

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**EVERTON LUIS SOARES**

**AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE REATIVA DA SÍLICA DE CASCA DE  
ARROZ POR MEIO DA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA**

**Alegrete  
2016**

**EVERTON LUIS SOARES**

**AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE REATIVA DA SÍLICA DE CASCA DE  
ARROZ POR MEIO DA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA**

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

**Alegrete  
2016**

**EVERTON LUIS SOARES**

**AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE REATIVA DA SÍLICA DE CASCA DE ARROZ POR MEIO DA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA**

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 de junho de 2016.

Banca examinadora:



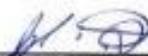
---

Prof. Doutor Ederli Marangon  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Doutor Fládmir Fernandes dos Santos  
UNIPAMPA



---

Eng. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira  
UNIPAMPA

## **Dedicatórias e Agradecimentos**

Aos meus pais Neiva e Daido e à minha irmã Carla, que sempre acreditaram em mim e me deram a oportunidade de conquistar mais uma caminhada que tive em minha vida. Por mais que eu seja o filho mais teimoso e “mal educado” de todos, tenho certeza de que não mediram esforços para que esse sonho se realizasse me incentivando, acreditando e torcendo comigo a cada passo dado. Sem vocês, tenho certeza que nada disso seria realidade.

À minha avó Genita, que infelizmente não pôde se fazer presente neste momento feliz da minha vida, mas que não poderia deixar de dedicar a ela, que nos últimos momentos disse uma frase que mudaria minha vida acadêmica: “estuda filho, é pra ti tirar as melhores notas”. Por ela eu hoje estou aqui, obrigado pelo carinho, alegrias e ensinamentos Vovó!

Por ser mais que um profissional, um amigo, dedico este trabalho ao meu orientador Ederli, por toda paciência, dedicação, amizade, risadas, viagens e brigas, pelas conversas sinceras e sem rodeios, pelos puxões de orelha, por me aconselhar em momentos críticos e ser este baita professor que me incentivou e me guiou no caminho até aqui.

Ao professor Fladimir e ao Eng. Marcelo, que contribuíram de forma significativa para que minha pesquisa fosse realizada.

Aos meus colegas Raphael, Eduardo, Letícia, Pedro Jucá, Thiago Victor e Vinicius, pelos momentos felizes que passamos durante a graduação.

Dedico este trabalho à minha colega Carolina, por me ajudar em toda a elaboração da pesquisa, sem tua ajuda eu não conseguiria!

Ao pessoal do laboratório: Raquel, Marcelo, Janice, Gean, Jarbas e Ivan, pela disposição e ajuda.

Ao pessoal da Pilecco Nobre Alimentos pela disponibilização do material e bolsa de estudos.

A todos meus professores e colegas, que são os maiores responsáveis por eu estar concluindo esta etapa da minha vida.

Aos meus amigos: Bruno, Daniel, Florinda, Júlia, Alvarenga, Luiz Gabriel, Tuca e Allisson por todas as festas, risadas, futebol, jogos e pelos momentos felizes que nunca esquecerei, dedico.

Aos meus primos e amigos Guilherme, Mateus Leonardo e Vagner, parceiros de todas as horas, que ofereceram total apoio durante esta

caminhada e tornou possível este sonho, por estarem comigo em momentos felizes e tristes, pelas noites viradas, jogos, futebol, filmes, junções e por serem meus melhores amigos.

Ao irmãozinho que a Engenharia Civil me concedeu, ao cara que me tirou do fundo do poço várias vezes, me ensinou quando não fui capaz de aprender, me ofereceu ajuda quando a maioria das pessoas não podia ajudar, a ti Bruno, dedico este trabalho.

Muito obrigado a todos vocês pelas amizades, paciência e pelos ensinamentos que levarei para sempre!

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.

Arthur Schopenhauer

## RESUMO

O emprego da sílica de casca de arroz no concreto tem o objetivo de contribuir para a sustentabilidade aplicada a engenharia civil, dando um destino adequado para esse material que é considerado como um resíduo de alto valor poluente. No entanto, são necessárias análises para investigar as consequências de substituir parte do cimento Portland por sílica de casca de arroz para a produção de concretos e argamassas. Uma dessas análises seria a reação álcali-sílica, que é um processo de deterioração altamente prejudicial que pode afetar a funcionalidade de uma estrutura. Seguindo este contexto, esse trabalho tem por objetivo analisar a durabilidade, através do grau de mitigação proporcionado pela substituição de sílica de casca de arroz, em barras de argamassa submetidas ao método acelerado preconizado pela norma ABNT NBR 15577:2008, analisando também a resistência mecânica do material. Para isso, foram moldados corpos de prova de argamassa com substituição parcial de 3, 5 e 10% de sílica de casca de arroz ao cimento Portland. Foram produzidos corpos de prova com cimento Portland CII-Z 32 e areia natural, encontrada na cidade de Manoel Viana-RS. Parte das amostras foi analisada durante o período de 45 dias frente à reação álcali-sílica enquanto as demais foram verificadas quanto à resistência mecânica nas idades de 7, 28, e 56 dias. Com base nos resultados pode-se dizer que as misturas de referência e com 3% de substituição apresentaram comportamento inócuo enquanto as misturas contendo 5% e 10% de substituição exibiram comportamento potencialmente reativo devido ao uso de SCA com o cimento Portland, principalmente para a idade de 30 dias.

Palavras-Chave: reação álcali-sílica, argamassa, sílica de casca de arroz.

## ABSTRACT

The use of rice husk silica in concrete aims to contribute to the sustainability applied to civil engineering, giving an appropriate destination for this material that is considered as a high value-polluting waste. However, tests are required in order to investigate the effect of replacing part of the Portland cement per rice husk silica in the production of concrete and mortar. One of these analyses would be the alkali-silica reaction, which is highly detrimental decay process that may affect the functionality of a structure. In this context, this study aims to analyze the durability, through the degree of mitigation provided by the substitution of rice husk silica in mortar bars subjected to accelerated method recommended by the ABNT NBR 15577: 2008 standard, analyzing also the materials mechanical strength. For this, mortar specimens should be molded with a partial substitution of 3, 5 and 10% of rice husk silica to the Portland cement. Specimens of Portland cement CII-Z 32 and natural sand of the city Manoel Viana-RS were performed. One part of the samples was analyzed during a period of 45-days under the alkali-silica reaction while others were checked for mechanical strength at ages 7, 28, and 56 days. Finally, the reference mixtures and those samples with 3% substitution showed innocuous behavior while the mixtures containing 5% to 10% of substitution exhibited potentially reactive behavior due to the use of rice husk silica with Portland cement, especially for the age of 30 days.

Keywords: Alkali-silica reaction, Mortar, silica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Degradação da estrutura causada pela RAA .....	17
Figura 2–Representação esquemática das formas cristalina e amorfa.....	18
Figura 3 – Distribuição dos íons adjacentes na superfície do sólido, de acordo com o conceito da dupla camada difusa .....	21
Figura 4– Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento.....	23
Figura 5 - Variação de comprimento das barras de argamassa aos 16 dias .....	26
Figura 6 - Fluxograma das variáveis de ensaio.....	26
Figura 7 – Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado .....	27
Figura 8 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias .....	28
Figura 9 –( a ) Curvas granulométricas do cimento CII-Z e da sílica da casca de arroz; ( b ) Análise de difração de raios X da SCA .....	30
Figura 10 - Composição granulométrica do agregado miúdo.....	32
Figura 11–Banho termo regulador: vista externa (A) e vista interna (B).....	33
Figura 12–Equipamento utilizado para a medição das barras de argamassa composto por medidor digital e barra de calibragem.....	34
Figura 13–Misturador mecânico .....	36
Figura 14– As amostras foram depositadas em uma fôrma metálica onde permaneceram em cura ambiente até a idade de rompimento .....	37
Figura 15 - Fôrma utilizada para a moldagem das barras de argamassa .....	37
Figura 16 - Compressão simples: máquina de ensaios universais DL 20000 .....	38
Figura 17 - Valores de resistência à compressão média das misturas .....	41
Figura 18 - Resistência à tração na flexão x idade.....	44
Figura 19- Correlação entre as resistências.....	45
Figura 20 - Expansão das barras de argamassa a partir do método acelerado (ABNT NBR 15577 4) das misturas estudadas .....	47
Figura 21 - Deformação x tempo.....	49
Figura 22 – Estado aparente das amostras aos 30 dias de cura .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1–Composição e propriedade físico química da Sílica de Casca de Arroz.....	29
Tabela 2–Propriedades químicas do cimento Portland CII-Z 32.....	30
Tabela 3–Características do agregado miúdo.....	31
Tabela 4– Peneiras para ensaio e traço utilizado.....	33
Tabela 5- Resultados médios de resistência à compressão e coeficiente de variação.....	40
Tabela 6 - Taxa de crescimento da resistência à compressão (%).....	42
Tabela 7 – Resistência à tração na flexão em três pontos das misturas (MPa) .....	43
Tabela 8 - Fórmulas do modelo CEP-FIP (1990) e NBR 6118.....	46
Tabela 9 - Expansão das barras de argamassa aos 16, 30 e 45 dias e classificação da potencialidade reativa da sílica de casca de arroz nas misturas de cimento Portland CP II - Z .....	47

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Justificativa.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Reação Álcali-Sílica .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Efeitos da RAS gerada pela CCA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 Mecanismos de Expansão.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.1 Teoria da dupla camada.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2 Partícula em ambiente propício .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Métodos de investigação da RAS .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.1 Método acelerado em barras de argamassa (MABA) .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.2 Método acelerado em barras de argamassa com inibidores de RAS.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.1 Cimento Portland e adições minerais.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.2 Areia local .....</b>	<b>31</b>
<b>Determinação da expansão em Barras de Argamassa .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 Misturas.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4 Resistência Mecânica .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.1 Comportamento à Compressão .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.2 Ensaio de flexão em três pontos e compressão simples .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Propriedades Mecânicas .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.1 Resistência à Compressão.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.2 Resistência à tração na flexão em três pontos.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.3 Resistência à Tração na Flexão X Resistência à Compressão .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2 Análise da expansibilidade.....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.1 Expansão das barras de argamassa com cimento Portland CII – Z46</b>	
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em tempos de conscientização ambiental, se torna cada vez mais visível a preocupação com o planeta. Nesse contexto, o uso extensivo de recursos naturais proporcionou riquezas e desenvolvimento, porém, o efeito do uso irresponsável da extração de recursos no passado e até mesmo agora reflete na vida das pessoas (HOEHR, 2011).

As mudanças climáticas que hoje ocorrem como o gradual e contínuo aquecimento da atmosfera e dos oceanos acontece devido à alta concentração de gases poluentes, na qual um dos principais problemas tem sido o consumo crescente de Cimento Portland tendo o clínquer como principal constituinte, que em sua produção gera grandes quantidades de CO<sub>2</sub>, o que torna necessária a adoção de medidas preventivas para esse impasse.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, dados preliminares da indústria e estimativas de mercado indicam que as vendas de cimento para o mercado brasileiro, em outubro de 2015, atingiram em torno de 5,6 milhões de toneladas (ABCP, 2015).

Mesmo com o país vivendo tempos de recesso, as vendas acumuladas de janeiro a outubro de 2015 alcançaram 54,8 milhões de toneladas, diminuindo em torno de 8,4% em relação ao ano de 2014 (SNIC, 2015).

Uma das alternativas para a redução do consumo de cimento Portland é a inclusão de adições minerais no processo de fabricação, substituindo parte de cimento por essas pozolanas.

Com o intuito de mesclar potencialidades técnicas, econômicas e ambientais dos concretos utilizados, pesquisadores como Isaia e Gastaldini (2009) utilizaram misturas de concretos empregando adições minerais em substituição parcial de cimento Portland e, como resultado, eles conseguiram até 90% de adição de cinza volante e escória de alto forno de siderúrgicas, tendo em vista a obtenção de misturas sustentáveis proporcionando algo além de uma simples substituição em parte do cimento (ISAIA, 2009).

Devido à alta gama de aplicações, o concreto vem sendo estudado na forma de novas tecnologias para que respeite não somente os padrões de desempenho, mas também os termos de durabilidade e de sustentabilidade em

suas aplicações, na qual se busca torná-lo um material mais confiável e seguro em torno de sua vida útil.

