 dias.

Uma vez diagnosticada a presença de agregados reativos, a investigação da mitigação das expansões em barras de argamassa é também prescrita pelo método acelerado, conforme a norma ABNT NBR 15577/5:2008. O método permite a avaliação do desempenho de cimentos Portland na presença de adições ou não, frente às expansões oriundas às reações álcali-sílica e álcali-silicato.

É proposto pela norma ABNT NBR 15577/1:2008 o limite de variação linear de 0,10%, aos 16 dias. Visto que expansões inferiores a esse limite, indicam, na maioria dos casos, um comportamento inócuo.

Soares (2016) analisou a substituição do cimento Portland CII-Z por teores de 3%, 5% e 10% de cinza de casca de arroz, além da amostra de referência com 0% de substituição. O trabalho realizado por Soares (2016) fez uso de cinzas obtidas com queima controlada, fornecendo um material tipicamente amorfo, como poderá ser observado no Gráfico 5, apresentado posteriormente. Esta cinza, quando obtida nesses padrões de controle, como já foi comentado, tem sua denominação usual de sílica de casca de arroz (SCA).

Soares (2016) observou, como pode ser visto na Tabela 1, que para o material utilizado somente os traços de referência e o traço contendo 3% de substituição SCA encontraram-se dentro dos limites de expansão adotados pela norma ABNT NBR 15577:2008, de 0,1% aos 16 dias e 0,19% aos 30 dias.

As amostras contendo o teor de 5% de substituição demonstraram-se com elevado potencial de reatividade, ultrapassado os limites de expansão conferidos pela norma aos 7 dias de idade.

Por sua vez, as amostras com teor de substituição de 10% de sílica de casca de arroz apresentaram comportamento inócuo até a idade aproximada de 30 dias de idade, no entanto, transpassando esse período foram as amostras que apresentaram mais alto grau de reatividade da pesquisa.

Tabela 1 – Expansão em barras de argamassa, com CII-Z e com substituições de 3, 5 e 10% de sílica de casca de arroz, aos 16, 30 e 45 dias

Idade	Porcentagem limite aos 16 dias: 0,1%		Porcentagem limite aos 30 dias: 0,19%		45 dias
	Expansão Média (%)	Classificação NBR 15577-4:2008	Expansão Média (%)	Classificação NBR 15577-4:2008	
Ref.	0,0709	Inócuo	0,0537	Inócuo	0,1203
3%	0,0784	Inócuo	0,0862	Inócuo	0,1242
5%	0,8223	Reativo	1,0707	Reativo	1,1116
10%	0,0289	Inócuo	0,7800	Reativo	1,1338

Fonte: Soares (2016, p.47)

Uma alternativa ao efeito expansivo observado por Soares (2016) em argamassas contendo teores superiores a 3% de sílica de casca de arroz é a combinação de cinza volante a essas misturas.

Estudo esse realizado por Höehr (2011), onde que, fazendo parte de um estudo maior, que analisou o comportamento de diferentes misturas frente à reação álcali-sílica, em comparativo a argamassas elaboradas com diferentes tipos de cimento, se constatou que para argamassas confeccionadas com cimento Portland CII-Z, com diferentes teores de substituição do cimento por cinza de casca de arroz natural ou moída, a mistura de cinza volante proporcionou uma redução significativa das expansões geradas pela RAS. Como pode ser observado pelas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Expansão média em barras de argamassa, com CII-Z e com substituições parciais do cimento 15% de cinza de casca de arroz natural ou moída

Misturas	Expansão média (%) 16 dias	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%) 30 dias	Classificação NBR 15577-5
CII-Z	0,079	Inócuo	0,18	Inócuo
CII-Z + CCA moída	0,044	Inócuo	0,10	Inócuo
CII-Z + CCA natural	0,740	<i>Reativo</i>	0,79	<i>Reativo</i>

Fonte: Höher (2011, p. 115)

Tabela 3 – Expansão em barras de argamassa, com CII-Z e com substituições parciais do cimento por 10% de cinza de casca de arroz natural ou moída, e 10% de cinza volante

Misturas	Expansão média (%) 16 dias	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%) 30 dias	Classificação NBR 15577-5
CII-Z + 10 % cinza volante	0,0220	Inócuo	0,096	Inócuo
CII-Z + 10 % cinza volante + CCA moída	0,0068	Inócuo	0,046	Inócuo
CII-Z + 10 % cinza volante + CCA natural	0,4000	<i>Reativo</i>	0,480	<i>Reativo</i>

Fonte: Höher (2011, p. 116)

Höher (2011) observou que somente com substituições do cimento portland CII-Z superiores a 20% de cinza volante foi possível tornar inócuo o comportamento reativo apresentado pelas barras compostas pela substituição parcial de 10% de cinza de casca de arroz sem moagem (natural), para o cimento Portland CII-Z, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Expansão em barras de argamassa, com CII-Z e com substituições parciais do cimento por 15% de cinza de casca de arroz natural ou moída, e 20% de cinza volante

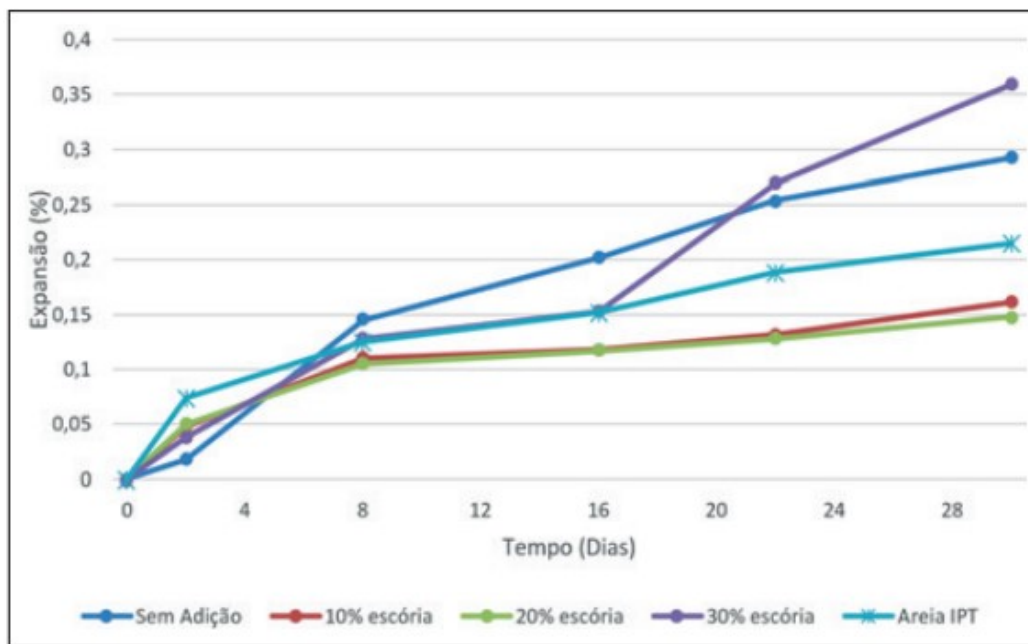
Misturas	Expansão média (%) 16 dias	Classificação NBR 15577-4	Expansão média (%) 30 dias	Classificação NBR 15577-5
CII-Z + 20 % cinza volante	0,0035	Inócuo	0,046	Inócuo
CII-Z + 20 % cinza volante + CCA moída	0,006	Inócuo	0,038	Inócuo
CII-Z + 20 % cinza volante + CCA natural	0,060	<i>Inócuo</i>	0,140	<i>Inócuo</i>

Fonte: Höher (2011, p. 120)

As Tabelas 3 e 4 também exemplificam a proposição supracitada por Sherata e Thomas (2000), no que se refere a afirmação de que com o aumento do teor de cinza volante na substituição há uma diminuição das expansões geradas pela reação álcali-agregado.

Além da cinza de casca de arroz e da cinza volante, muitos são os estudos que buscam a utilização de outros tipos de adições, assim como diferentes tipologias de cimento em busca da mitigação do fenômeno do RAS, como é caso apresentado por Souza et al. (2016, p. 572 -586), em que foi adotada a utilização de escória de aciaria como substituição parcial ao cimento Portland CP-V ARI RS, neste estudo foi observado que a adição mineral teve capacidade de proporcionar a redução das expansões, para a grande maioria dos teores de substituição ensaiados. Como pode ser visto no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Expansão das barras de argamassa com substituições de escória de aciaria