A utilização de cimento sustentável requer a redução do seu consumo, uma das maneiras é por meio do controle na produção do clínquer, bem como a substituição de adições minerais em relação ao consumo de cimento Portland. Tal medida, se adotada corretamente, acarretaria na redução das enormes taxas de emissão de CO<sub>2</sub> (ocasionadas pela produção do cimento Portland, sendo que para a produção de 1 tonelada de cimento Portland é também lançado ao meio ambiente aproximadamente 1 tonelada de CO<sub>2</sub>), promovendo ganhos ambientais (FOLETTTO, 2005).

De acordo com os pesquisadores Metha e Monteiro (2008), de 50% a 70% da massa de clínquer que compõe o cimento pode ser substituída por materiais provenientes de rejeitos industriais ou agroindustriais como a cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno e a sílica e/ou cinza de casca de arroz, desde que estes materiais apresentem-se na forma amorfa, com propriedades cimentantes ou pozolânicas.

A sílica é fruto de queima de cascas de arroz em fornos industriais, termoelétricas ou engenhos beneficiadores que utilizam a casca para secagem e parboilização deste produto. Ademais, neste processo a sua combustão produz energia elétrica e se dá de forma descontrolada (HöER, 2011).

Mesmo que a combustão realizada não se dê com controle de queima, a cinza torna-se um material com teores de sílica acima dos 90%, geralmente em forma cristalina e não amorfa (SILVA, et. al., 2008).

Se a combustão da casca for promovida com a finalidade de suprimir o carbono residual pode-se obter cerca de 95% de sílica pura, tornando um material que antes era um rejeito industrial de alto risco ecológico, em um subproduto para construção civil (FOLETTTO, 2005).

Pesquisas realizadas atestam que a sílica de casca de arroz atua como contribuinte no concreto agindo além do ganho de resistência mecânica, propiciando, também, aumentos significativos nos ganhos de durabilidade (MALHORTA, 1996; NAIR, 2008; MEHTA, 2009; MENDES, 2014).

A durabilidade de estruturas de concreto e argamassa é diretamente proporcional à qualidade dos agregados e adições minerais empregados, e

alguns destes são capazes de promover reações expansivas que deterioram o material.

Uma dessas reações é denominada por reação álcali-agregado, atuando como um processo químico onde parte dos componentes mineralógicos dos agregados reage diretamente com os hidróxidos alcalinos liberados durante a hidratação do cimento, materiais pozolânicos ou até mesmo agentes externos (THOMAS, 2006).

O produto dessa reação é a formação de uma espécie de gel viscoso, que ao entrar em contato com a umidade tem efeito expansivo, criando tensões internas que provocam fissuras em torno dos agregados. Por ser um material higroscópico, atrai moléculas aquosas que migram através da pasta de cimento, gerando elevadas tensões internas com conseqüente expansão e fissuração das estruturas (ADORNO, 2013).

Esta forma de degradação atinge estruturas em contato direto e constante com a água, gerando elevados danos causados pela expansão e posterior fissuração de concretos com a ocorrência da reação álcali-sílica, exibindo em sua superfície um mapa de fissuras, abrindo caminho para a entrada de umidade, tornando ainda mais rápido este tipo reação (ZERBINO, 2012).

Até o momento, não há registros de pesquisas realizadas analisando o potencial reativo da sílica de casca de arroz frente à reação álcali sílica, no entanto, alguns estudos indicam que a utilização da cinza de casca de arroz sem queima controlada na mistura de argamassas apresentou tendência a elevar o risco de ocorrência da reação álcali-sílica por ser altamente reativa (HöEHR, 2011, ZERBINO et al; 2012; ADORNO, 2013).

Tendo uma visão sustentável e ecológica, para melhor compreensão deste trabalho formula-se a seguinte pergunta: qual o comportamento da sílica de casca de arroz perante a reação álcali-sílica?

## **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a durabilidade de argamassas, devido à expansão ocasionada pela reação álcali-sílica, produzidas com sílica de casca de arroz em substituição parcial do cimento Portland CII Z-32.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Pra atingir o objetivo geral deste trabalho foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- analisar a resistência mecânica através dos ensaios de compressão simples e de tração na flexão em três pontos.
- analisar os efeitos provocados pela substituição parcial de 3, 5 e 10% de cimento Portland por SCA na RAS em barras de argamassa frente à reação álcali sílica.

## **1.3 Justificativa**

As formas de propagação da reação álcali agregado tem gerado degradação e até mesmo desativação de estruturas importantes como barragens, pontes e estruturas localizadas em ambientes marinhos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Hasparyk (2005), no meio técnico foram registrados 140 casos de barragens afetadas pela RAS no ano de 2005, tendo efeito ainda mais agressivo em estruturas compostas por equipamentos hidrodinâmicos e elétricos como comportas e turbinas, apontando os problemas gerados pela reação como principal motivo para os elevados custos de manutenção e reparo.

Segundo Andrade (2007), na África do Sul, entre os anos de 1970 e 1996 foram gastos US\$ 350.000.000.000 (trezentos e cinquenta bilhões de dólares americanos) apenas com manutenção e reparos de estruturas afetadas pela RAA.

Entre os anos de 2005 e 2007, registraram-se na região metropolitana de Recife-PE no Brasil, 15 casos de aparecimento de fissuras em blocos de fundação atingidos pela RAA, que até pouco tempo só eram registradas para casos ocorridos em obras hidráulicas (ANDRADE, 2007).

De acordo com Silva (2009), ainda que tenham sido desenvolvidas diversas pesquisas em relação á RAA, ainda não se dispõe de maneiras eficientes para responder perguntas como: qual a velocidade de expansão aproximada para uma estrutura afetada pela RAA? Quais as maneiras de evitar o prosseguimento da reação?

A RAA pode atingir estruturas de valores ambientais e socioeconômicos importantes como barragens, hidrelétricas, sistemas de abastecimento de água, entre outros, diminuindo sua vida útil e por consequência obtendo um acréscimo nos gastos em manutenção, dinheiro que poderia estar sendo aplicado em saúde pública.

Dessa forma, a pesquisa sobre a medida da mitigação da reação álcali-silica, um dos três mecanismos de propagação da reação álcali-agregado, objeto deste trabalho de conclusão de curso, mostra-se relevante para o meio acadêmico e à comunidade científica, objetivando a análise do comportamento da sílica de casca de arroz frente a este tipo de reação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Reação Álcali-Sílica

A reação álcali-agregado (RAA) acontece devido a um processo químico que ocorre internamente no concreto, onde alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem com hidróxidos alcalinos advindos principalmente do cimento, de algumas formas de sílica reativa presentes no agregado ou em adições minerais.

Após a reação, formam-se produtos que, quando expostos a umidade, podem expandir gerando diferentes patologias como movimentações diferenciais nas estruturas, fissurações, expansões, entre outros. A Figura 1, apresenta um caso de RAA que atingiu um bloco de fundação na cidade de Recife-PE.

Figura 1 - Degradação da estrutura causada pela RAA



Fonte: Munhoz (2007, p.10)

De acordo com o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON, 2015), a RAA possui três tipos de agentes causadores das reações deletérias:

- Reação álcali-sílica: envolvendo a presença de sílica amorfa e alguns tipos de vidros naturais ou de origem vulcânica.
- Reação álcali-silicato: de maneira geral, ocorre do mesmo modo que a reação álcali-sílica, porém, de forma mais lenta.

- Reação álcali-carbonato: ocorrem em alguns tipos de calcários dolomíticos e certas reações alcalinas presentes nos poros do concreto.

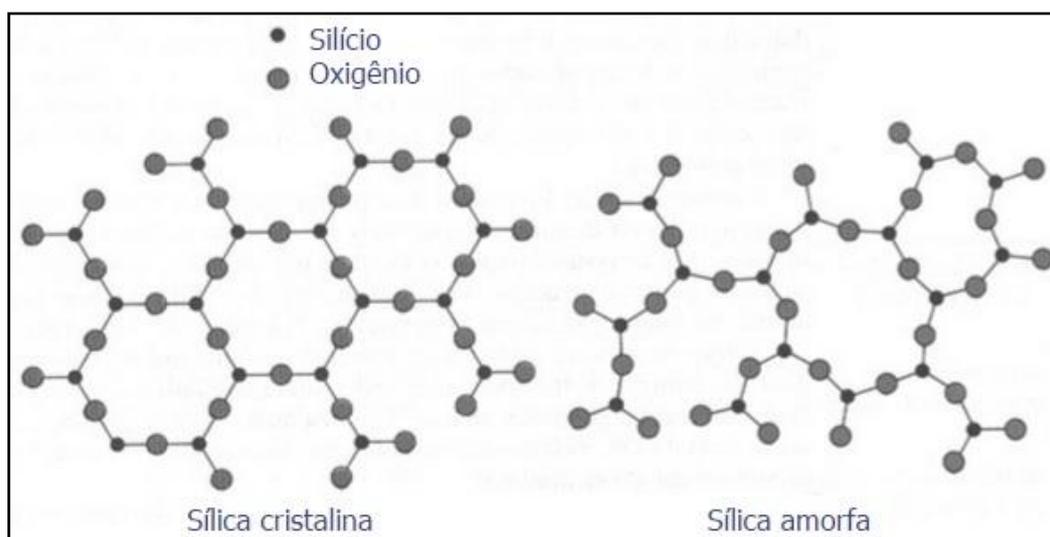
## 2.2 Efeitos da RAS gerada pela CCA

De acordo com Pires (2009), a RAS é o agente deletério mais registrado e estudado dentre as reações álcali-agregado, possivelmente pelo motivo de agir mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativa (HASPARYK, 2005).

Dentre as composições minerais comumente encontradas estão a opala, calcedônia, cristobalita, tridimita e diversos vidros vulcânicos e artificiais (FURNAS, 1997).

De acordo com sua composição estrutural, a sílica pode ser amorfa ou cristalina. Segundo Paulon (apud HÖEHR, 2011), existem diversas formas de organização nas formas cristalinas de sílica onde os tetraedros unem-se formando uma rede tridimensional orientada, o que não acontece com a sílica vítrea em que os tetraedros unem-se de forma aleatória, sem orientação. A Figura 2 mostra a forma de organização das sílicas cristalina e amorfa.

Figura 2 - Representação esquemática das formas cristalina e amorfa



Fonte: Kingery et al. apud Höehr (2011, p. 54)

De forma geral, diversos fatores influenciam na intensidade e velocidade de deterioração da RAS, tais como:

- A magnitude da expansão dependerá do teor de álcalis do cimento e o consumo de cimento do concreto (POOLE, 1992).

- Em lugares onde a umidade ambiente permanecer entre 80 e 85%, aumenta a possibilidade de reação. Estruturas localizadas em ambiente marinho ou ambientes úmidos como barragens e fundações estão sujeitas a este tipo de deterioração, no entanto, falta de água e ambientes com pouca umidade podem limitar o efeito expansivo da RAA mesmo com a utilização de agregados reativos e grande quantidade de álcalis (MEHTA; MONTEIRO, 1994; BULLETIN 79, 1991; POOLE; 1992).

- Com o aumento da temperatura ambiente, há aumento na velocidade de reação. Reações químicas são aceleradas com temperaturas elevadas (BICZOK, 1972; BULLETIN 79, 1991).

Segundo Glasser (1992), reações químicas envolvendo álcalis são os principais fatores no processo físico de expansão da RAA, conseqüentemente RAS.

Geralmente, os álcalis responsáveis por esta reação, são oriundos de materiais silicosos ou de argilas (MANTUANO, 2006). Os álcalis estão presentes na composição do clínquer e demonstram-se na forma de aluminatos ou silicatos, mas também, podem ser oriundos de adições minerais, agregados ou por meios externos como ocorre em ambientes marinhos devido à infiltração de sulfatos e cloretos de sódio (GLASSER, 1992).

Estes álcalis, presentes na composição do cimento, encontram-se de duas formas distintas: solúveis e insolúveis. Os álcalis solúveis estão presentes nos sulfatos, enquanto os insolúveis estão presentes nas fases sólidas da composição do clínquer (DIAMOND, 1975).

De acordo com Glasser (1992), durante a hidratação do cimento, o fornecimento de álcalis para a solução ocorre de forma mais acelerada quando exposta a sulfatos, pois os álcalis presentes na composição do clínquer são dispostos de forma mais lenta, ou seja, são liberados de acordo com a velocidade da hidratação. Dessa forma, o autor deixa explícito que não importa a fonte, uma vez que haja a RAA, que ocorre de maneira lenta, todos os álcalis presentes nos poros do concreto participarão da reação.

## **2.3 Mecanismos de Expansão**

O primeiro a exemplificar o mecanismo de expansão do gel, produto da reação dos álcalis foi Hansen (1944) (apud Höehr, 2011). Em sua teoria, denominada pressão osmótica, Hansen argumentou que de certa forma, os produtos da reação ficavam confinados dentro de uma membrana semipermeável dentro da pasta de cimento, e devido a pressões hidráulicas causavam patologias nas estruturas.

No entanto, de acordo com a teoria da adsorção criada por Vivian (1950) (apud Höehr, 2011), as patologias são geradas por atividades internas, causadas por pressões mecânicas que produtos sólidos ou semissólidos exercem na estrutura. A magnitude da expansão dependerá da proporção volumétrica de gel, suas propriedades físicas e sua taxa de crescimento. Caso a taxa de crescimento ocorrer lentamente, o gel pode migrar dissipando as tensões, porém, se ocorrer de forma acelerada, às pressões internas pode aumentar de forma que cause fissuração e expansão do gel (HOBBS, 1988).

Levando em consideração estes aspectos, Preziet et al. (1997) estabeleceram uma correlação entre a profundidade da expansão e a composição química do gel por meio do conceito da dupla camada elétrica.

### **2.3.1 Teoria da dupla camada**

A teoria da dupla camada, criada por Preziet et al. (1997), exemplifica as reações volumétricas causadas pela RAS partindo de um conceito básico da química de superfície. As expansões ocasionadas pelo gel são atribuídas às forças de repulsão da dupla camada elétrica.

De acordo com os supracitados autores, quando uma fase sólida entra em contato com uma fase líquida, a superfície deste sólido acaba ficando sobrecarregada, deixando a interface polarizada, e acaba alterando as propriedades das duas faces.

O fenômeno da RAS está ligado à interação da solução dos poros do concreto e da sílica altamente carregada presente nos agregados ou adição mineral. Esta reação promove a dissolução da sílica, formando um gel capaz de se expandir na presença de água (HÖEHR, 2011).

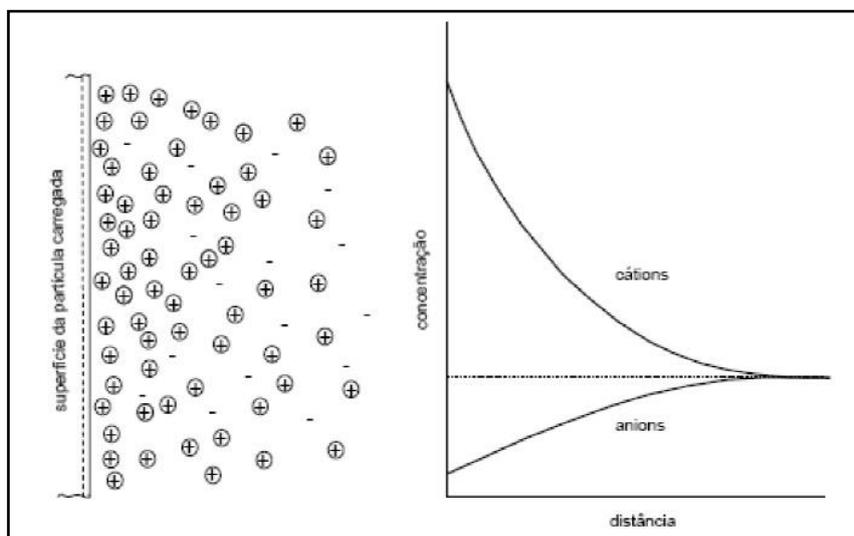
Segundo Oliveira (2000), a dupla camada elétrica é composta principalmente por íons de cálcio, sódio e potássio, e se desenvolve na superfície da sílica para neutralizar sua carga negativa.

Através de forças eletrostáticas os íons alcalinos são fixados nos locais onde o oxigênio possui ligações incompletas na superfície da sílica amorfa. De acordo com Preziet et al. (1997), esta troca iônica é similar com a que acontece com o ácido base.

Conforme as reações vão acontecendo, vai se formando um aglomerado de micro fissuras que alteram a configuração dos poros que permite o ingresso mais fácil da água no concreto (PREZZI, 1997).

A superfície carregada e a distribuída na fase adjacente denominam-se “dupla camada difusa”. Na Figura 3 está representada a camada difusa em uma solução eletrolítica monovalente.

Figura 3 - Distribuição dos íons adjacentes na superfície do sólido, de acordo com o conceito da dupla camada difusa



Fonte: Mitchell (1992) apud Höehr (2011, p. 57)

Dois fatores combinados interferem na espessura da dupla camada: excesso de cátions localizados e deficiência de ânions. Dessa forma, as cargas negativas da superfície da partícula atraem os cátions e repelem os ânions (PREZZI, 1997). De acordo com Souza (2000), outro fator que influencia na força de atração é devido às forças de Van der Waals, unindo as moléculas entre si.

Mitchell (1992) argumenta que, de acordo com a teoria da dupla camada, quanto maior a temperatura, maior será a espessura da camada contribuindo para a expansão.

Seguindo o modelo de Gouy-Chapman, Prezzi (1997) calculou a pressão do concreto devido a RAS na parte difusa da dupla camada elétrica, encontrando pressões que variam de 2,2 a 10,3 MPa, sendo estes valores coerentes com a prática que foram na ordem de 7 MPa (DIAMOND, 1989).

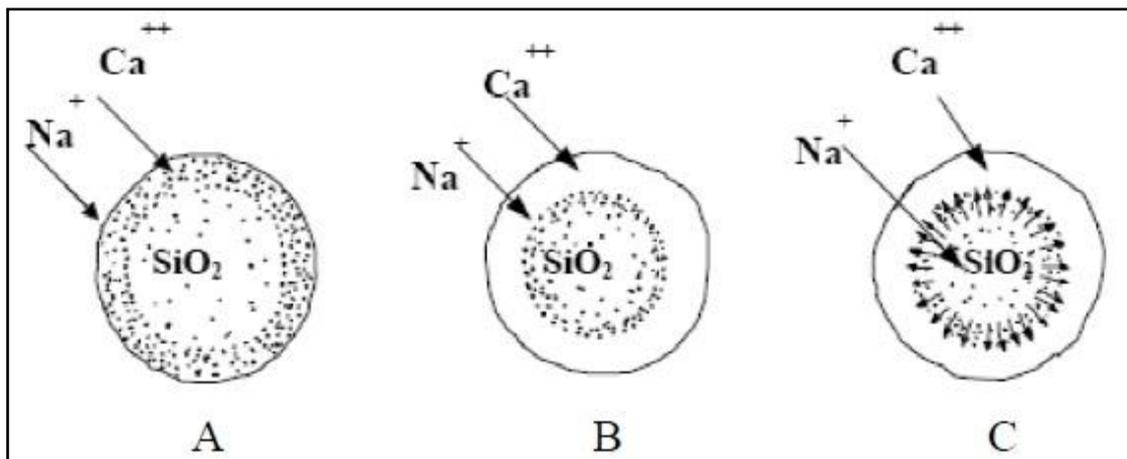
Analisando o poder de reação causado pela expansão, pode-se afirmar que o gel com maior teor de íons de sódio ou potássio terá expansões superiores do que aqueles compostos por íons de cálcio, pois a concentração de íons e a valência é que determinam a espessura da dupla camada elétrica e as forças de repulsão (HASPARYK, 1999).

### **2.3.2 Partícula em ambiente propício**

De acordo com Paulon (1981), o número de moléculas de água que se mantém na ligação é proporcional à área da superfície e não à quantidade total de sílica. Os íons de hidroxila são mais ligados do que os íons de hidrogênio, dos quais podem ser liberados no contato com a água, produzindo íons de hidrogênio livres, tornando ácidas as partículas de sílica superficiais.

A reatividade dependerá da área de superfície da sílica. Quanto maior for à subdivisão da partícula microscópica, maior será o número de moléculas absorventes, aumentando assim, o número de íons de hidrogênio livres e acarretando no aumento da reatividade. A Figura 4 apresenta a forma de propagação da RAS.

Figura 4 - Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento



Fonte: Paulon (1981) apud Höehr (2011, p. 58)

Primeiramente, na partícula A, percebe-se que a partícula de sílica reativa é cercada por íons de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , que estão presentes na pasta de cimento em solução básica. Devido à alta concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na pasta de cimento, forma-se uma fina camada de um gel de cal-álcali-sílica (partícula B) de caráter não expansivo ao redor da sílica, sendo essa fase considerada não reativa.

Os íons de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  acabam penetrando na membrana semipermeável (Figura 6-C), onde reagirão com a sílica.

Caso a concentração de cálcio seja alta o suficiente para segurar a contínua formação do gel expansivo, essa reação será inócua, uma vez que há consumo de álcalis durante a reação, havendo redução na concentração alcalina.

Paulon (1981) ainda explica que se a concentração de cálcio não for suficiente, os álcalis reagirão formando um gel de álcali-sílica, que ao entrar em contato com a água, provocará um efeito expansivo do qual ocasionará em fissuras quando as forças de expansão do gel forem superiores à resistência à tração da pasta de cimento. Estas expansões serão impedidas somente quando os álcalis ou a sílica reativa forem consumidos.

## **2.4 Métodos de investigação da RAS**

Com base em normas estrangeiras, foi criada no Brasil a norma ABNT NBR 15577/2008 para a avaliação da potencialidade reativa e medidas preventivas frente à RAS para uso em agregados e adições, no concreto e em barras de argamassa.

No Brasil, os ensaios e métodos de investigação, quando se trata da RAS, são recentes, não havendo muitas discordâncias sobre os resultados. Esta incerteza se deve ao fato de que os valores obtidos em diferentes ensaios divergem entre si justamente pelo uso de diferentes técnicas para a investigação deste fenômeno patológico (HÖEHR, 2011).

Os ensaios realizados utilizando adições minerais frente à RAS ainda são muito recentes. A reação ocorrerá tanto no concreto quanto em argamassas, sendo os resultados avaliados em concretos mais fidedignos aos que ocorrem “in loco”. Outro fato que deve ser levado em conta é a demora na obtenção de resultados nos ensaios de concreto.

Höehr (2011) argumenta que os ensaios em concreto, que demoram em torno de 1 a 2 anos, necessitam de um método mais rápido e confiável para a obtenção destes resultados

### **2.4.1 Método acelerado em barras de argamassa (MABA)**

Segundo o IBRACON, o método acelerado em barras de argamassa é derivado do método NBRI (National Building Research Institute), criado por Oberholster e Davies em 1985, sendo hoje, o método mais difundido do Brasil. Outras normas também preconizam este ensaio, dentre elas está à norma ASTM C 1260.

A criação do método acelerado se deu quando van Aart e Visser (1982) (apud HÖEHR, 2011) propôs que para a reação acontecer de forma acelerada, às amostras deveriam ser colocadas em solução de NaOH1N.

Os limites de expansão normatizados pela ASTM C 1260, que delimita expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias para corpos de prova com comportamento inócuo e expansões iguais ou superiores a 0,10% e inferiores a

20% com comportamento reativo, enquanto amostras com expansões superiores a 20% aos 16 dias indicam um comportamento reativo.

As normas que regulamentam este ensaio preconizam diferentes faixas de expansão e não existe um consenso que tange limites e períodos específicos perante o MABA. De acordo com Lee et al. (2004), este método é muito rigoroso e pode descartar agregados que, a campo, apresentam desempenho satisfatório.

#### **2.4.2 Método acelerado em barras de argamassa com inibidores de RAS**

Este método foi criado para testar a eficiência das adições minerais no controle da RAS. A fim de determinar o grau de susceptibilidade de cimentos Portland combinados ou não com adições minerais, a ABNT NBR 15577:2008 estabeleceu um método acelerado, comprovando esta mitigação em que a variação de comprimento das barras de argamassa não ultrapasse os limites impostos pela mesma.