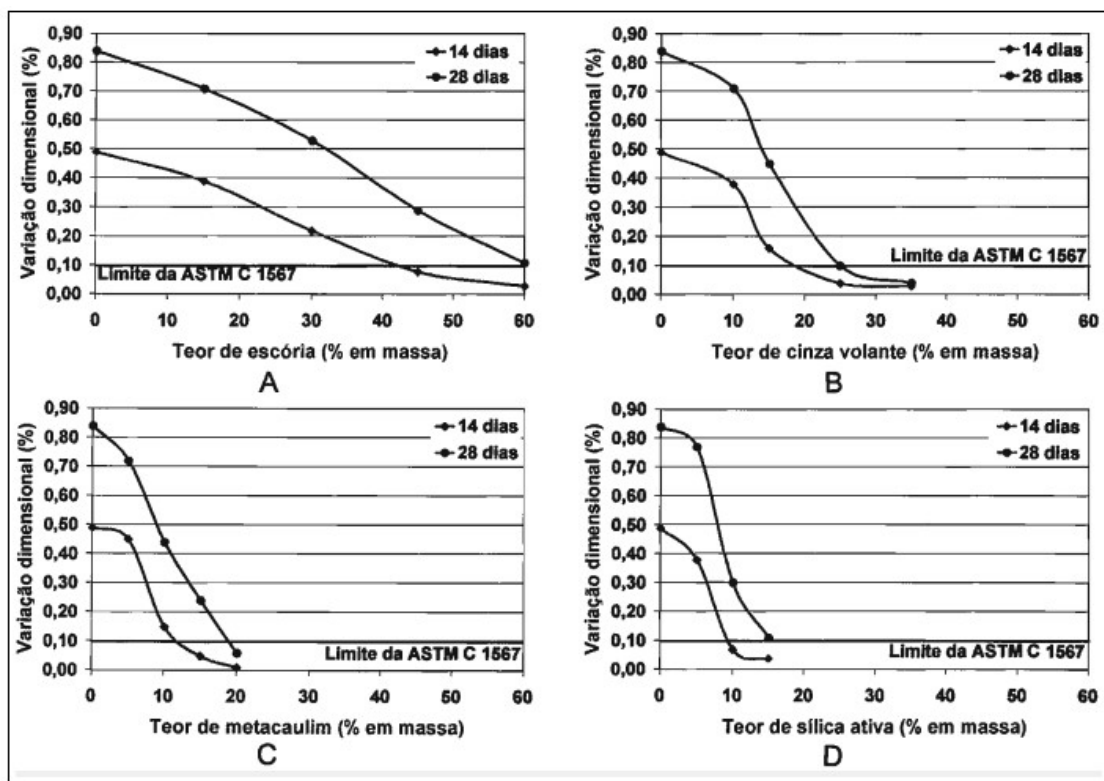
Fonte: Souza et al., (2016, p. 583)

No entanto, também foi constatado que mesmo as barras que apresentaram a menor expansão média, compostas com 20% de substituição, não atenderam as especificações propostas pela ABNT NBR 15577-1/2008, apresentando, aos 16 dias de idade, uma expansão de 0,12% maior que o limite de 0,10% proposto pela norma.

Por sua vez, Cunha e Cincontto (2008) testaram diferentes teores de substituição ao cimento Portland CPV- ARI frente à RAS, utilizando escórias de alto-forno, cinza volante, metacaulim ou sílica ativa. Os ensaios foram realizados segundo a ASTM C1567/2005, que configura como comportamento positivo a expansões inferiores a 0,10% aos 14 dias de cura.

Na Gráfico 4 pode-se observar uma redução ordenada das expansões com o aumento do teor de adição ativa. Cunha e Cincontto (2008) também observaram que os perfis dos materiais pozolânicos são semelhantes e indicam uma analogia de mecanismo de reação. De maneira que os teores mínimos de adição para mitigar a expansão, causada pela reação álcali-sílica, da amostra de basalto, para valores inferiores a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina são: 45% de escória de alto-forno; 20% de cinza volante; 13% de metacaulim e 9% de sílica ativa.

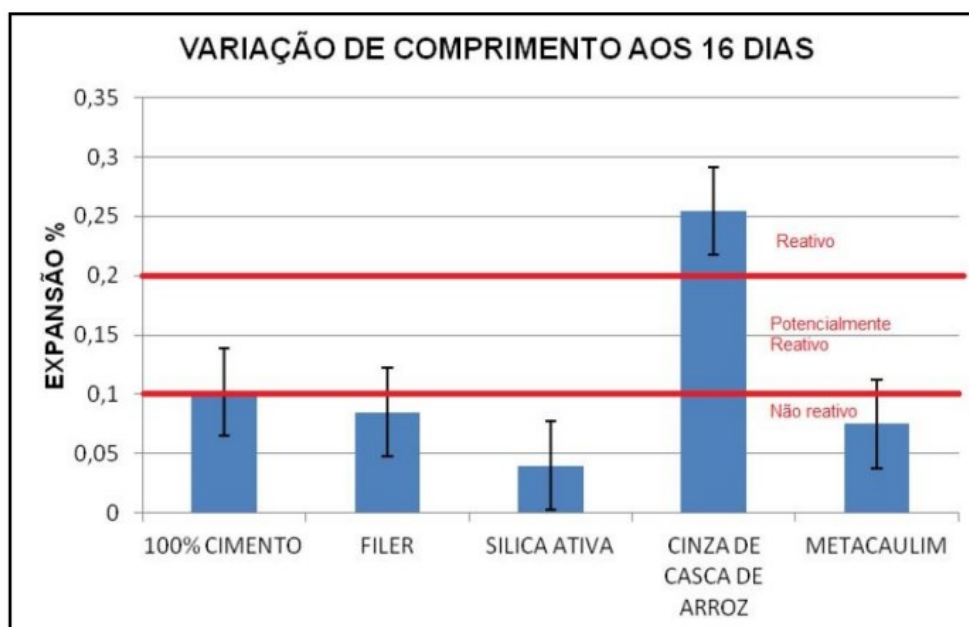
Gráfico 4 – Efeitos da adição de escória, cinza volante, metacaulim e sílica ativa na redução da expansão do agregado de basalto



Fonte: Cunha e Cincontto (2008, p.13)

Já Adorno (2013) verificou os efeitos expansivos da RAS em barras de argamassa compostas com Cimento Portland CP-V e barras de argamassas compostas com substituições do cimento por filer, sílica ativa, cinza de casca de arroz e por metacaulim. E, como pode ser observado no Gráfico 5, foi constatado pela pesquisa que, com exceção das barras compostas com cinza de casca de arroz, todas as argamassas miscigenadas por adições minerais apresentaram tendência de redução nas expansões, mantendo-se abaixo do limite estipulado pela norma e apresentando comportamento inócuo para a RAS aos 16 dias de idade.

Gráfico 5 – Expansão das barras de argamassa com substituições de cinza de casca de arroz



Fonte: Adorno (2013, p. 14)

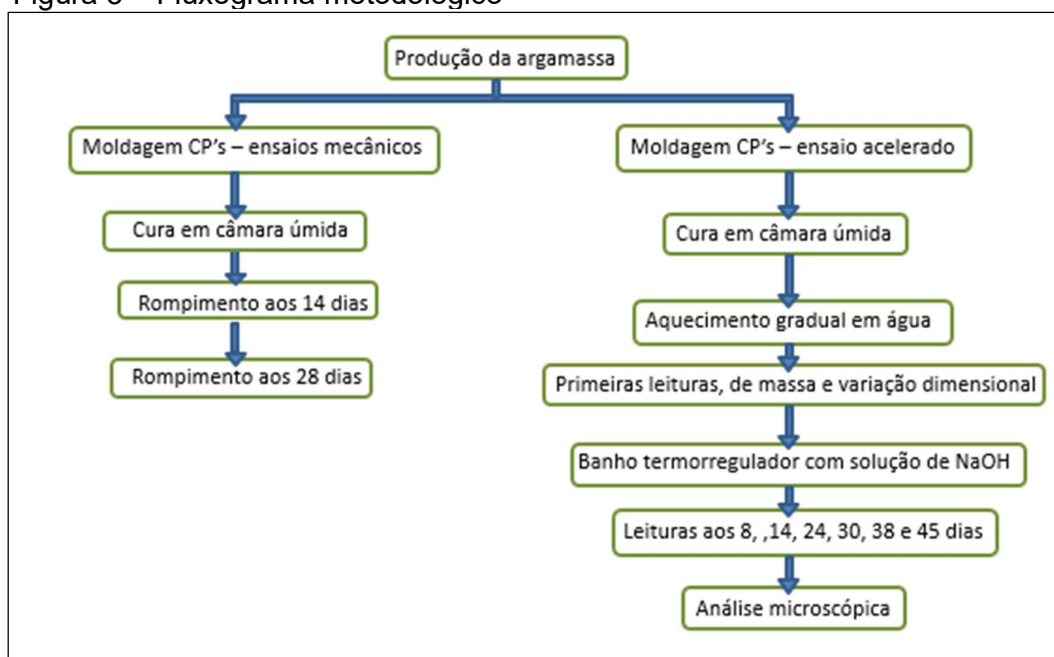
3 MATERIAIS E METODOS

Para a avaliação do potencial reativo da blenda de sílica de casca de arroz com cinza volante em um ambiente inóspito, foram empregados os seguintes ensaios:

- análise das resistências mecânicas à tração na flexão e à compressão;
- método acelerado em barras de argamassa;
- controle da variação mássica das amostras submetidas ao método acelerado;
- análise por microscopia eletrônica de varredura;
- análise estatística pelo método de Tukey.

As formas de realização dos processos metodológicos realizados, nessa pesquisa, são demonstrados no fluxograma mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma metodológico



Fonte: Elaboração própria

A determinação das porcentagens teve como base o estudo realizado por Soares (2016) que, conforme aludido anteriormente, constatou que com a substituição de 3% de sílica de casca de arroz, ao cimento CP II-Z, proporcionou melhoras nas propriedades do concreto frente à reação álcali-sílica. Por outro lado, Soares (2016),

também verificou que as barras de argamassa produzidas com o teor de 10% de SCA apresentaram os piores desempenhos.

Em vista disso, foram realizadas alterações em massa, tendo por base as misturas de pior e melhor desempenho da pesquisa realizada por Soares (2016), adotando-se blendas contendo 10% e 20% de cinza volante, para os teores de 3% e 10% de sílica de casca de arroz.

Nesta pesquisa, foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI, que não possui adições de pozolanas em sua constituição. Adotando-se as seguintes simbologias:

- M1 – Mistura de referência com cimento Portland CPV-ARI, sem substituições;
- M2 – Mistura contendo 3% de sílica de casca de arroz e 10% de cinza volante em substituição ao cimento Portland CPV-ARI;
- M3 – Mistura contendo 3% de sílica de casca de arroz e 20% de cinza volante em substituição ao cimento Portland CPV-ARI;
- M4 – Mistura contendo 10% de sílica de casca de arroz e 10% de cinza volante em substituição ao cimento Portland CPV-ARI;
- M5 – Mistura contendo 10% de sílica de casca de arroz e 20% de cinza volante em substituição ao cimento Portland CPV-ARI.