O método proposto pela ABNT NBR 15577-5/2008 é muito parecido com a ABNT NBR 15577-4/2008, utiliza as mesmas frações granulométricas dos agregados miúdos, as moldagens, armazenamentos e os métodos de cura. No entanto, se necessário, deve-se utilizar aditivos a fim de manter a mesma consistência do cimento padrão, em torno de 7,5%.

Outro fator que difere são os tempos de ensaio propostos pela norma ABNT NBR 15577-5/2008 que pode ser interpretado através de limites de expansão

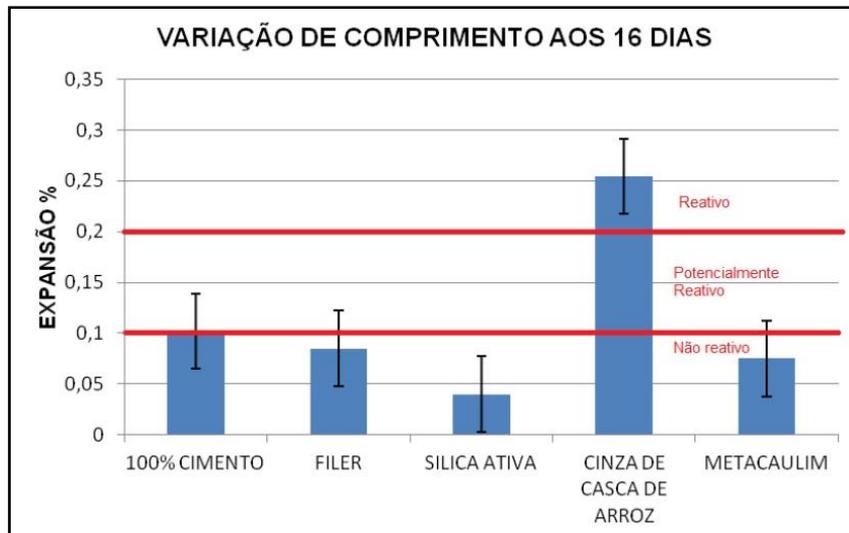
Expansões superiores ou iguais a 0,10% aos 16 dias demonstram a potencialidade reativa do material necessitando à adoção de novas misturas, enquanto as expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias demonstram um comportamento inócuo.

Adorno (2013) verificou a mitigação da RAS, seguindo o método acelerado prescrito pela norma ABNT NBR 15577-4:2008, utilizando cimento Portland CP V e comparando os resultados obtidos utilizando, também, adições minerais.

De acordo com a Figura 5, o autor constatou que o agregado pode ter comportamento potencialmente reativo, pois aos 16 dias não atende aos limites

estabelecidos pela norma. Também de acordo com a Figura 5, percebe-se que há tendência na redução da expansão por reação álcali-silica para as barras de adições minerais, com exceção das compostas por cinza de casca de arroz.

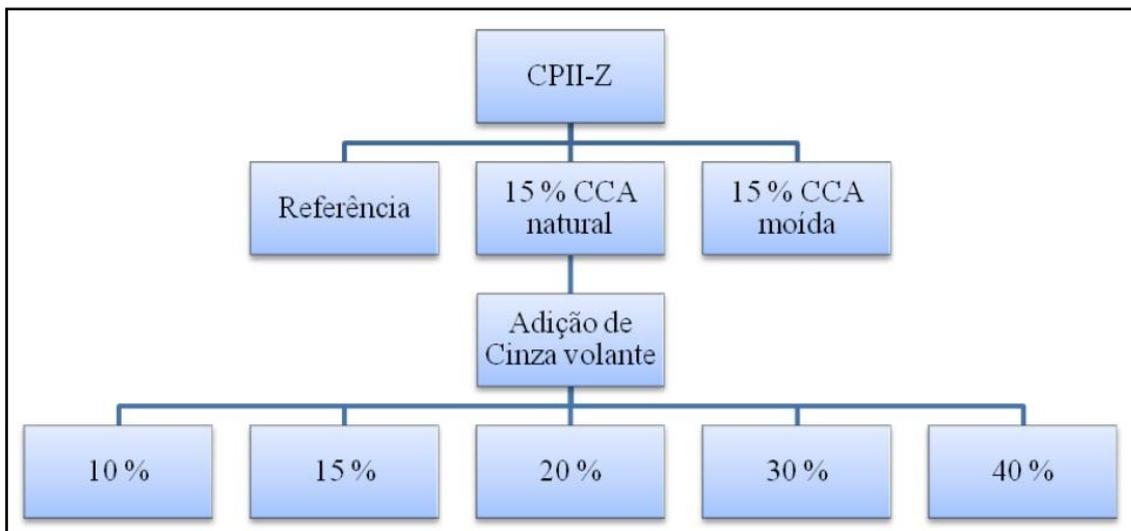
Figura 5 - Variação de comprimento das barras de argamassa aos 16 dias



Fonte: Adorno (2013, p. 14)

Höehr (2011) também mediu a mitigação da RAS utilizando diferentes porcentagens de adição como representado na Figura 6.

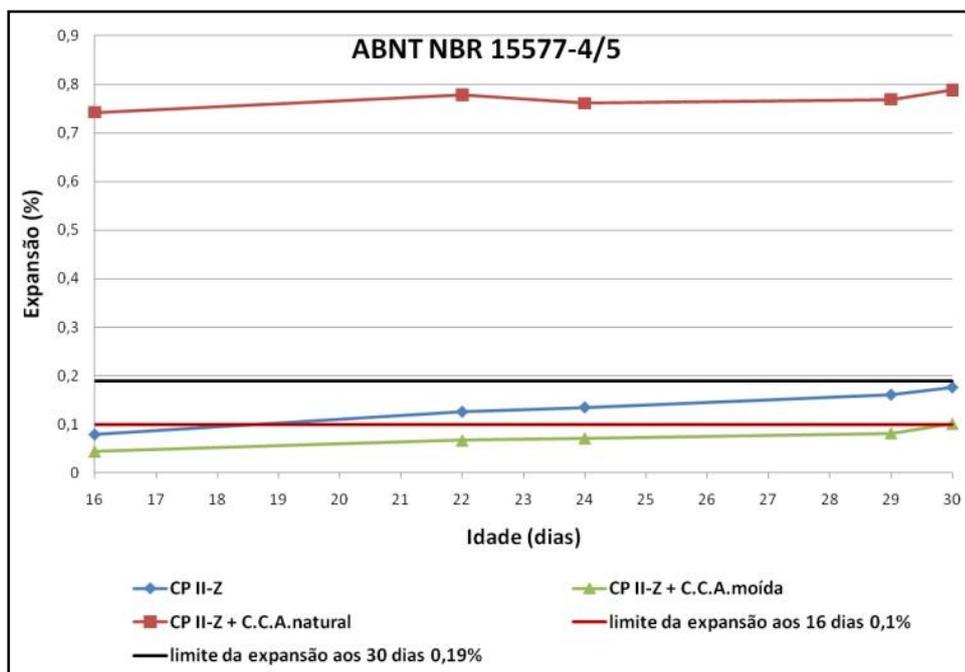
Figura 6 - Fluxograma das variáveis de ensaio



Fonte: Höehr (2011, p. 93)

Na Figura 7 pode-se observar comparativamente o comportamento médio das barras de argamassa frente à expansão utilizando a mistura entre o cimento Portland CII-Z e 15% de cinza de casca de arroz moída ou natural sem substituição parcial com o cimento.

Figura 7 - Expansão em barras de argamassa pelo método acelerado



Fonte: Höehr (2011, p. 108)

Na Figura 8, demonstram-se os valores obtidos nos resultados das expansões médias no período de 16 e 30 dias das barras de argamassa produzidas com cimento Portland CII-Z.

O autor analisou que a mistura de cimento Portland CII-Z com a CCA moída apresentou menor expansão do que com a mistura composta somente por cimento. Na Figura 8, nota-se que estas duas misturas foram consideradas inócuas, nas duas idades que foram analisadas. Os resultados demonstraram que o cimento Portland CII-Z apresenta comportamento adequado frente à RAS. Assim como Höehr (2011), Munhoz (2007) utilizou o cimento Portland CII-Z nos ensaios celerados em barras de argamassa, cujos resultados identificaram que o emprego deste tipo de cimento não foi suficiente para mitigar as reações expansivas.

Figura 8 - Expansão das barras de argamassa aos 16 e 30 dias

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

Fonte: Höehr (2011, p. 111)

### 2.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Utiliza-se a microscopia eletrônica de varredura para possibilitar uma correlação entre diversas morfologias características dos produtos encontrados e seus componentes químicos, para isso, utiliza-se em conjunto a técnica de espectrometria de energia dispersiva (EDS) (HASPARYK (1999)).

Por meio da MEV, pode-se observar o gel produzido pela reação álcali-agregado nas interfaces e bordas da pasta/agregado. A partir desta análise, pode-se verificar o grau de deterioração da amostra mediante a concentração de produtos e classificar os vários tipos de géis formados (PIRES, 2009).

Höehr (2011) analisou a formação do gel sílico-alcálico em barras de argamassa compostas por cimento padrão com 20% de adição de cinza de casca de arroz natural que apresentou alto índice de expansão frente à reação álcal-sílica.

A investigação feita utilizando o MEV identificou que as amostras compostas por cinza de casca de arroz natural, mesmo utilizando cimento padrão e areia normal, apresentaram o gel gretado composto principalmente por sílica, cálcio e sódio típicos da RAS em torno do agregado, este fato, comprova a possível reatividade dos álcalis do cimento com a sílica da CCA natural (HÖEHR, 2011).

Höehr (2011) ainda argumenta que com o auxílio do aparelho de difração de raios-x, o MEV foi capaz de mostrar as composições químicas dos materiais encontrados nos poros das amostras.

### 3 METODOLOGIA

Para realização deste estudo foram empregados os ensaios necessários para a avaliação da potencialidade reativa da sílica da casca de arroz a fim de avaliar a aplicabilidade desse material em ambientes com elevado grau de risco estrutural.

#### 3.1 Materiais

Para a produção das barras de argamassa foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland CII-Z 32;
- Sílica de casca de arroz SCI;
- Areia local.

As especificações e demais características estão apresentadas nos itens a seguir:

##### 3.1.1 Cimento Portland e adições minerais

Para o desenvolvimento deste protocolo experimental foi utilizado como aglomerante o Cimento Portland brasileiro CII-Z 32, que de acordo com a norma ABNT NBR 11578 (1991) é composto por 6 a 14% de pozolanas; sílica da casca de arroz (SCA) comercializada pela empresa Pilecco Nobre comercialmente chamada de Silcca Nobre SCI. As composições químicas e características físicas da sílica e do cimento Portland CII-Z 32 estão dispostas na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1 - Composição e propriedade físico química da Sílica de Casca de Arroz

Sílica da Casca de Arroz										
Perda ao fogo (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	MnO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
3,50	91,48	0,00	0,05	0,32	0,15	0,04	0,36	1,40	0,32	0,45

Fonte: Marangon et al. (2014, p. 3)

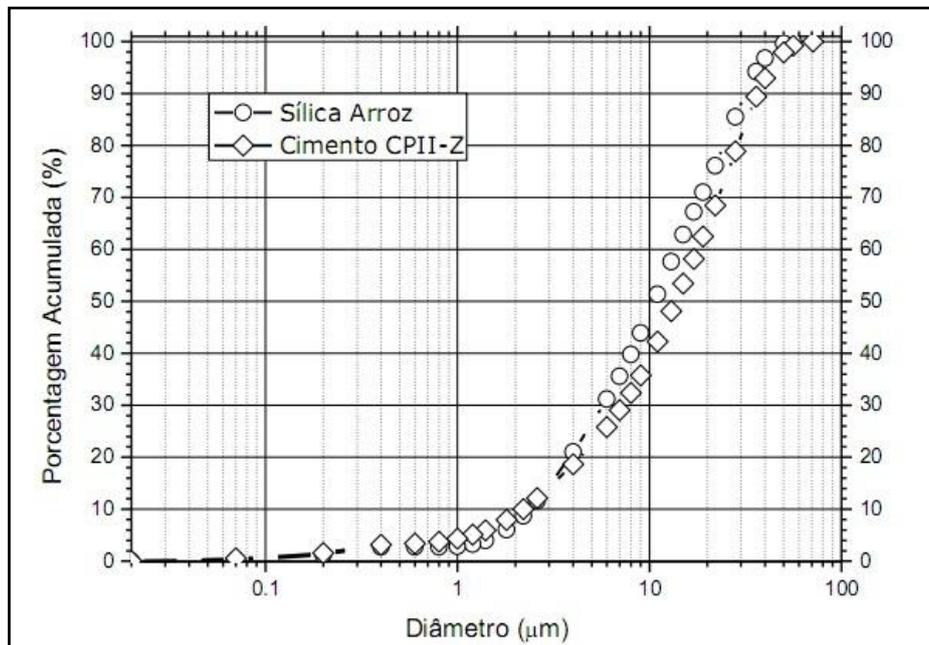
Tabela 2 - Propriedades químicas do cimento Portland CII-Z 32