3.1 Materiais

Na elaboração das barras de argamassas usadas no presente estudo foram utilizados:

- cimento Portland CPV-ARI;
- areia local;
- sílica de casca de arroz SCI;
- cinza Volante.

As especificações dos materiais utilizados são abordadas nos itens subsequentes.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland empregado neste estudo é do tipo CPV-ARI de fabricação da Cimpor, produzido em Pedro Leopoldo – MG e comercializado no estado do Rio Grande do Sul. A escolha deste tipo de cimento foi atribuída ao seu grau de pureza, apresentando em sua composição, segundo o fabricante, entre 95 -100% de clínquer e gesso, e 0 - 5% de fíler.

Na Tabela 5 estão dispostas algumas das propriedades físico-químicas do Cimento Portland CPV-ARI, disponibilizado no boletim de análises técnicas da supremo secil, para as datas de 1 de novembro de 2016 à 30 de novembro de 2016.

Tabela 5 – Propriedades químicas do Cimento Portland CPV-ARI

Perda ao Fogo (%)	CO ₂ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente Alcalino (%)
3,24	2,22	5,62	2,91	0,80	0,85
Expansibilidade em autoclave (%)	Massa específica (g/cm ³)	Área específica - Blaine (cm ² /g)		Finura – residual na peneira de 75µm (%)	
0,5	-	4893		0,00	

Fonte: Adaptado de Supremo Secil (2017)

Na Tabela 5, pode-se observar um equivalente alcalino de 0,85% superior ao limite de 0,6% proposto por Staton, que segundo Hobbs (1988), Staton afirma que cimentos com equivalentes alcalinos superiores 0,6% são propensos ao desenvolvimento da RAA.

3.1.2 Sílica de casca de arroz

A sílica de casca de arroz utilizada neste trabalho é da marca Silcca Nobre SCI, produzida em Alegrete-RS, pela empresa Pilecco Nobre Alimentos LTDA. No trabalho de Marangon et al. (2013) foi avaliado o índice de atividade pozolânica da sílica produzida por essa empresa, a qual possuiu índice de atividade pozolânica igual a 101,7%, superior ao índice mínimo previsto pela ABNT NBR 12653:2015 de 75%, classificando-se como material pozolânico.

Na Tabela 6 são apresentadas as propriedades físico-químicas da sílica de casca de arroz Silcca Nobre SCI.

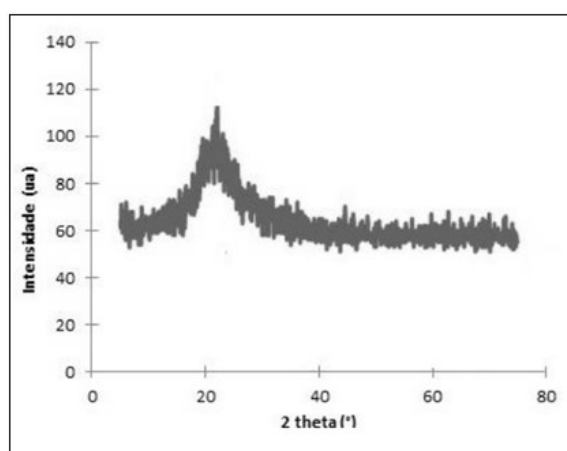
Tabela 6 – Composição química da Sílica de Casca de Arroz

Perda ao Fogo (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
3,50	91,48	0,00	0,05	0,32	0,15
Na ₂ O (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	MnO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	
0,04	0,36	1,40	0,32	0,45	

Fonte: Marangon et al. (2013, p. 3)

O Gráfico 6 mostra a curva realizada pelo difratograma que demonstra o comportamento predominante amorfo da sílica. Atribuído à existência de um alargamento nos picos e o aparecimento de bandas.

Gráfico 6 – Análise de difração de raios x da SCA



Fonte: Marangon et al. (2014, p. 4)

3.1.3 Cinza volante

A cinza volante utilizada é proveniente do município de Candiota-RS, produzida na Termoelétrica Presidente Médice. Na Tabela 7 estão dispostas as propriedades físico-químicas da cinza volante.

Tabela 7 – Propriedades físico químicas da cinza volante

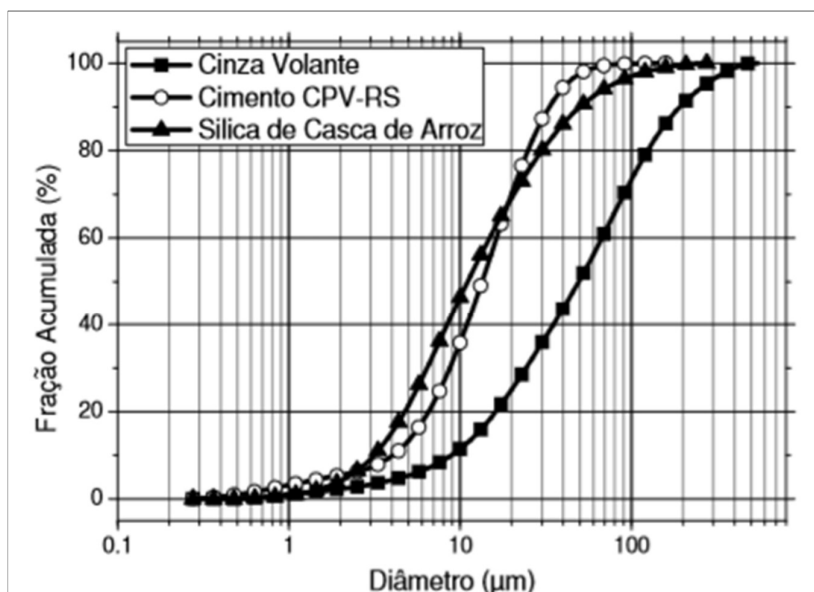
Perda ao Fogo (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
0,60	67,08	21,29	4,44	0,87	0,14
Na ₂ O (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	MnO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	
0,40	2,85	2,05	-	-	

Fonte: Adaptado de Höehr (2011, p. 86)

Segundo Prezzi et al. (1997), o desenvolvimento das expansões oriundas da RAA, estão ligadas diretamente com a composição dos géis da reação, onde que as maiores expansões foram relacionadas às maiores concentrações de Na₂O e às menores relações de CaO/ Na₂O. Desta forma, observando-se as Tabelas 6 e 7 é percebida, na cinza volante em detrimento da sílica de casca de arroz, a maior tendência de efeitos expansivos, relacionados às suas propriedades químicas.

No Gráfico 7 é mostrada as curvas granulométricas representativas das adições minerais utilizadas nessa pesquisa: cinza volante e sílica de casca de arroz.

Gráfico 7 – Distribuição granulométrica representativa das adições minerais



Fonte: Dalcin (2016, p. 66)

3.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado neste trabalho é de origem quartzosa proveniente do leito do Rio Ibicuí, do Município de Manoel Viana-RS. Na Tabela 8 são apresentadas algumas das propriedades físicas do agregado. Para a caracterização do agregado foram adotados os seguintes ensaios:

- Determinação da massa específica, do agregado miúdo, segundo prescrito pela ABNT NBR NM 52:2009;
- Determinação granulométrica, segundo a ABNT NM 248:2003.

Tabela 8 – Características do agregado miúdo

Módulo de Finura	Dimensão Máxima Característica (mm)	Massa Específica (Kg/dm ³)	Massa Unitária (Kg/dm ³)
1,36	0,6	2,61	1,55

Fonte: Dados da pesquisa

Salienta-se que, embora o módulo de finura do agregado miúdo tenha se localizado abaixo dos limites de 2,20 e 2,90, indicados como ótimos, pela a ABNT NBR 7211:2009, não é prejudicada a qualidade da argamassa ensaiada, uma vez, que para este ensaio são adotadas faixas granulométricas pré-determinadas pela ABNT NBR 15577/4:2009. Por este mesmo motivo, não é apresentada neste estudo a curva granulométrica do agregado.

3.2 Metodologia dos ensaios

3.2.1 Misturas

As misturas foram preparadas com o auxílio de um misturador mecânico, mostrado na Figura 4.

Figura 4 – (a) Misturador mecânico, (b) produção de argamassa no misturador



(a)

(b)

Fonte: Acervo do autor

O procedimento de produção das misturas, foi realizado de igual forma para as misturas utilizadas em todos ensaios realizados por essa pesquisa, sendo realizado por meio da ordem prescrita pela ABNT NBR 15577-4/2009, apresentada pelo seguinte procedimento:

- (a) foi misturado primeiramente a água e o aglomerante no misturador mecânico, em um intervalo de 30s em velocidade lenta;
- (b) misturaram-se os materiais finos separadamente ao misturador em um período 60s, e posteriormente foram adicionados ao misturador em 120s, em velocidade lenta;
- (c) findando as etapas anteriores, o misturador mecânico teve sua velocidade elevada para velocidade alta, por mais 120s.
- (d) posteriormente, foi pausado o misturador e realizada a realocação dos materiais agregados a parede do equipamento, em 30s.
- (e) o misturador foi reiniciado à velocidade alta por mais 120s.

3.2.2 Ensaio a tração na flexão em três pontos

A moldagem e a cura dos corpos de prova submetidas aos ensaios mecânicos, tanto de tração na flexão, quanto compressão seguiram os procedimentos prescritos pela ABNT NBR 13279/2005.

Para as análises de resistência mecânica a tração na flexão, utilizou-se a máquina de ensaios universais EMIC DL 20000, empregando a velocidade de ensaio de 0,1 mm/min, conforme, o referido pela norma ABNT NBR 5739/2018. Na Figura 5 é possível observar o aparato metálico utilizado para execução do ensaio. Foram utilizados 6 corpos de prova por mistura de (40x40x160m).

Figura 5 – Ensaio de tração na flexão em três pontos



Fonte: Acervo do autor

3.2.3 Ensaio de compressão simples

A execução do ensaio de compressão simples seguiu a metodologia prescrita pela norma ABNT NBR 13279/2005, utilizando-se corpos de prova prismáticos com dimensões de (40x40x80 mm), totalizando 12 corpos de prova por mistura. Foram adotados 6 corpos de prova por mistura.

As idades ensaiadas foram de 14 e 28 dias, com uma velocidade do deslocamento do travessão da máquina de 0,01 mm/min, aplicado com uma máquina de ensaios universais EMIC DL20000.

Na Figura 6 esta exibida uma configuração do ensaio de compressão.

Figura 6 – Ensaio de compressão, configuração



Fonte: Acervo do autor

3.3 Análise da reação álcali-silica

3.3.1 Ensaio acelerado em barras de argamassa

Os ensaios de variação dimensional nas barras de argamassa compostas pelas blendas foram realizados pelo método acelerado descrito na norma ABNT NBR 15577/4:2009.

Buscou-se avaliar a mitigação da reatividade das misturas expostas a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, monitorando-se a variação volumétrica e a variação mássica das barras de argamassa.

Foram moldados 6 corpos de prova por mistura, em moldes prismáticos (25mm x 25mm x 285mm), como mostrado na Figura 76.

Figura 7 – Corpos de prova utilizados para o ensaio acelerado



Fonte: Acervo do autor

Os agregados seguiram a faixa granulométrica mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 – Faixa granulométrica utilizada para a produção das argamassas

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	gramas
4,75mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: ABNT NBR NM ISO 3310-1 (1997, p.6)

Conforme a prescrito pela norma as barras de argamassa foram moldadas com proporções aglomerante/agregado de 1:2,25 (440g:990g), com relação água/cimento de 0,47 (em massa). Este mesmo traço foi utilizado nas misturas utilizadas nos demais ensaios.

Posteriormente a desmoldagem, as barras de argamassa permaneceram, no período de 24h, em cura, em uma câmara úmida à uma temperatura de 23°C. Posteriormente, as amostras foram imersas em água, onde a temperatura ambiente foi elevada gradativamente até 80°C (em aproximadamente 6 horas) por mais 24 horas, em um banho Maria mostrado na a Figura 8.

Figura 8 – (a) Banho Maria, (b) interior do equipamento



Fonte: Acervo do autor

Após esse período inicial, as amostras, com temperatura aproximada de 80°C, tiveram suas dimensões lineares, de comprimento, registradas com auxílio do equipamento mostrado na Figura 9, composto por um medidor digital e suporte metálico. Também tiveram suas massas determinadas por uma balança digital de alta precisão.

Figura 9 – Equipamento de medição e barra de calibragem



Fonte: Acervo do autor

Posteriormente a leitura inicial as barras foram imersas em recipiente contendo solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 1N (normal) a uma temperatura de 80°C, por 45 dias, Figura 10, com medições realizadas a cada 8 dias.

Figura 10 – (a) Banho termostático, (b) interior do equipamento



(a)



(b)

Fonte: Acervo do autor

3.3.2 Controle de variação mássica

Os corpos de prova submetidos ao ensaio acelerado, tiveram suas massas aferidas em uma balança digital de alta precisão. Coletando-se, as suas massas iniciais em momento posterior à saturação dos corpos de prova em água, no primeiro dia de ensaio, e coletando suas massas finais na idade de 45 dias.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foi utilizada microscopia eletrônica de varredura, em complemento à análise da expansão das barras de argamassa submetidas ao ensaio acelerado, para observar nas amostras ensaiadas a incidência do gel produzido pela reação álcali-sílica. Assim como, observar a origem do quadro de fissura das amostras comprometidas.

3.5 Análise estatística pelos Testes de Tukey HSD e Fisher LSD

Com o objetivo de verificar a significância na influência dos diferentes teores de substituições nos ensaios realizados, buscou-se a partir dos resultados individuais das

misturas ensaiadas a realização dos Testes de Tukey HSD e Fisher LSD, por intermédio do software Origin Lab statistics 2018b.

Segundo Fróes (2018), o método de Tukey consiste nas comparações múltiplas entre as amostras, baseando-se na diferença mínima significativa (D.M.S) comparada a um valor absoluto da diferença entre os pares analisados, a uma margem de 95% de confiança.

O método de Fisher, segundo Larntz (1978), consiste em um teste exato devido à significância do desvio de uma hipótese nula (p-valor), não dependendo de uma aproximação que tenderá a se tornar exata conforme sua aproximação de um valor limite, ou seja, conforme o tamanho da amostra tende a se aproximar de um valor infinito.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliação do comportamento oferecido, pela alteração dos teores de substituição do cimento Portland CPV – ARI por diferentes teores de sílica de casca de arroz e cinza volante frente à reação álcali-sílica. Por meio destes ensaios foram analisadas as resistências à tração na flexão e à compressão, assim como a expansibilidade das barras de argamassa e suas variações de massa.

4.1 Resistência à tração na flexão em três pontos

Os resultados dos ensaios realizados para avaliação da resistência à tração na flexão são demonstrados na Tabela 10.

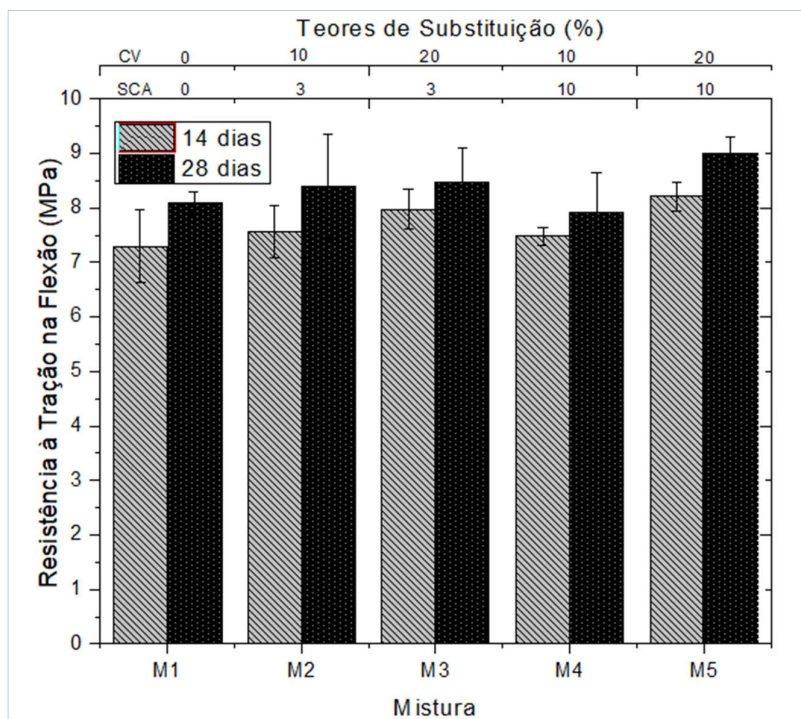
Tabela 10 – Resultados médios de resistência à tração na flexão aos 14 e 28 dias de idade

	Flood Table (cm)	14 dias de idade			28 dias de idade		
		Tensão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Tensão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
M1	29.5	7.29	0.67	9.14	8.09	0.20	2.41
M2	30.3	7.56	0.47	6.18	8.39	0.96	11.38
M3	30.7	7.97	0.37	4.58	8.47	0.62	7.37
M4	31.5	7.48	0.17	2.27	7.91	0.73	9.27
M5	30.4	8.21	0.26	3.22	9.01	0.30	3.36

Fonte: Acervo do autor

No Gráfico 8, são demonstrados os comportamentos das diferentes misturas ao ensaio de tração na flexão, nas idades de 14 e 28 dias.

Gráfico 8 – Resistência à tração na flexão



Fonte: Acervo do autor

Analisando a Tabela 10 e o Gráfico 8, pode-se observar que o comportamento mecânico à tração na flexão das misturas que continham a presença das substituições, apresentaram uma tendência de proporcionarem desempenhos mecânicos levemente superiores à mistura de referência em todas as idades estudadas.

Além disso, pôde ser observado que a mistura M4 apresentou, na idade de 14 dias, desempenho superior se comparado com a mistura de referência M1. No entanto, aos 28 dias, foi a mistura de pior desempenho à tração na flexão. Isto pode ser atribuído segundo Hasparyk (2011) ao refinamento e fragmentação dos poros, que não proporcionam meios para a formação dos produtos de hidratação.

Ainda se pôde observar, que a mistura M5 apresentou a maior resistência mecânica, de 9.01 MPa aos 28 dias, com desvio padrão de 0,3 MPa. Isso demonstra que a combinação de Sílica da Casca do Arroz com a Cinza Volante, proporcionaram dois efeitos importantes, se comparado com a mistura de referência, um o efeito físico e outro a atividade pozolânica.

A partir dos resultados individuais das resistências à tração na flexão, nas idades de 28 dias, foram realizadas comparações múltiplas entre as médias pelos métodos de Tukey HS e Fisher LSD, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11 – Análise múltipla entre os valores médios de resistência à tração na flexão

	M1		M2		M3		M4		M5	
	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD
M1	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0
M3	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0
M4	0	0	0	0	0	0	-	-	0	0
M5	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-

*O símbolo 0 indica que a diferença entre as médias não é significativa a um nível de 95% de confiança.