Cimento Portland CII-Z 32										
Perda ao fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente Alcalino (%)	Expansão Quente (mm)	Início de Pega (h)	Fim de Pega (h)	Consistência Normal (%)	#200 (%)
5,34	4,37	5,87	4,37	12,8	0,74	0,55	0,17	0,24	26,80	3,10

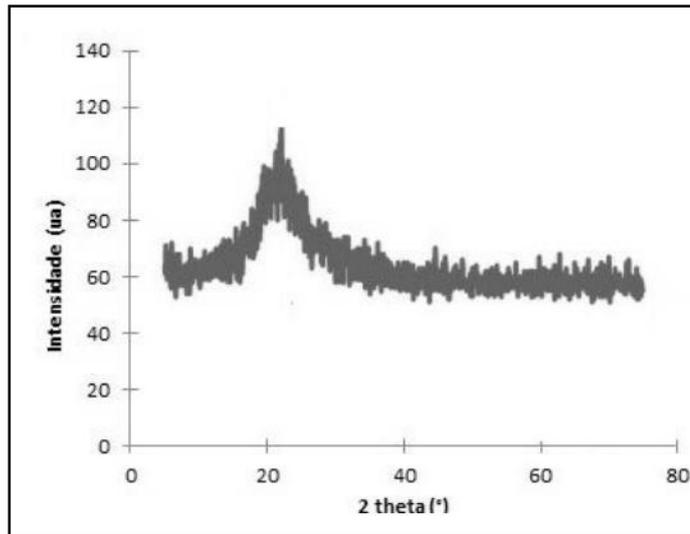
Fonte: Marangon et al (2014, p. 3)

De acordo com a Figura 9 - A, é possível observar que as composições granulométricas da SCA e do Cimento Portland CII-Z são semelhantes. Na Figura 9- B percebe-se que a sílica da casca de arroz apresenta uma estrutura tipicamente amorfa pelo fato de existir um alargamento nos picos e o aparecimento de bandas mostradas pelo difratograma.

Figura 9 - (a) Curvas granulométricas do cimento CII-Z e da sílica da casca de arroz; (b) Análise de difração de raios X da SCA



(A)



(B)

Fonte: Marangon et al. (2014, p. 2)

### 3.1.2 Areia local

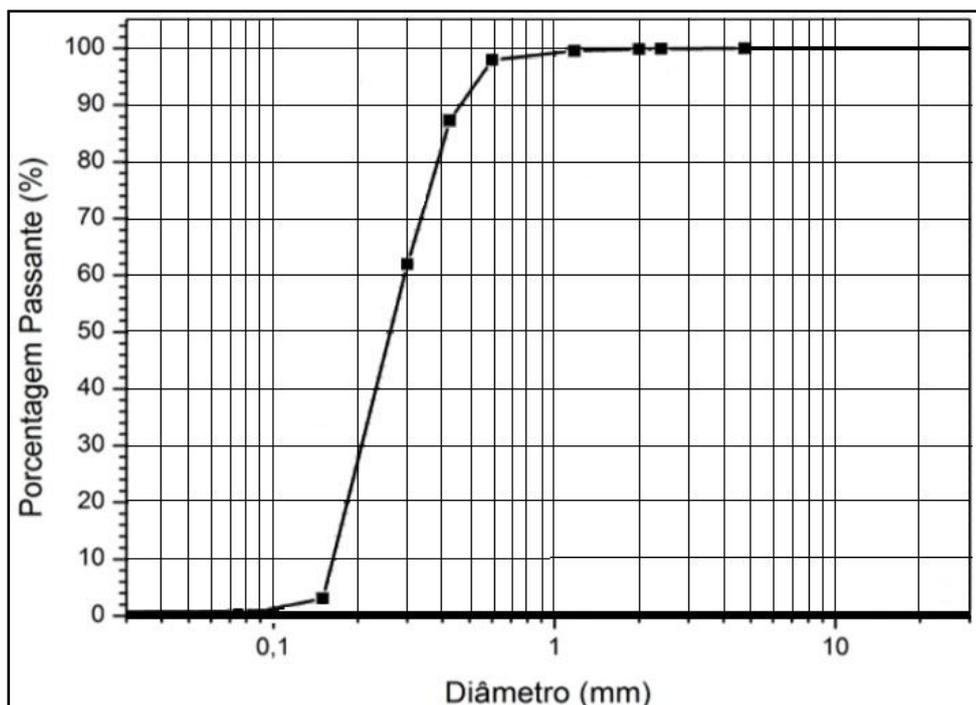
O agregado miúdo utilizado foi a areia natural proveniente do leito do Rio Ibicuí, do município de Manoel Viana-RS, já caracterizado por Mendes (2014) e apresentado na Tabela 3, juntamente com sua composição granulométrica apresentada na Figura 10.

Tabela 3 - Características do agregado miúdo

<b>Módulo de Finura</b>	<b>Dimensão Máxima Característica (mm)</b>	<b>Massa Específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo de Finura</b>	<b>Massa Unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
1,37	0,6	2,63	1,37	1,53

Fonte: Mendes et al. (2014, p. 37)

Figura 10 - Composição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Mendes et al. (2014, p. 37)

### Determinação da expansão em Barras de Argamassa

A determinação da expansão nas barras de argamassa foi realizada pelo método acelerado especificado na ABNT 15577-4/2008.

O objetivo deste método é avaliar a reatividade de agregados expostos a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, por meio do monitoramento da expansão dimensional de barras de argamassa.

Nesse método o agregado deve atender as dimensões mínimas fracionadas conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Peneiras para ensaio e traço utilizado

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	G
4,75mm	2,36mm	10	99,0
2,36mm	1,18mm	25	247,5
1,18mm	600 um	25	247,5
60um	300 um	25	247,5
300um	150um	15	148,5

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

A norma recomenda que as barras de argamassa devam ser moldadas com proporção aglomerante/agregado de 1:2.25 (440g:990g), com relação à/ag igual a 0,47 utilizando um cimento comprovadamente “não mitigador” da reação álcali-agregado e com expansão em confinamento inferior a 0,2%.

As barras foram desenformadas após 24h em cura ambiente, e colocadas em um banho termo regulador (demonstrado na Figura 11), no qual foi gradualmente aquecido desde a temperatura ambiente até atingir 80°C; as barras ficaram armazenadas neste recipiente por 24h.

Figura 11 - Banho termo regulador: vista externa (A) e vista interna (B)



(A)



(B)

Fonte: Elaboração própria

Após repousar durante 24h neste período de estabilização, as barras tiveram suas dimensões medidas em sala climatizada à aproximadamente 23°C, de forma que fosse registrada a leitura inicial a 80°C. Cabe ressaltar que durante a pesquisa, o termostato do banho termo regulador apresentou defeito, sendo incapaz de manter a temperatura em 80°C. Para manter a temperatura e 80°C, quando o banho era acionado, media-se a temperatura com o auxílio de um termômetro analógico de forma que não ultrapassasse o limite proposto por norma.

As medidas tiveram precisão de 0,002mm e foram realizadas no período de 15 segundos, de forma que não resfriasse significativamente as barras de argamassa, conforme recomendado pela norma, utilizando o equipamento de medição mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Equipamento utilizado para a medição das barras de argamassa composto por medidor digital e barra de calibragem



Fonte: Elaboração própria

Logo após a leitura inicial, as barras foram levadas até um tanque com solução aquosa de NaOH 1N capaz de manter a temperatura em 80°C, tendo seus comprimentos medidos periodicamente, distribuídos uniformemente durante o período de 56 dias contados a partir do momento de inserção das barras no meio alcalino, onde possibilitou o cálculo da expansão linear.

A metodologia presente na norma ABNT NBR 15577-4/2008, estabelece que a expansão média de três barras distintas deve ser calculada em pelo menos três idades diferentes durante o intervalo de 28 dias de cura em solução alcalina, porém, para este trabalho as barras foram medidas com maior frequência durante o período de 45 dias.

Após as medições e considerando a repetibilidade satisfatória quando duas dessas medições não diferirem mais que 8,3% da expansão média para valores de 0,10% aos 14 dias de cura em meio alcalino, dentro de um mesmo laboratório.

De acordo com a norma, os resultados devem ser expressos pela média entre as leituras de três barras, atendendo aos valores limites individuais de 0,001% e a média, com aproximação de 0,01%.

Ademais, se os resultados obtidos durante o ensaio acusar em expansões inferiores a 0,19% aos 30 dias de idade, a amostra pode ser considerada potencialmente não reativa para o uso em concretos e argamassas.

### **3.3 Misturas**

As misturas foram preparadas utilizando um misturador mecânico com capacidade de 5 litros como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Misturador mecânico



Fonte: Elaboração própria

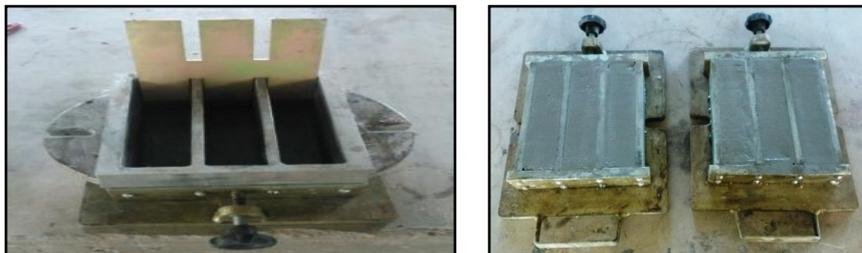
A mistura citada na Tabela 4 foi realizada utilizando os seguintes passos:

- misturar água e aglomerante durante 30 segundos no misturador em velocidade lenta;
- misturar os materiais finos em recipiente separado; no intervalo de 1 minuto, adicionar ao misturador e misturar em velocidade lenta 2 minutos;
- misturar em velocidade alta todos os materiais por 2 minutos;
- pausar misturador durante 30 segundos retirando o material retido nas paredes do misturador;
- misturar em velocidade alta por mais 2 minutos;

Após a produção da argamassa, a mesma foi utilizada para duas finalidades: resistência mecânica e reação álcali sílica.

Resistência mecânica: na Figura 14 é possível visualizar o molde metálico onde a argamassa foi introduzida; após a inserção no molde, a argamassa foi adensada em duas camadas com soquete manual, com 15 golpes distribuídos ao longo dos corpos de prova; após moldadas às amostras ficaram em cura ambiente até as idades de rompimento em 7, 28, e 56 dias.

Figura 14 - As amostras foram depositadas em uma fôrma metálica onde permaneceram em cura ambiente até a idade de rompimento



Fonte: Elaboração própria

Reação álcali-sílica: Depois de produzida a mistura, a argamassa foi depositada diretamente no molde metálico, como representado na Figura 15; após 24h de sua moldagem permaneceu em repouso, em cura ambiente, e foi colocada em cura submersa em solução, no banho termo regulador, onde passou pelo processo de análise da reação álcali-sílica.

Figura 15 - Fôrma utilizada para a moldagem das barras de argamassa



Fonte: Elaboração própria

### **3.4 Resistência Mecânica**

#### **3.4.1 Comportamento à Compressão**

A partir dos ensaios de compressão simples, realizados em corpos de prova prismáticos (40x40x160 mm), foi determinada a resistência mecânica em barras de argamassa, de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 5738:2003. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos de prova com 7, 28 e 56 dias de idade, a uma taxa de deformação axial

(velocidade do travessão) de 0,01 mm/min, onde se esperava resistência à compressão de pelo menos 35 MPa.

A movimentação do travessão e os dados de resistência foram registrados pelo programa da máquina de ensaios universais DL20000.