*O símbolo 1 indica que a diferença entre as médias é significativa a um nível de 95% de confiança.

Fonte: Acervo do autor

Como observado na Tabela 11 foi constatado que para os teores de substituição utilizados, as pozolanas não proporcionaram ganhos e nem prejuízos de resistência à tração na flexão significativos.

4.2 Resistência à compressão simples

Ainda com o objetivo da verificação das propriedades mecânicas dos materiais empregados neste estudo, foram determinadas as resistências à compressão simples, aos 14 e 28 dias de idade. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12.

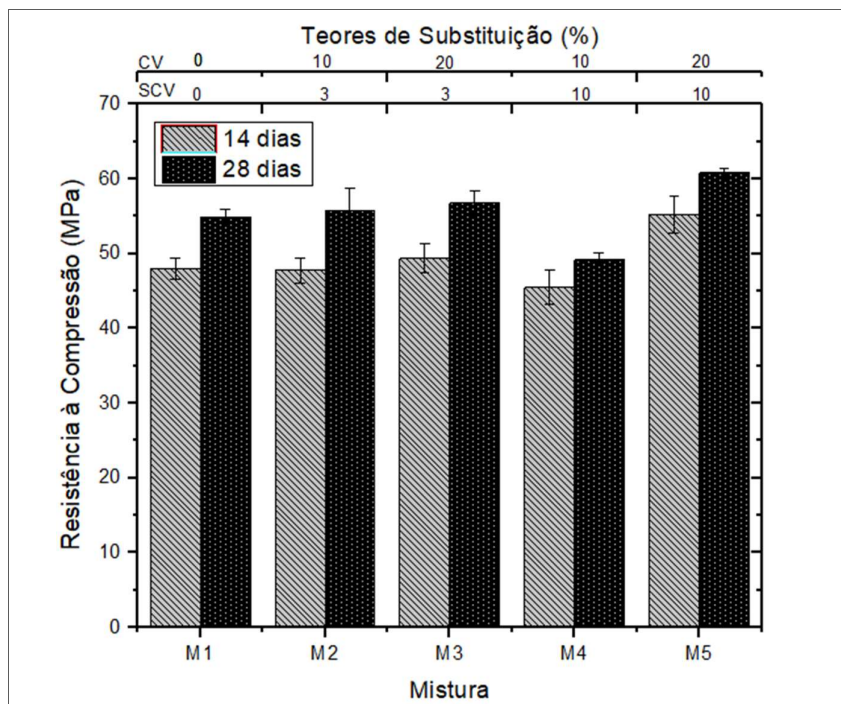
Tabela 12 – Resultados médios de resistência à compressão aos 14 e 28 dias de idade

	Flood Table (cm)	14 dias de idade			28 dias de idade		
		Tensão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Tensão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
M1	29.5	47.98	1.44	3.01	54.89	1.02	1.86
M2	30.3	47.73	1.63	3.42	55.66	3.03	5.45
M3	30.7	49.36	1.93	3.92	56.77	1.55	2.73
M4	31.5	45.46	2.30	5.05	49.18	0.94	0.94
M5	30.4	55.16	2.43	4.41	60.78	0.55	0.90

Fonte: Acervo do autor

No Gráfico 9, são demonstrados os comportamentos mecânicos das diferentes misturas, em ambas as idades, juntamente com o desvio padrão de cada mistura.

Gráfico 9 – Resistência à compressão simples



Fonte: Acervo do autor

Com base nos resultados obtidos, demonstrados na Tabela 12 e no Gráfico 9 é possível observar que as misturas que continham a presença das pozolanas, apresentaram desempenhos mecânicos sensivelmente melhores do que os corpos de prova sem substituições, com a exceção da mistura M4, que continha 10% de sílica de casca de arroz e 10% de cinza volante em substituição ao cimento Portland CPV-ARI.

Essa afirmação, segundo Hasparyk (2011) pode estar associada aos efeitos químicos e físicos dessas adições minerais. Os quais podem ser atribuídos à capacidade dessas pozolanas de reagirem, na presença de umidade, com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando, durante a hidratação do cimento, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Além disso, Hasparyk (2011) afirma que o uso dessas pozolanas podem proporcionar, dentre outras coisas, o refinamento dos poros e dos produtos de hidratação do cimento, causados pela formação de pontos de nucleação dos produtos de hidratação. Por consequência, conferindo que o crescimento dos cristais não esteja limitado à superfície dos grãos do cimento, também ocorrendo, ainda assim, nos poros

ocupados pelas adições e pela água, de maneira que venham a acelerar a cinética de hidratação da argamassa.

Pode-se observar no Gráfico 9, que a mistura M5, contendo 10% de SCA e 20% de CV, foi a mistura que apresentou o maior valor de resistência à compressão. Apresentando uma resistência a compressão 14,96% maior do que a observada na mistura de referência.

A partir dos resultados individuais das resistências à compressão, aos 28 dias de idade, foram realizadas comparações múltiplas entre as médias pelos métodos de Tukey HS e Fisher LSD, como pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 – Análise múltipla entre os valores médios de resistência à compressão

	M1		M2		M3		M4		M5	
	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD
M1	-	-	0	0	0	0	1	1	1	1
M2	0	0	-	-	0	0	1	1	1	1
M3	0	0	0	0	-	-	1	1	0	1
M4	1	1	1	1	1	1	-	-	1	1
M5	1	1	1	1	0	1	1	1	-	-

*O símbolo 0 indica que a diferença entre as médias não é significativa a um nível de 95% de confiança.

*O símbolo 1 indica que a diferença entre as médias é significativa a um nível de 95% de confiança.

Fonte: Acervo do autor

Conforme observado na Tabela 13, percebeu-se que a mistura M5 apresentou ganhos de resistência à compressão com diferenças significativas quando comparada a mistura de referência e as demais misturas. Assim como, observou-se que a mistura M4 proporcionou uma perda de desempenho estatisticamente significativa. As M2 e M3 não proporcionaram acréscimos significativos no desempenho mecânico à compressão em relação à mistura de referência.

4.3 Avaliação da eficiência das substituições na RAA

A fim de efetuar a verificação dos efeitos das substituições frente reação-álcali sílica, foi verificada a variação dimensional dos corpos de prova submetidos ao ensaio acelerado.

Nas Tabelas 14 e 15, foi feito comparativo dos valores médios de expansão para cada mistura quanto aos limites de tolerância do comportamento expansivo propostos pela norma ABNT NBR 1577/4:2009. Analisando-se, desta forma, o comportamento reativo ou inócuo das misturas frente à reação álcali-sílica.

Tabela 14 – Variação dimensional média das barras de argamassa aos 16 dias e classificação quanto a potencialidade reativa das misturas

Porcentagem limite aos 16 dias: 0,1%				
Mistura	Expansão média (%)	Classificação NBR 15577-4:2008	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
M1	0.2000	Reativo	0.009	4.696
M2	0.1242	Reativo	0.008	6.225
M3	0.056	Inócuo	0.007	0.128
M4	1.019	Reativo	0.010	16.624
M5	0.2040	Reativo	0.034	16.622

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 15 – Variação dimensional média das barras de argamassa aos 30 dias e classificação quanto a potencialidade reativa das misturas

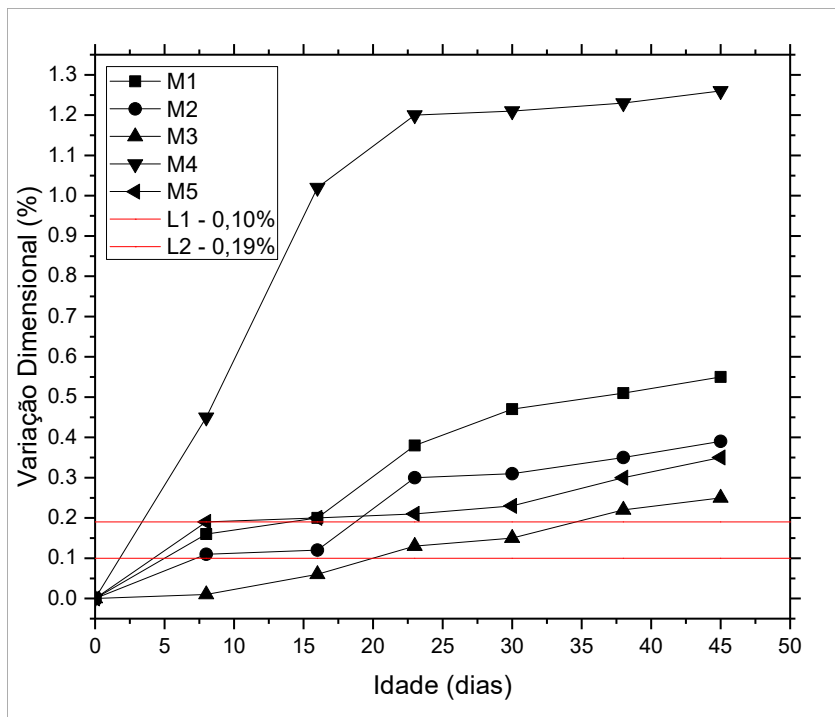
Porcentagem limite aos 30 dias: 0,19%				
Mistura	Expansão média (%)	Classificação NBR 15577-4:2008	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
M1	0.4652	Reativo	0.011	2.362
M2	0.3084	Reativo	0.05	1.700
M3	0.1470	Inócuo	0.019	0.126
M4	1.2080	Reativo	0.027	2.238
M5	0.2270	Reativo	0.014	6.366

Fonte: Dados da pesquisa

Com base nas Tabelas 14 e 15 foi possível observar que o teor mínimo de substituição para mitigar a expansão causada pela reação álcali-sílica das amostras, para valores inferiores a 0,10% aos 16 dias e 0,19% aos 30 dias em solução alcalina é de 3% de sílica de casca de arroz e 20% de cinza volante, mistura M3.

No Gráfico 10 é demonstrada a análise comparativa do comportamento expansivo médio das misturas de acordo com as demais idades ensaiadas.

Gráfico 10 – Variação dimensional média das misturas analisadas



Fonte: Acervo do autor

No Gráfico 10 é possível observar o comportamento de redução sistemática das expansões nos corpos-de-prova devido à substituição do cimento Portland CPV pelas substituições de sílica de casca de arroz e cinza volante. Com exceção ao observado na mistura M4, que por sua vez apresentou alta reatividade quando comparada às demais misturas. Isso, evidencia o potencial reativo da sílica da casca de arroz demonstrado no estudo realizado por Soares (2016).

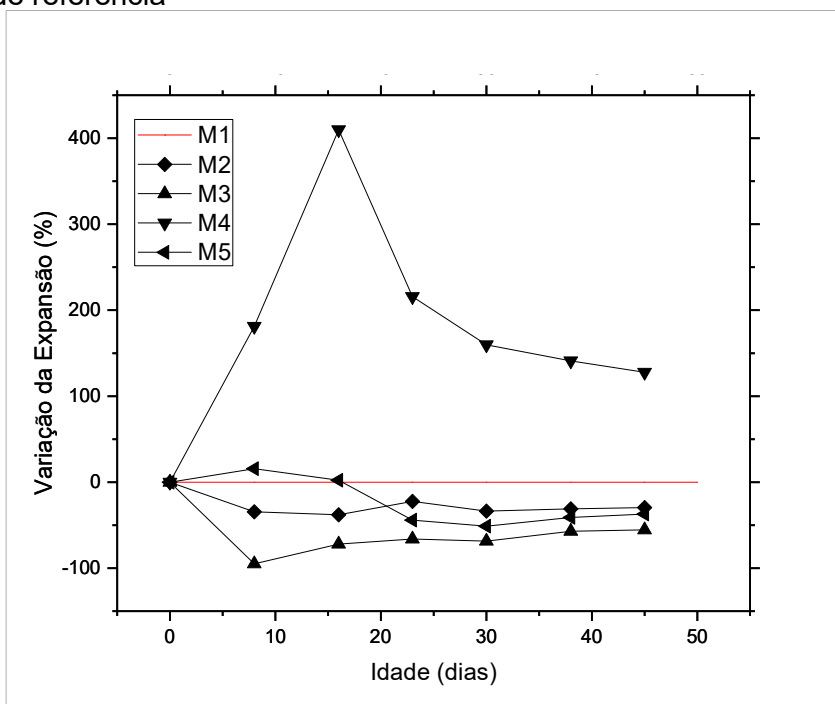
Salienta-se que, conforme o Gráfico 10, das idades de 38 aos 45 dias, todas as misturas, apesar de apresentarem uma redução na taxa de expansão, mantiveram o comportamento expansivo, sendo, já nestas idades, superados em todos os casos, o limite de 0,19% indicado pela norma. Esta redução do comportamento expansivo, segundo Lucca (2010), pode ser atribuída a diminuição da quantidade de reagentes disponíveis devido à reação pozolânica, sendo assim, as misturas tendem a se estabilizarem em relação a expansão.

Observa-se, ainda, que a maior proporção de sílica de casca de arroz em relação à cinza volante, referente à mistura M4, apresentou desde aos 8 dias de idade um comportamento altamente expansivo, superando em 236,81% o limite de 0,19%

aos 30 dias. Segundo Hasparyk (2010), essa alta expansão pode ser atribuída a eficácia das pozolanas na fragmentação e refinamento da estrutura dos poros, conferindo-lhe o efeito expansivo, o que, segundo Bleszynski e Thomas (1998), dentre outros fatores, pode ser explicado pela quantidade insuficiente de cinza volante. Desta forma, pode se assim dizer que, segundo Lucca (2010), a cinza volante, em teores mais baixos, não tem a capacidade de reduzir a quantidade de álcalis disponíveis tornando a estrutura mais densa, não favorecendo a fácil acomodação e percolação do gel pelos poros da argamasa.

No Gráfico 11 é possível observar a proporção do efeito das substituições no comportamento expansivo das barras de argamassa, das diferentes misturas, quando comparadas com a mistura de referência, mistura M1.

Gráfico 11 – Comparativo em porcentagem das expansões das misturas em relação à mistura de referência



Fonte: Dados da pesquisa

No Gráfico 11 é evidenciado que, com exceção ao observado na mistura M4, houve uma diminuição significativa das expansões conforme houve o aumento do teor de substituição do cimento. Observa-se ainda, que o aumento na proporção de sílica de casca de arroz em relação a cinza volante acarretou no aumento das expansões, demonstrando o potencial reativo da pozolana (sílica da casca do arroz), atingindo

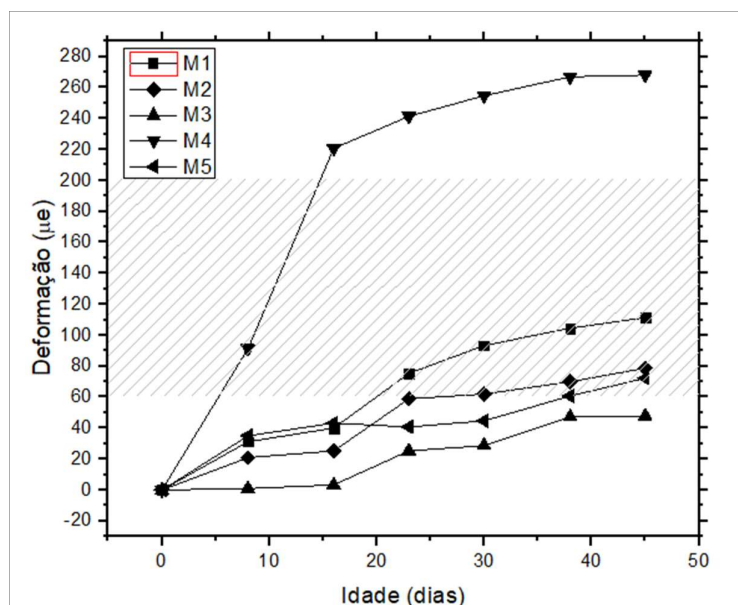
para a mistura M4, na idade 16 dias, uma diferença da variação expansiva na ordem de 409,5%. Esta diferença foi diminuída no decorrer do tempo de ensaio, porém, observando-se ainda, uma diferença de 145,46% aos 45 dias.

Por outro lado, o aumento no teor de cinza volante proporcionou às barras de argamassa um efeito de mitigação. Isso corrobora com o que foi escrito anteriormente neste estudo, que segundo Sherata e Thomas (2000), os teores de substituição de cinza volante pelo cimento, possuem relação direta com a diminuição das expansões. E ainda, conforme Bleszynski e Thomas (1998), pode ser justificado pela eficácia da cinza volante na redução da alcalinidade da solução dos poros e na redução da disponibilidade de cálcio, assim como pela redução da mobilidade iônica proporcionada pelo refinamento dos poros.

Desta forma, pode-se dizer que a substituição do cimento Portland CP V – ARI por cinza volante apresentou-se de forma mais eficiente do que a substituição por sílica de casca de arroz.

No Gráfico 12 é feita análise da deformação média das barras de argamassa empregadas neste estudo.

Gráfico 12 – Deformação média das misturas submetidas ao ensaio acelerado



Fonte: Dados da pesquisa

De acordo com o Gráfico 12, foi possível visualizar que a mistura M4 teve seu rompimento por deformação, já nas primeiras idades. A deformação por expansão introduz ao corpo de prova tensões de tração, que segundo Marangon (2011), a

incidência da ruptura ocorre em deformações entre de 60 $\mu\epsilon$ a 200 $\mu\epsilon$. As demais misturas, mantiveram-se dentro do regime linear elástico, não apresentando deformações significativas que corroborassem no quadro fissuratório. Como pode ser observado na Figura 11, que mostra o estado aparente das misturas, aos 30 dias de ensaio, com evidenciação, em vermelho, das fissuras.

Figura 11 – Estado aparente das amostras aos 30 dias de idade, para as diferentes misturas



Fonte: Acervo do autor

A Figura 12, mostra duas barras de argamassa da mistura M4 sem evidenciação das fissuras, após 45 dias de ensaio.