Figura 16 - Compressão simples: máquina de ensaios universais DL 20000



Fonte: Elaboração própria

### 3.4.2 Ensaio de flexão em três pontos e compressão simples

As análises de resistência mecânica foram realizadas com o auxílio da máquina de ensaios universais EMIC DL 20.000, com capacidade de carga de 200kN, utilizando a velocidade de ensaio de 0,1mm/min. Seguindo as prescrições da norma ABNR NBR 5739/2007, foram utilizados dois tipos de suporte, um para o ensaio de tração na flexão em 3 pontos e o outro para compressão simples demonstrados na Figura 17.

Figura 17 - Instrumentação do ensaio de tração na flexão em três pontos



Fonte: Elaboração própria

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, estão apresentados e analisados os resultados obtidos através dos ensaios de compressão simples, tração na flexão em três pontos e expansibilidade das barras de argamassa por meio da RAS, realizados em corpos de prova compostos por diferentes teores de substituição de sílica de casca de arroz em relação à massa de cimento Portland CII-Z. Para cada teste, foram ensaiados cinco corpos de prova de cada mistura.

### 4.1 Propriedades Mecânicas

#### 4.1.1 Resistência à Compressão

A fim de verificar as propriedades mecânicas do material, foram realizados ensaios para avaliação da resistência à compressão. A Tabela 5 apresenta as médias e os coeficientes de variação obtidos por compressão simples dos corpos de prova nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Tabela 5 - Resultados médios de resistência à compressão e coeficiente de variação

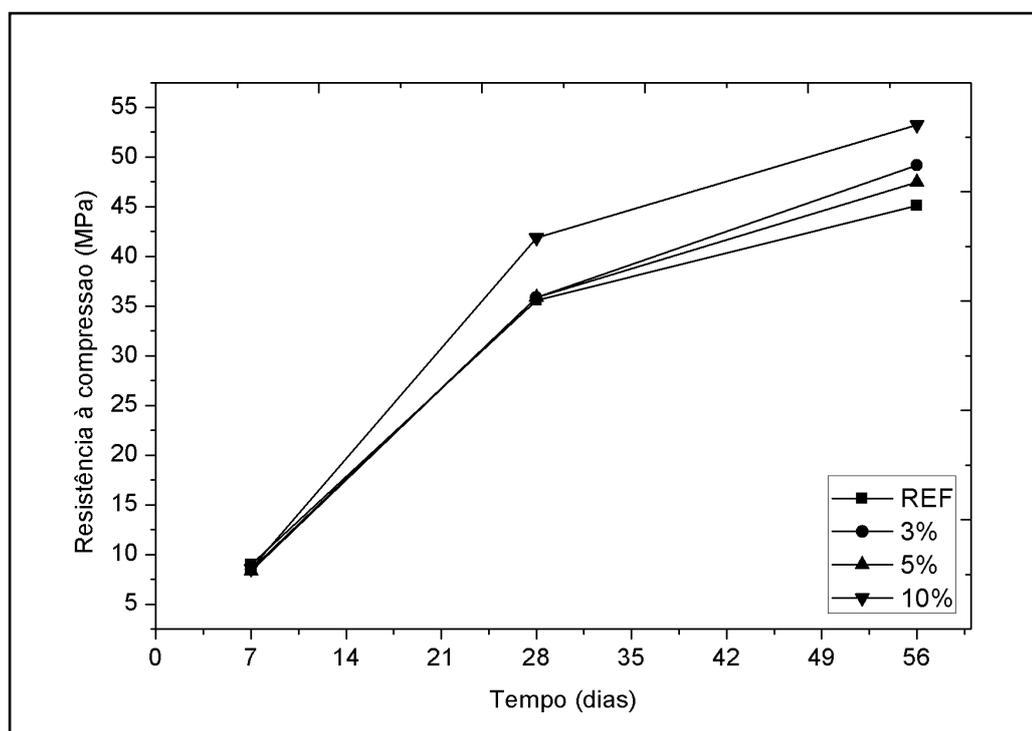
<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>						
<b>Mistura</b>	<b>7 dias</b>	<b>CV (%)</b>	<b>28 dias</b>	<b>CV (%)</b>	<b>56 dias</b>	<b>CV (%)</b>
Referência	8,97	9,79	35,60	8,28	46,08	6,36
3%	8,49	6,09	35,85	8,63	49,17	4,99
5%	8,33	9,36	35,85	8,63	47,44	8,13
10%	8,54	8,02	41,86	7,42	53,21	5,01

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 5 é possível observar que as amostras apresentaram um coeficiente de variação abaixo dos 10%, o que mostra consistência nos ensaios.

A Figura 18 mostra as curvas de resistência à compressão versus idade dos espécimes com 7, 28 e 56 dias de idade.

Figura 18 - Valores de resistência à compressão média das misturas



Fonte: Elaboração própria

Pode ser observado na Tabela 5 e na Figura 18, que a resistência aos 7 dias apresentou pouca variação, de 8,33 MPa a 8,97 MPa. No que tange à resistência aos 28 dias, às misturas referência, 3% e 5% apresentaram valores na ordem de 35,5 MPa. A mistura que apresentou maior resistência à compressão foi a contendo 10% de substituição, sendo essa de 41,86 MPa. Essa diferença de aproximadamente 17% da mistura de 10% em relação às outras, pode ser atribuída ao melhor empacotamento da mistura contendo 10% de SCA, visto que aos 28 dias ainda pode ser considerada uma idade jovem para a ocorrência efetiva da atividade pozolânica com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento.

Também é possível observar que aos 56 dias a resistência à compressão variou de 46,08 MPa a 53,21 MPa. Observa-se na Tabela 5 e na Figura 18, que a menor resistência à compressão, é da mistura de referência. O aumento da resistência à compressão das misturas com substituição nessa idade pode ser atribuída à atividade pozolânica da SCA, uma vez que se comparado com a idade de 28 dias (resistências praticamente iguais na idade

de 28 dias para as misturas referência, 3% e 5%), as misturas de 3 e 5% apresentam resistências maiores aos 56 dias comparados com a mistura de referência. Além disso, percebe-se que a mistura contendo 10% de substituição continua com a maior resistência, 53,21 MPa.

A atribuição da atividade pozolânica pode ser confirmada através do trabalho de Marangon (2013), que encontrou um índice de atividade pozolânica da SCA de 102%. Assim, multiplica-se o valor de resistência à compressão da mistura de referência (46,08 MPa) por 1,02 e encontra-se o valor do limite inferior da atividade pozolânica desse material igual a 47 MPa. Como todos os valores são acima desse valor conclui-se que o ganho de resistência à compressão foi devido à atividade pozolânica.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores das diferentes taxas de crescimento, quanto à resistência à compressão simples, entre os períodos de 7-28 e 28-56 dias.

Tabela 6 - Taxa de crescimento da resistência à compressão (%)

<b>Mistura\Tempo</b>	<b>7 a 28 dias</b>	<b>28 a 56 dias</b>
Referência	296	29
3%	322	37
5%	330	32
10%	390	27

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 6 mostra que o desenvolvimento da resistência à compressão mais significativa foi observado nos traços compostos por SCA, bem como o traço de 10% de substituição que apresentou a maior taxa de crescimento de 390% entre 7 e 28 dias. O traço de referência apresentou a menor taxa de crescimento dentre os traços analisados no mesmo período. Da mesma forma, com exceção das amostras contendo 10% de substituição, os corpos de prova compostos por SCA em sua mistura, com 56 dias de idade, atingiram uma taxa de crescimento de resistência à compressão superior do que as amostras de referência.

De acordo com trabalhos citados na literatura (HOEHR, 2011; MADANDOUST, 2012; MARANGON, 2013), os efeitos causados pela maior resistência à compressão das amostras compostas por SCA, apresentados na Figura 18, Tabela 5 e Tabela 6, podem ser atribuídos a:

- i. efeito de nucleação de vazios proporcionado pela SCA;
- ii. aceleração da hidratação do cimento;
- iii. reação pozolânica da SCA com hidróxido de cálcio.

Assim, acredita-se que esses mesmos efeitos foram proporcionados nas misturas deste estudo.

#### 4.1.2 Resistência à tração na flexão em três pontos

A fim de complementar a verificação de resistência mecânica do material foram realizados ensaios para avaliação da resistência à tração na flexão em três pontos. A Tabela 7 apresenta as médias de resistência à tração indireta nas misturas estudadas.

Tabela 7 - Resistência à tração na flexão em três pontos das misturas (MPa)

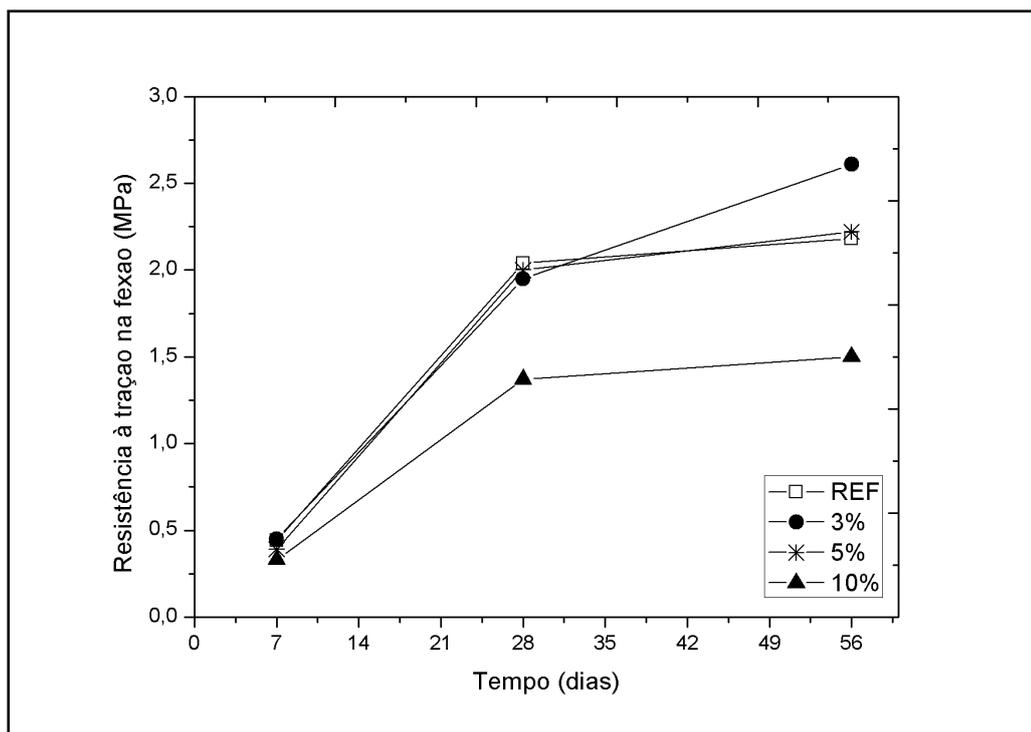
<b>Mistura / Idade</b>	<b>7 dias</b>	<b>Desv. Pad. (%)</b>	<b>28 dias</b>	<b>Desv. Pad. (%)</b>	<b>56 dias</b>	<b>Desv. Pad. (%)</b>
<b>REF</b>	0,44	0,03	2,04	0,26	2,18	0,18
<b>3%</b>	0,45	0,01	1,95	0,15	2,61	0,44
<b>5%</b>	0,39	0,04	2,00	0,13	2,22	0,23
<b>10%</b>	0,33	0,03	1,37	0,13	1,5	0,13

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 7 é possível observar que as amostras apresentaram um coeficiente de variação abaixo de 1%, o que mostra consistência nos ensaios.

A Figura 19 mostra as curvas de resistência à tração versus idade dos espécimes com 7, 28 e 56 dias de idade.

Figura 19 - Resistência à tração na flexão x idade



Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Tabela 7 e na Figura 19 que a resistência aos 7 dias de idade apresentou pouca variação, de 0,33 MPa a 0,45 MPa à tração indireta à flexão. No que tange a resistência aos 28 dias, às misturas referência, 3% e 5% apresentaram valores de resistência muito parecidos, na ordem de 2 MPa. Ao contrário do apresentado na resistência à compressão, a mistura com 10% de adição apresentou a menor eficiência, sendo esta de 1,37 MPa, e 48% menor que a mistura referência.