Figura 12 – Barras de argamassa da mistura M4, com presença de fissuras

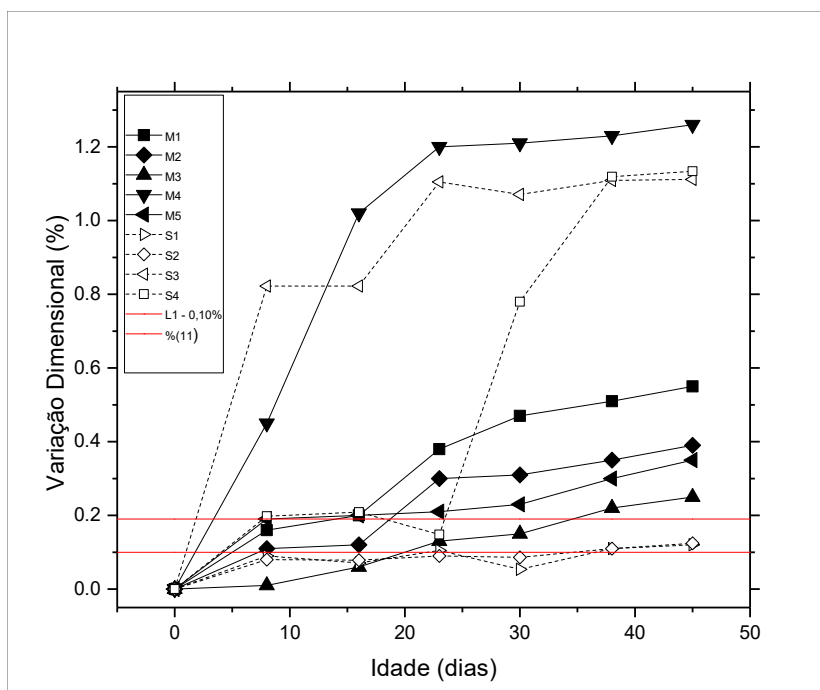


Fonte: Acervo do autor

No Gráfico 13 foi realizada a análise da variação dimensional média das barras de argamassa em comparativo com os valores observados no estudo realizado por Soares (2016). Para realização desta análise foram utilizadas as misturas analisadas por Soares (2016), contendo as seguintes simbologias:

- S1 – Mistura de referência com cimento Portland CII-Z, sem substituições, aos 28 dias de cura. Soares (2016);
- S2 – Mistura contendo 3% de sílica de casca de arroz em substituição ao cimento Portland CII-Z, aos 28 dias de cura. Soares (2016);
- S3 – Mistura contendo 5% de sílica de casca de arroz em substituição ao cimento Portland CII-Z, aos 28 dias de cura. Soares (2016);
- S4 – Mistura contendo 10% de sílica de casca de arroz em substituição ao cimento Portland CII-Z, aos 28 dias de cura. Soares (2016).

Gráfico 13 – Variação dimensional média das barras de argamassa em comparativo com resultados obtidos por Soares (2016)



Fonte: Dados da pesquisa

De acordo com o Gráfico 13, as variações médias de expansão obtidas nesse estudo, em conjunto com as observadas por Soares (2016), percebe-se que o uso de

silica de casca em teores de 10% de substituição favorecem o desenvolvimento das expansões, indicando o potencial reativo dessa pozolana. No entanto, deve-se salientar que o melhor desempenho da mistura S2 em contrapartida da M3 pode ser vinculada ao tipo de cimento Portland adotado. Uma vez que, no estudo realizado por Soares (2016), foi utilizado o cimento Portland CPII-Z.

Na Tabela 16 é demonstrado o resultado da análise estatística realizada entre as médias das variações dimensionais obtidas pelo ensaio acelerado, das misturas estudadas nesse estudo, nas idades de 30 dias.

Tabela 16 – Comparação múltipla de médias das expansões pelo método de Tukey

	M1		M2		M3		M4		M5	
	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD	Tukey HS	Fisher LSD
M1	-	-	0	1	1	1	1	1	1	1
M2	0	1	-	-	0	1	1	1	0	0
M3	1	1	0	1	-	-	1	1	0	0
M4	1	1	1	1	1	1	-	-	1	1
M5	1	1	0	0	0	0	1	1	-	-

*O símbolo 0 indica que a diferença entre as médias não é significativa a um nível de 95% de confiança.

*O símbolo 1 indica que a diferença entre as médias é significativa a um nível de 95% de confiança.

Fonte: Dados da pesquisa

Em observância da Tabela 16 é possível perceber que os resultados analisados apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si. Evidenciando a melhora e a piora do efeito expansivo proporcionado pelas misturas M3 e M4, respectivamente.

4.4 Variação mássica

Na Tabela 17 são demonstrados os valores médios das variações de massa das misturas submetidas ao ensaio acelerado.

Tabela 17 – Variação mássica média

Mistura	M1	M2	M3	M4	M5
Massa média inicial (g)	414.13	413.55	412.73	428.03	420.44
Massa média final (g)	415.55	414.13	414.43	429.20	422.08
Variação de massa (%)	0.34	0.14	0.41	0.27	0.39

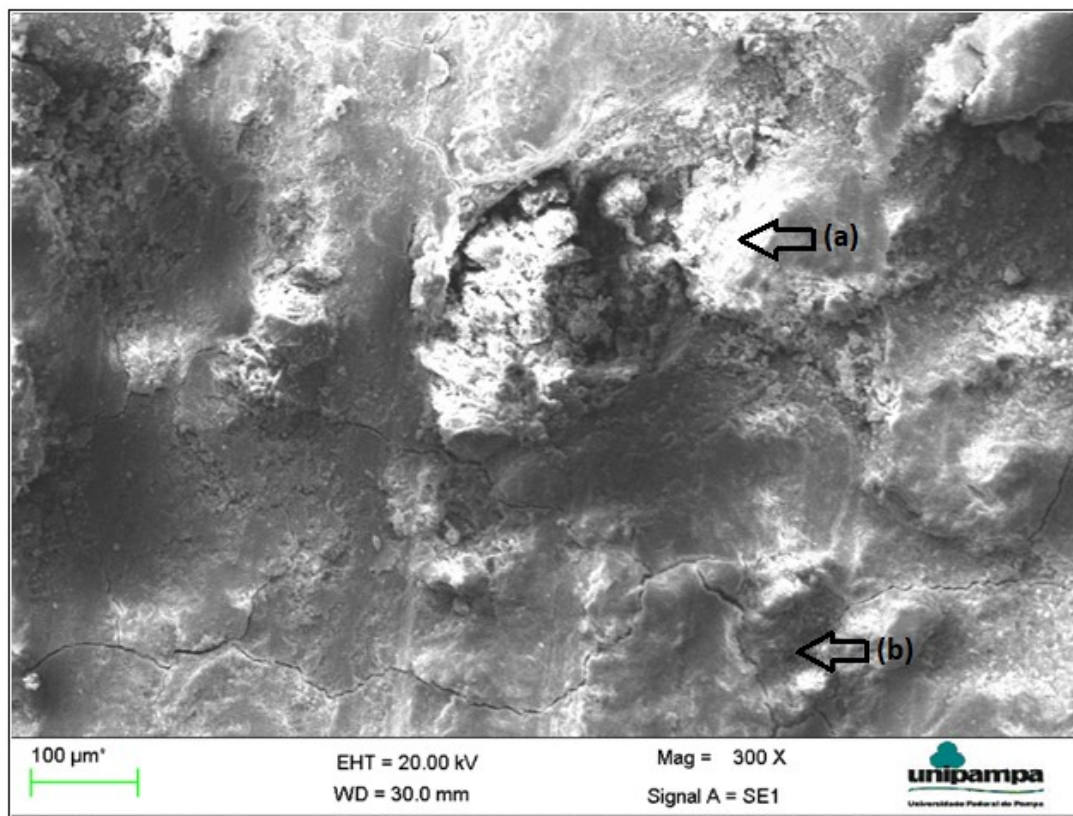
Fonte: Dados da pesquisa

Conforme demonstrado na Tabela 17, é possível observar que não foram constatadas perdas de massa nas misturas. Não havendo indicações de que as argamassas irão sofrer descolamentos devido ao comportamento observado nesse período. No entanto, salienta-se a necessidade de buscar normas que regulamentem e melhor se adequem a esse tipo de ensaio, visando a obtenção de resultados mais precisos.

4.5 Análise microscópica das barras de argamassa

Devido a presença de fissuras observadas nos corpos de prova da mistura M4, foi realizada a análise das amostras pelo microscópio eletrônico de varredura. No qual foi possível visualizar a formação de gel gretado de álcali-sílica como pode ser notado na Figura 13. Observam-se, ainda, a formação fissuras originadas na região do gel, o que vem a coincidir com a proposição realizada por Mehta e Monteiro (2008), os quais afirmam que o embebedimento desse gel promove o inchamento do mesmo e a elevação das tensões internas podendo, desta forma, proporcionar o surgimento de fissuras e de deslocamentos. Nas amostras das demais misturas não foram possíveis de observar pontos de formação do gel.

Figura 13 – Seta (a) formação dos geles de álcali-sílica, seta (b) formação de fissuras



Fonte: Acervo do autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O presente trabalho objetivou a determinação das resistências mecânicas à tração na flexão e à compressão, a determinação dos efeitos expansivos oriundos do fenômeno de reação álcali-sílica, assim como a análise do desprendimento de massa pelo controle das variações de massa, em misturas constituídas de uma blenda de sílica de casca de arroz e cinza volante, em diferentes teores.

Desta maneira, observou-se que mesmo que não tenham sido observados melhoras estatisticamente significativas nas resistências à tração na flexão, os ganhos ambientais proporcionados pelo uso dessas pozolanas em substituição ao cimento Portland viabilizam o seu emprego na elaboração de concretos e argamassas.

No tocante a resistência a compressão das misturas, observou-se que embora que a mistura produzida com 10% de sílica de casca de arroz e 10% de cinza volante, tenha apresentado pior desempenho mecânico, quando comparada à mistura de referência, percebeu-se que no geral as demais misturas, com o uso de sílica de casca de arroz e cinza volante, proporcionaram uma melhora sensível no comportamento mecânico dessas misturas.

Referente à reação álcali-sílica, os resultados obtidos comprovaram que o uso das pozolanas proporcionaram contribuições estatisticamente significativas, para as misturas que continham teores de 20% de cinza volante. Observou-se ainda o potencial reativo da sílica de casca de arroz, uma vez que a mistura com maior teor de SCA produzida com 10% de sílica de casca de arroz e 10% de cinza volante, mistura M4, apresentou-se altamente reativa, superando já nas primeiras idades em 236% o limite proposto pela norma de 0,19% de expansão aos 28 dias.

No entanto, observou-se que, embora, o uso das pozolanas tenham proporcionado reduções nos efeitos expansivos da reação, somente a mistura contendo 3% de sílica de casca de arroz e 20% de cinza volante, mistura M3, foi capaz de mitigar a reação álcali-sílica. Este efeito, segundo Munhoz (2007), pode estar relacionado à composição química e aos diâmetros das partículas da CV, que a conferem alta reatividade pozolânica, reduzindo de forma acentuada o teor de hidróxido de cálcio da argamassa vindo a favorecer a minimização da RAA.

Os resultados comprovaram que nos teores adequados a combinação de sílica de casca de arroz e cinza volante podem mitigar o efeito expansivo do RAA, desde que usados teores de cinza volante em porcentagens maiores que 20% e sílica da casca do arroz em teores próximos à 3%. Isso é justificado uma vez que Soares (2016), também, observou que os usos de sílica de casca de arroz em teores superiores a 3% apresentaram caráter potencialmente reativo.

5.2 Sugestões

Como sugestões para trabalhos futuros:

- A investigação da influência da porosidade e da permeabilidade na minimização dos efeitos expansivos da reação álcali-sílica.
- Atribuiu-se nesta pesquisa que o consumo do hidróxido de cálcio pelas pozolanas tenha contribuído para a minimização dos efeitos expansivos da reação, quando submetidas às misturas a um ambiente com disponibilidade de cálcio inesgotável. Desta maneira, é recomendada a análise da concentração de íons hidroxila na solução dos poros das argamassas confeccionadas com estas misturas.
- Também é recomendado que, em pesquisas posteriores, sejam realizados estudos com diferentes teores de sílica de casca de arroz e cinza volante. Assim como, a adoção de misturas ternárias.

REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: [HTTP://www.abcp.org/cms/products-page/autoconstrucao-e-reforma/maosa-obra-pro-coletanea/#.V4UanvkrLIV](http://www.abcp.org/cms/products-page/autoconstrucao-e-reforma/maosa-obra-pro-coletanea/#.V4UanvkrLIV). Acesso em: 20 Mar, 2016.

ADORNO, C. S. Influência de adições minerais na mitigação da reatividade álcali-silica em compósitos de cimento Portland. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** IBRACON Gramado; 2013).

Agregado em Tomada D'água. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estrutura de Concreto. **Anais...** Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 213-222.

ABNT NBR 7211, **Agregados para concreto – Especificações**, Rio de Janeiro 2009.

___NBR 15577-1, **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4**: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto, 2009.

___NBR 15577-1, **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4**: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, 2008.

___NBR 15577-1, **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 5**: Determinação da mitigação da expansão de barras de argamassa pelo método acelerado, 2008.

___NBR___NM 248, **Agregados – Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro 2003.

___NBR NM 52, **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**, Rio de Janeiro 2009.

___NBR 11578, **Cimento Portland Composto**, Rio de Janeiro 1997.

___NBR 5738, **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**, Rio de Janeiro 2016.

___NBR 13279, **Argamassa para assentamento revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração a flexão e à compressão**. Rio de Janeiro 2005.

___NBR 3310-1, **Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**, Rio de Janeiro 2010.

___NBR 12653, **Materiais pozolânico - Requisitos**, Rio de Janeiro 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Anual Book of ASTM Standards. ASTM C 1567/04 - Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate, **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 2005 section 4 Construction, v. 04.02 (Concrete and Aggregates).

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1260 – Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), **Annual book of ASTM standards**. United States, 2007.

Alkali-aggregate reactions in concrete. **Engineering Geology**, Amsterdam, v.9, n.4,

BARBOSA, M. B.; VITA, M. O.; AKASAKI, J. L.; ALCÂNTARA, M. A. M.; SILVA, E. J.; FREITAS, I. M. Estudo comparativo das propriedades mecânicas do CAD com resíduos de borracha de pneu e cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas, 48º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais... IBRACON 2006a**.

BARBOSA, M. B. **Utilização de resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de alto desempenho**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006b.

BLEZESZYNSKI, R. F.; THOMAS, M. D. A. Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete immersed in alkaline solutions. **Advanced Cement Materials**, New York, v. 7, n. p. 66 – 78, Mar. 1998.

CUNHA, F. A., CINCONTTO. M. A. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Departamento de Engenharia de Construção Civil)-Universidade de São Paulo, 2008.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 8, p. 261-309.

DECHICHI, M. **Reação álcali-agregado**: estudo das propriedades elásticas e mecânicas através da utilização de inibidores. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

FIGUERÔA, ANDRADE, TIBÉRIO, **O ataque da Reação Álcali Agregado sobre as estruturas de concreto**: a descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife – Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2007.

FORUM, C. S. Alkali-Reaktion der Zuschlagstoffe im Beton. **Beton und Stahlbetonbau**, Berlin, n. 7, p. 163-168. Dec. 1965.

FROÉS, A. G. O. Testes estatísticos para comparação de médias. **Revista Eletrônica Nutritime**. v. 5, n° 6, p. 777 – 788. 2008.

GLASSER, F. P. **Chemistry of alkali-aggregate reaction**. In: SWAMY, R. N. The Alkali-Silica Reaction in Concrete. Glasgow/London: Blackie/ New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

HASPARYK, N. P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. In: ISAIA G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 933-996. 2011.

HÖER, G. T. **Durabilidade do concreto com cinza e casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-silica e penetração de cloretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

HÖEHR, G.; ISAIA, G; GASTALDINI, A; CERVO, T. et al. Mitigação da reação álcali-silica entre cimento com adições e cinza de casca de arroz natural, pelo método acelerado em barras de argamassa e prismas de concreto. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** IBRACON. Fortaleza, 2010.

HOUSTON, D. F. **Rice: Chemistry and technology**. American Association of Cereals Chemistry, Minnessota, p. 301– 352, 1972.

HOBBSm D. W. **Akali-silica reaction in concrete**. London: Thomas Telford, 1988.

ISAIA, G.C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** São Paulo. 1995. 280p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DALCIN, J. B. **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 (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

KUPERMAN, S. C., FERREIRA, W. V. F. F., DAL FABRO, J. C., NEGRINI, M. A., CIFÚ, S., KAKO, H., MARIANO, A., TAVARES F. Ocorrência da Reação Álcali-agregado em Tomada D'água. Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. **Anais...** Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas. Goiânia, 1997, p. 213-222.

LARNTZ, K. **Small-sample comparisons of exact levels for chi-squared goodness-of-fit statistics.** Journal of the American Statistical Association. 73. p. 253-263. New York. 1978.

LUCCA, A. C. K. **Reação Álcali-Agregado: Efeito do Uso de Cinza Volante.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Alegrete. 2010.

MARANGON, E. SOARES, E. L. MARTINS, R. P. MENDES, G. G. Atividade Pozolânica da Sílica de Casca de Arroz produzida em leito fluidizado. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** IBRACON. Gramado, 2013.

MARANGON, **Caracterização Material e Estrutural de Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras de Aço.** Tese (Doutorado em engenharia Civil) Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2011.

MARTON, L. F. M. OLIVEIRA, M. D. MARANGON, E. ROSADO, D. PADOIN, D. G. MARTINS, R. P. Avaliação da Utilização em Pisos Intertravados da Sílica de Casca de Arroz Obtida Através da Combustão em Leito Fluidizado. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** IBRACON. Gramado. 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 2008.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de Adições Ativas na Mitigação das Reações Álcali-Sílica e Álcali-Silicato**. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedade do concreto**. 2ª Ed. São Paulo: Pini, 1997.

POOLE, A. B. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. N. (Ed.). **The alkali-silica reaction in concrete**. Glasgow: Blackie and Son, p. 16-44.1992.

PREZZY, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. The álcali-silica reaction, part I: use of the Double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels. **ACI Materials Journal, Farmington Hills**, v. 94, n1. P. 10-17, 1997.

SOARES, E. L. **Avaliação da Potencialidade Reativa da Sílica de Casca de Arroz por Meio da Mitigação da Reação Álcali-sílica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Pampa. Alegrete. 2016.

SOUZA, D. C. **Características de Durabilidade de Concretos com Cinza Volante e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011.

SOUZA, L.; ZOLETT, R. E.; CARRAZEDO, R. Estudo dos efeitos do uso de escória de aciaria na expansão de corpos de prova sujeitos à reação álcali-agregado. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 9, n 4. p. 572 -586, 2016.

SHERATA, M. H.; THOMAS, M D. A. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 30, n. 7. 1063, Sept. 2000.

SHERATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. The effect of fly ash composition on the expansion on the chemistry of pore solution in hydrate cement pastes. **Cement and Concrete Research**, New York, Pergamon Press, v. 29, n. 12, p. 1915-1920, Dec. 1999.

SUPREMO SECIL. **Typical Analysis Bulletin**. Laudo Técnico. Curitiba. 2017.

THOMAS, M. D. A.; NIXON, P. J.; PETTIFER, K. the effect of pulverized-fuel ash with a high total alkali content on alkali-silica reaction in concrete containing natural UK

aggregate. In: MALHOTRA, V. M. (ed.). **Proceedings of the Second CANMET/ACI international Conference on Durability of Concrete**. Detroit: American Concrete Institute, 1991. P. 919-940. v. 2.

WARPECHOWSKI DA SILVA, L. M. CALARGE, F. CHIES, J. E. MALLMAN, O. Z. **Caracterização de Cinzas Volantes para Aproveitamento Cerâmico**. São Paulo: Cerâmica, 1999. P. 296. v.45.