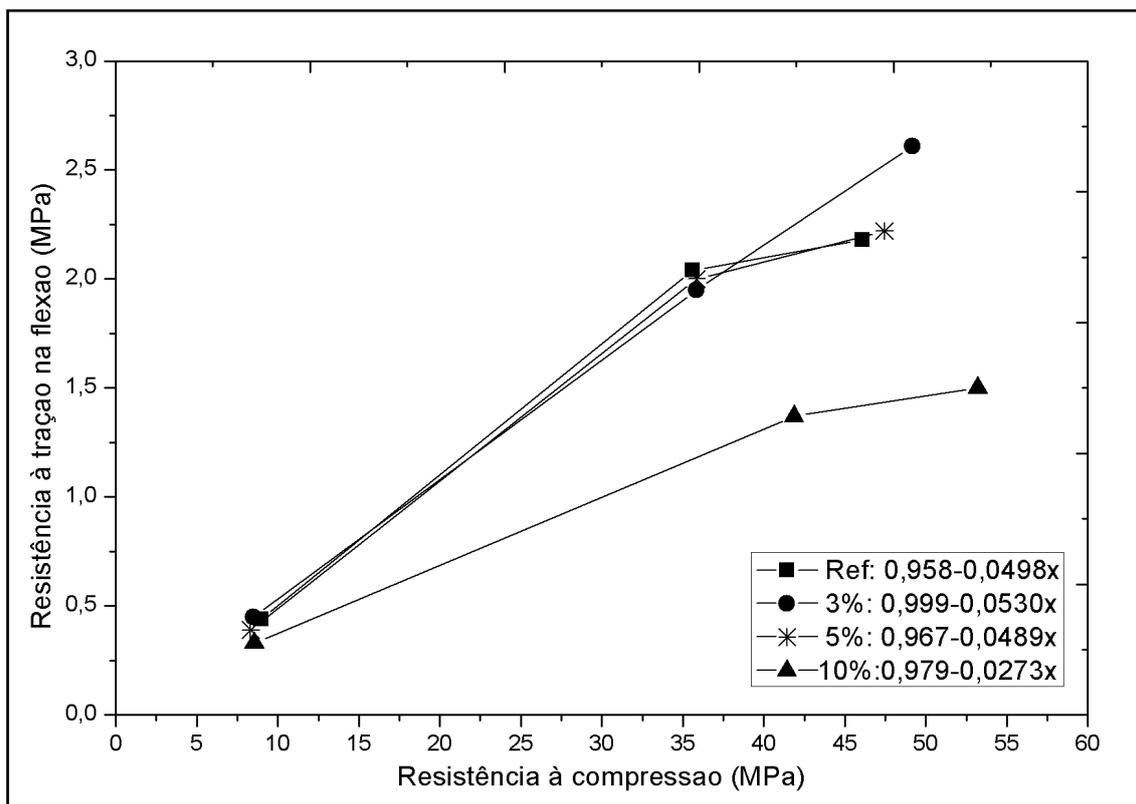
É possível observar que aos 56 dias a resistência à tração variou de 1,5 MPa a 2,61 MPa. As misturas de referência e 5% apresentaram valores muito próximos, na ordem de 2,2 MPa, enquanto que a de mistura com 3% atingiu o valor máximo de 2,61 MPa, sendo essa a maior resistência à tração na flexão obtida nessa idade.

### 4.1.3 Resistência à Tração na Flexão X Resistência à Compressão

Neste item são apresentadas as análises quanto à RAS.

Na Figura 20 é mostrada a correlação entre as resistências à tração na flexão em três pontos e compressão simples das amostras estudadas.

Figura 20 - Correlação entre as resistências



Fonte: Elaboração própria

Para a correlação entre a resistência à compressão e à tração em três pontos foi adotado um ajuste linear, onde é possível observar que a mistura contendo 3% de substituição apresenta a melhor correlação. No que tange as outras misturas, as correlações foram maiores do que 95%. Para a resistência à compressão característica de 35 MPa foram calculadas as resistências à tração na flexão, de acordo com o código modelo CEP-FIP (MEHTA, 1994) e para a NBR 6118/2014 pelas equações demonstradas na Tabela 8:

Tabela 8 - Fórmulas do modelo CEP-FIP (1990) e NBR 6118 (2014)

CEP-FIP	$f_{ctk,min} = 0,95 \times \left(\frac{f_{ck}}{f_{c0k}}\right)^{\frac{2}{3}} = 3,2$	$f_{ctk,max} = 1,85 \times \left(\frac{f_{ck}}{f_{c0k}}\right)^{\frac{2}{3}} = 3,88$
NBR 6118	$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 7,55$	

Fonte: Elaboração própria

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8, observa-se que todas as resistências à tração obtidas nos ensaios foram menores do que as descritas por norma.

Cabe ressaltar, que as equações utilizadas para comparação foram utilizadas apenas como comparativo, para melhor entendimento do comportamento do material.

## 4.2 Análise da expansibilidade

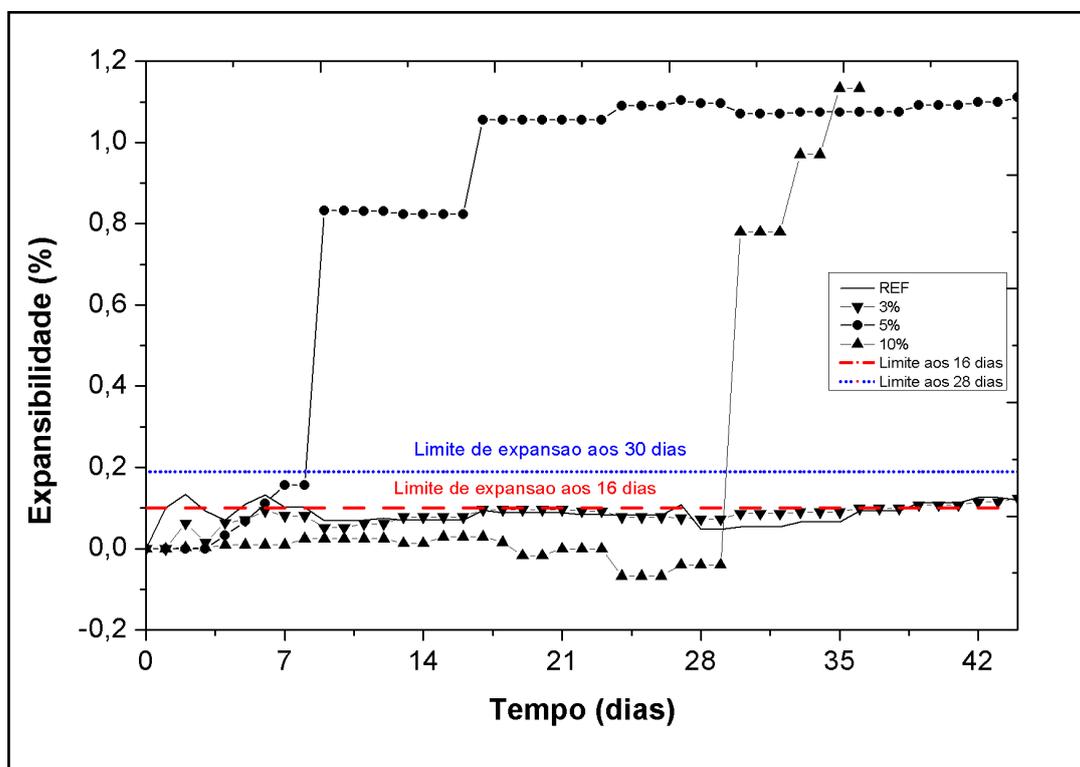
Neste tópico, é abordada a análise da expansão em barras de argamassa de acordo com a ABNT NBR 15577/4, onde foram moldados corpos de prova prismáticos, com diferentes teores de substituição parcial de SCA por cimento Portland, que são submetidos a um banho termo regulador com solução de NaOH, onde são verificadas as variações dimensionais do corpo de prova aos 16, 30 e 45 dias conforme o item 3.2 Materiais e Métodos.

### 4.2.1 Expansão das barras de argamassa com cimento Portland CII – Z

A Figura 21 ilustra comparativamente o comportamento expansivo médio das barras de argamassa ao longo do tempo das misturas de cimento Portland CII – Z e 3%, 5% e 10% de sílica de casca de arroz em substituição parcial ao cimento.

Cabe salientar que as amostras não sofreram choque térmico durante o ensaio.

Figura 21 - Expansão das barras de argamassa a partir do método acelerado (ABNT NBR 15577 4) das misturas estudadas



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados de expansão média (%) e os limites de expansão aos 16 e 30 dias propostos pela norma ABNT NBR 15577/2008.

Tabela 9 - Expansão das barras de argamassa aos 16, 30 e 45 dias e classificação da potencialidade reativa da sílica de casca de arroz nas misturas de cimento Portland CP II - Z

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	<b>Reativo</b>	1,0707	<b>Reativo</b>	1,1116
10%	0,0289	Inócuo	0,7800	<b>Reativo</b>	1,1338

Fonte: Elaboração própria

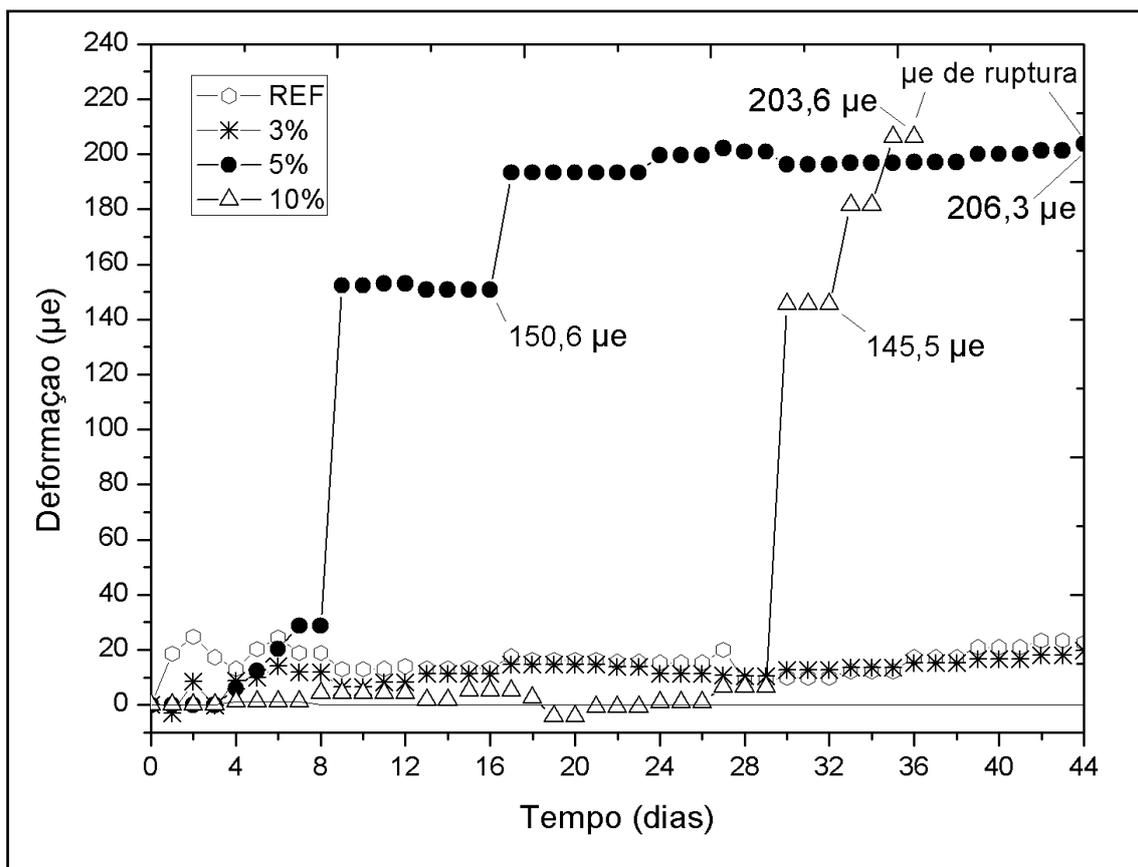
A partir dos resultados demonstrados na Figura 21 e na Tabela 9, é possível observar que os traços referência e o traço contendo 3% de substituição de sílica de casca de arroz apresentaram comportamento adequado frente ao ensaio acelerado em barras de argamassa, pois não atingiram o limite de expansão de 0,1% aos 16 dias e 0,19% aos 30 dias, recomendado pela norma ABNT NBR 15577:2008. Cabe salientar que, Munhoz (2007) utilizou o cimento CII-Z (o mesmo utilizado nessa pesquisa) para a investigação de agregados reativos, cujos resultados ressaltaram que apenas a utilização deste cimento não é suficiente para mitigar as reações expansivas, sejam elas causadas pela reação álcali-silicato ou álcali-sílica. Dessa forma, conclui-se que essa expansão é resultado exclusivo da SCA.

A mistura composta por cimento Portland CII-Z com substituição de 5% de sílica de casca de arroz (SCA) (Figura 21) se mostrou extremamente reativa, ultrapassando os limites de expansão estabelecidos pela norma ABNT NBR 15577:2008 com 7 dias de idade, e demonstrou evolução expansiva até o rompimento das barras, aos 45 dias de idade.

Embora tenha tido comportamento inócuo até aproximadamente 30 dias de idade, a mistura contendo 10% de substituição em massa de SCA por cimento Portland demonstrou ser reativa apresentando um acréscimo na expansibilidade, próximo a 0,8% da sua dimensão inicial, ou seja, quatro vezes acima do limite estabelecido pelo item 4 da norma de RAA.

Na Figura 22 é mostrado o gráfico com a deformação em  $\mu\epsilon$  X tempo em dias.

Figura 22 - Deformação x tempo



Fonte: Elaboração própria

No gráfico apresentado na Figura 22 é possível observar que as barras das misturas 5% e 10% romperam com deformação de aproximadamente 200  $\mu\epsilon$ . De acordo com Cordeiro (2006), a deformação de ruptura à tração de material cimentício à base de cimento Portland, varia de 100  $\mu\epsilon$  a 220  $\mu\epsilon$ , o que corroborou com a deformação de ruptura das amostras contendo 5% e 10% de substituição.

Nas imagens da Figura 23 é mostrada a aparência das amostras de cada mistura na idade de 35 dias.

Figura 23 - Estado aparente das amostras aos 35 dias de cura para amostra de referência e com porcentagens de 3% 5% e 10% de substituição.



**Referência**



**3% de adição**



**5% de adição**



**10% de adição**

Fonte: Elaboração própria

Percebe-se que na idade de 30 dias as amostras de referência e 3% não apresentam nenhum tipo de fissuração, enquanto as amostras de 5% e 10% apresentam-se em um estágio bem avançado de fissuração estando na iminência da ruptura, as quais apresentaram ruptura logo após.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos experimentos e análises realizadas no presente trabalho, pode-se concluir o seguinte:

Quanto à resistência mecânica:

- Aos 7 dias de cura a mistura de referência apresentou o maior valor médio de resistência à compressão simples (8,97 MPa) enquanto a mistura com 10% de substituição apresentou o melhor desempenho nas idades de 28 e 56 dias.
- No que tange a resistência à compressão aos 28 dias, às misturas referência, 3% e 5% apresentaram valores na ordem de 35 MPa, sendo que a mistura de 10% apresentou o maior valor (41,84 MPa). Aos 56 dias a resistência à compressão das misturas variou de 46,08 a 53,21 MPa, sendo essas misturas as de referência e à de 10%, respectivamente. Os valores de resistência à compressão máximos obtidos aos 56 dias de idade das misturas contendo SCA são atribuídas ao efeito de nucleação de vazios e à reação pozolânica da SCA com o hidróxido de cálcio produzidos pela hidratação do cimento.
- Para os ensaios de resistência à tração na flexão em três pontos, os valores de resistência variam de 1,37 a 2,04 MPa aos 28 dias.
- Na correlação entre as resistências de compressão e à tração na flexão obtiveram-se aproximações que variaram entre 95% e 99%. Aplicando-se as equações do modelo CEP e da NBR 6118 como comparação, para a obtenção da resistência à tração através da resistência à compressão característica de 35 MPa, percebe-se que todos os valores obtidos neste trabalho são menores que os calculados.

Quanto à análise da expansibilidade:

- Pelo método acelerado a 100°C em barras de argamassa baseado a norma ABNT NBR 15577, as misturas contendo 5% e 10% de substituição se mostraram expansivas.

- A mistura de referência e de 3% de substituição apresentaram expansões inferiores aos estabelecidos pela norma, sendo consideradas inócuas para as idades de 16 e 30 dias.

Por fim, conclui-se que houve expansão pelo uso da SCA com o cimento Portland CII-Z, para as misturas de 5% e 10%, as quais são consideradas potencialmente reativas, principalmente para a idade de 30 dias. A substituição de 3% não apresentou atividade reativa sendo considerada como inócuo, bem como a mistura de referência.

Cabe salientar que esses resultados podem ser considerados como indicativos de que a sílica de casca de arroz, em porcentagens maiores que 3% de substituição em massa, são potencialmente reativas, mas não podem ser conclusivas, sendo necessário mais ensaios para a melhor comprovação deste comportamento.

### **Sugestão para trabalhos futuros**

- Misturas binárias e ternárias
- Ensaio de microscopia eletrônica de varredura
- Ensaio de difração de raios – X.

## REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/products-page/autoconstrucao-e-reforma/maos-a-obra-pro-coletanea/#.V4UanvkrLIV>. Acesso em: 14 Fev, 2016.

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

ANDRADE, T. **Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na região metropolitana do Recife**. In: SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALIAGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2. 2006, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: IBRACON, 2007, 1 CD.

AKASAKI, J. L. et al. **Influência da adição de cinza de casca de arroz nos tempos de pega e retração por secagem**. UNESP, PPGE, 2005.

AMORIM, C. L. G., **Estudo do efeito das interações água-argila no inchamento de argilominerais através da difração de raios-x**. Tese (doutorado). Coordenação dos programas de Pós-Graduação em Engenharia-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1, **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1, **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1, **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 5: Determinação da mitigação da expansão de barras de argamassa pelo método acelerado**, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578. **Cimento Portland Composto**, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 3310-1. **Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**, Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**, Rio de Janeiro, 2015.

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

ASTM C 1260 – **Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)**, United States, 2007.

BICZOK, I. **Corrosion y proteccion del hormigon**. Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972. P. 275-280.

BOATENING, A. A., SKEETE, D. A. **Incineration of rice husk hull for use as a cementitious material: The Guyana experience**. Cement and Concrete Research. V. 20. 1990, Pergamon Press, Ltda.

BULLETIN 79 – **Alkali-aggregate reaction in concrete dams – review and recommendations**, Committee on Materials for Concrete Dams – CIGB/ICOLD. Paris: Imprimerie de Montligeon, 1991.

COOK, D, J. **Production of Cements based on rice husk ash. International Conference on Development Low-Cost and Energy saving Construction Materials and Applications**. Rio de Janeiro, July, 1984.

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

DELLA, V. P., HORTZA, D. **Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica**. Revista Química Nova. Vol 24, no 06.778-782, 2001.

DIAMOND, S. **Review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms. Alkalines in cements and in concrete pore solutions.** Cement and Concrete Research, v. 5, 1975.

FOLETTTO, E. L., et. al. **Aplicability of rice husk ash.** Química Nova, Vol. 28, No. 6, 1055-1060, 2005.

FURNAS, Equipe de Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e propriedades.** São Paulo: Walton Pacelli de Andrade/ PINI, 1997. Cap 17.

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.

GOMES, N. S. **Influência de ativadores químicos e de adições minerais no comportamento de concretos frente a cloretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. P., **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exudado.** Tese (Doutora em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

HOOBS, D. W. **Alkali-silica reaction in concrete.** London: Thomas Telford, 1988.

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

HOUSTON, D. F. **Rice Hulls. Rice Chemistry and Technology.** Am. ASS. Cereal Chem, Ins. St. Paul, Minesota, USA, 1972.

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Disponível em: <http://www.ibracon.com.br/ibracon/Portugues/detPublicacao.php?cod=51>. Acesso em: 5 Mar, 2016.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Sustentabilidade de concretos com altos teores de escória e cinzas volantes**. IBRACON Structures and Materials Journal, Vol. 2, Number 3 (September, 2009) p. 244-253. ISSN 1943-4195.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2009.

LIMA, M. A. **Emissão de gases do efeito estufa provenientes de sistemas agrícolas no Brasil**. Biotecnologia, Ciências & Desenvolvimento, Brasília, v. 3, n. 17, p. 38-43, 2000.

LEE, C. LIU, C. C. **An accelerated Concrete Prism Soaking Test for Evaluating The Alkali-Reactivity of Aggregates**. 12h International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, 2004.

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

MALHORTRA, V. M. MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cimentitious Materials, Advances in Concrete Technology**. Vol1, Gordon and Breach Publishers, Canadá, 1996.

MANTUANO NETTO, R., **Materiais pozolânicos**. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006.

MEHTA, P. K. **Concreto sustentável**. [Revista Técnica, 139]. São Paulo: PINI, Outubro de 2008.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo. PINI, 1994.

MEHTA, P. K., Rice Husk Ash. **A unique supplementary cementing material, advances in concrete technology**, Ottawa: Canmet, 1992.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Microestrutura, Propriedades e materiais**. 3<sup>o</sup> Ed. São Paulo. IBRACON, 2008.

MEIRA, L.R. **Propriedades mecânicas e retração do concreto com adição de cinza de casca de arroz natural, sem beneficiamento de moagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MENDES, G. G. SOARES, E. L. **Durabilidade de concretos com adição de sílica da casca de arroz obtida em leite fluidizado á penetração de íons cloretos**. 1<sup>o</sup> Congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis. Guimarães. Portugal. 2014.

MITCHEL, J. K. **Fundamentals of soil behaviour**. University of California, Berkeley. Ed. John Wiley & Sons, 1992.

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 Federal de São Paulo, (2007).

NAIR, D. G. FRAAIJ, A. KLAASEN, A. A. **A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes**. Cement and Concrete research, Elmsford.V.38, n 1, p. 861-869, 2008.

OLIVEIRA, I. R. STUART, A. R. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, SP, 1981.

PIRES, K. O., **Investigação do potencial reativo álcali-agregado residual. Um estudo de caso**. 2009. Dissertação (Engenharia Civil)- Programa de Pós Graduação em Construção Civil – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PREZZI, M. KURTIS, K. E. **Importância da química de superfície na reação álcali-agregado**. In: Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Goiânia. 1997.

POOLE, A. B. **Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete**. In: SWARMY, R. N. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. Glasgow/London: Blackie/New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

RIBEIRO, G. A. C., **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal-mecânicos**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia-PIPE, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2008.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do cimento. Disponível em: <http://snic.org.br/25set1024/index.asp>. Acesso em: 10 Abr, 2016.

SILVA, C. A. R., **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2004. Pg. 115, Dissertação (Mestrado em Engenharia) Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SILVA, E. J. et. al. **Avaliação da cinza de casca de arroz (sem sofrer moagem) quando adicionado ao concreto**. In: V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunicações Sustentáveis – ELECS, p. 39, 2009. Anais do Evento. Recife. 2009.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos**. Estudos do ataque por sulfatos. Dissertação (Mestrado). UFRGS, Brasil, 1996.

SNIC – **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento Portland**. <http://www.snic.org.br/pdfresultado/Resultados%20Preliminares%20Outubro%202015.pdf> acesso em 19/11/2015.

SOUZA, M. F. **Rice Hull-Derived Silica: Applications in Portland Cement and Mullite Whiskers**. Material Research. v.3 n.2. 2000.

TASHIMA, M. M., SILVA, C. A. R. L, AKASAKI, J. L. **Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada**. XXXI Jornada Sud-americana de IngenieríaEstructural, Mendonza , Argentina, 2004.

THOMAS, M.D.A. A utilização da cinza de casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos a base de cimento portland.

2007. Dissertação (Mestrado). Departamento de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos. São Paulo. 2007.

ZERBINO, R; GIACCIO, G; BATIC, O.R.; ISAIA, G. C. **Alkali-silicereaction in mortarsand concretes incorporating natural ricehuskash.** ConstructionandBuildingMaterials. N° 36, 796-806, 2012).

.

# ANEXO A

Gráficos de expansão dos corpos de prova por meio da RAS:

