



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA LUIZA DE ARAÚJO

**ATAQUE POR SULFATO EM ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM CINZA  
DE CASCA DE ARROZ E AGREGADO ORIUNDO DA SCHEELITA**

ANGICOS

2019

ANA LUIZA DE ARAÚJO

**ATAQUE POR SULFATO EM ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM CINZA  
DE CASCA DE ARROZ E AGREGADO ORIUNDO DA SCHEELITA**

Trabalho Final de Graduação apresentado a  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
como um requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sâmea Valensca Alves  
Barros

ANGICOS

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A658a ARAUJO, ANA LUIZA DE.  
ATAQUE POR SULFATO EM ARGAMASSAS  
CONFECCIONADAS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E  
AGREGADO ORIUNDO DA SCHEELITA / ANA LUIZA DE  
ARAUJO. - 2019.  
36 f. : il.

Orientadora: SÂMEA VALENSCA ALVES BARROS.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,  
2019.

1. ADIÇÕES MINERAIS. 2. MATERIAL POZOLÂNICO. 3.  
DURABILIDADE. I. BARROS, SÂMEA VALENSCA ALVES,  
orient. II. Título.

ANA LUIZA DE ARAÚJO

**ATAQUE POR SULFATO EM ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM CINZA  
DE CASCA DE ARROZ E AGREGADO ORIUNDO DA SCHEELITA**

Trabalho Final de Graduação apresentado a  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
como um requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 14 / 08 / 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

Sâmeca Valensca Alves Barros

Sâmeca Valensca Alves Barros, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente

Ilana Maria da Silva Barros

Ilana Maria da Silva Barros, Eng. civil. Me. (UFERSA)  
Membro Examinador

Gerbeson Carlos Batista Dantas

Gerbeson Carlos Batista Dantas, Eng. Civil. (UFERSA)  
Membro Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por estar comigo em todos os momentos que passei durante esses anos na UFRSA-Angicos, por ter me ajudado e me dado forças quando pensei que não iria conseguir. "Este Deus faz tudo perfeito e cumpre o que promete. Ele é como um escudo para os que procuram a Sua proteção." (Salmos 18:30).

Aos meus pais, que diante as dificuldades não mediram esforços para me dar a melhor educação, e sempre me incentivarem a estudar mais. Obrigada por todo amor e paciência para comigo diante dos meus estresses nessa reta final de curso. Obrigada por serem o meu alicerce!

A minha orientadora, a professora Sâmea Valensca Alves Barros, pelo incentivo e paciência para comigo. Por me entender diante das dificuldades que enfrentei. Por me provar, mais uma vez, que tenho com quem contar dentro da universidade. Obrigada por ter acreditado que seria possível a realização deste trabalho!

Ao técnico de laboratório de construção civil do IFRN- Campus Mossoró, Valteson da Silva, pela contribuição concedida na realização dos ensaios realizados no laboratório mencionado e pela disponibilidade de tirar todas as dúvidas que surgiram.

À técnica de laboratório de engenharia civil da UFRSA Angicos, Ádna Érica Melo de Sousa, por se disponibilizar em contribuir pacientemente durante todos os procedimentos realizados, mesmo quando necessário repeti-los ou ainda passar do horário de expediente. Muito obrigada!

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFRSA, a todo o seu corpo docente, direção e administração, que fizeram com que esse momento se tornasse real;

A todos os professores da UFRSA - Campus Angicos que deram sua contribuição para o meu conhecimento. Em especial aqueles que mais que professores, tornaram-se amigos, Kleber Cavalcante, Edcarlos Alves, Klaus André, Bruna Lima, Maria Creuza.

A minha prima Ingrid Luana e minha amiga Thalita Felício, que foram verdadeiros pilares nesses últimos meses de curso, me sustentando, aconselhando, intercedendo e incentivando quando as coisas apertaram.

Aos amigos-anjos que ganhei junto com a universidade e que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui. Em especial, Jéssica Lacerda, Paulo Moraes, Kenned Rossino, Andriele Barros, Maria Bruna, Bruna Luadna, Matheus Silva, Katyellen. Obrigada por me ajudarem seja com as disciplinas, seja com um incentivo nos finais de período.

Aos meus queridos e amados amigos da vida, pelo carinho e incentivo sempre que estava desanimada, e por me entenderem quando não podia sair nos fins de semana porque tinha que ficar em casa estudando.

Aos engenheiros civis Ilana Maria da Silva Barros e Gerbeson Carlos Batista Dantas que se dispuseram a contribuir com o presente trabalho. Muito obrigada!

## RESUMO

O Brasil é um grande produtor de arroz e o beneficiamento desse cereal gera uma grande quantidade de resíduos que não tem uma destinação certa e acabam gerando grandes impactos ambientais negativos. Somado a isso, o país é território da maior mina de extração do mineral scheelita, e o resíduo resultante do processo de extração também não tem uma destinação certa, e é disposto a céu aberto. É tentando resolver esse problema que diversas áreas têm reaproveitado ambos resíduos como subprodutos, buscando melhorias nos produtos finais. Diante disso, este trabalho objetiva estudar o ataque por sulfatos em argamassa confeccionada com o agregado oriundo do resíduo Scheelita, em substituição total do agregado convencional, e com cinza da casca de arroz calcinada a 800°C, em substituição parcial do cimento. Para isso foi feito verificado a expansão de corpos de prova de argamassa através dos procedimentos estabelecidos pela norma da ABNT NBR 13583 (2014) com as devidas adaptações necessárias ao desenvolvimento dessa pesquisa, e verificou-se ainda a resistência à compressão simples. Os resultados indicaram que as substituições adotadas não foram suficientes para mitigar o ataque por sulfato, pois a expansão das barras de argamassa ultrapassou o limite estabelecido pela norma da ASTM C 452 (2002). Apesar das expansões terem demonstrado o ataque por sulfato de sódio nas argamassas estudadas, o ensaio de resistência à compressão simples mostrou que não houve degradação das barras no que refere à perda mecânica da resistência.

**Palavras-chave:** Adições minerais. Material pozolânico. Durabilidade.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Pilhas de rejeito da mina Brejuí.....                                                                                           | 15 |
| <b>Figura 2</b> - Relógio comparador.....                                                                                                         | 25 |
| <b>Figura 3</b> - Curva granulométrica da AS. ....                                                                                                | 27 |
| <b>Figura 4</b> - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio - 15% de substituição de cimento por CCA..... | 29 |
| <b>Figura 5</b> - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio - 25% de substituição de cimento por CCA..... | 30 |

## LISTA DE TABELAS

|          |   |                                                                                    |    |
|----------|---|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – | Propriedades físicas da Areia de scheelita .....                                   | 26 |
| Tabela 2 | – | Composição química da AS .....                                                     | 27 |
| Tabela 3 | – | Composição química da CCA calcinada a 800°C .....                                  | 28 |
| Tabela 4 | – | Valores de resistência à compressão simples dos CP's após ataque por sulfato ..... | 31 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                                                                              |                                            |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| ABNT                                                                         | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| AFm                                                                          | Monossulfoaluminato de cálcio hidratado    |
| AS                                                                           | Areia de Scheelita                         |
| ASTM                                                                         | American Society for Testing and Materials |
| CaO                                                                          | Óxido de cálcio                            |
| Ca(OH) <sub>2</sub>                                                          | Hidróxido de cálcio                        |
| CaSiO <sub>3</sub> .CaCO <sub>3</sub> .CaSO <sub>4</sub> .15H <sub>2</sub> O | Taumasita                                  |
| C <sub>3</sub> A                                                             | Aluminato Tricálcico                       |
| CCA                                                                          | Cinza da casca de arroz (CCA)              |
| C-S-H                                                                        | Silicato de cálcio hidratado               |
| CP's                                                                         | Corpos de Prova                            |
| EDX                                                                          | Espectrometria de Fluorescência de Raios X |
| FRX                                                                          | Fluorescência de Raios X                   |
| RCS                                                                          | Resistência à Compressão Simples           |
| SiO <sub>2</sub>                                                             | Dióxido de silício                         |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                                                | Íons sulfato                               |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                 | <b>13</b> |
| <b>1.1 Objetivos .....</b>                                                                                                                | <b>14</b> |
| 1.1.1 Objetivo geral.....                                                                                                                 | 14        |
| 1.1.2 Objetivos específicos .....                                                                                                         | 14        |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                                                                                        | <b>15</b> |
| <b>2.1 Scheelita .....</b>                                                                                                                | <b>15</b> |
| <b>2.2 Ataques por sulfatos em argamassas .....</b>                                                                                       | <b>16</b> |
| 2.2.1 Ataque por sulfato associado com etringita e/ou a formação de gipsita (gesso) ...                                                   | 18        |
| 2.2.2 Pelo ataque sulfato físico associado com a cristalização de sais contendo sulfato em ou perto de uma superfície de evaporação ..... | 18        |
| 2.2.3 Formação de etringita retardada.....                                                                                                | 19        |
| 2.2.4 Formação de taumasita.....                                                                                                          | 19        |
| <b>2.3 Agentes mitigadores do ataque .....</b>                                                                                            | <b>19</b> |
| <b>2.4 Cinza da Casca de Arroz .....</b>                                                                                                  | <b>21</b> |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                                                                        | <b>23</b> |
| <b>3.1 Materiais .....</b>                                                                                                                | <b>23</b> |
| 3.1.1 Materiais Convencionais .....                                                                                                       | 23        |
| 3.1.2 Materiais Alternativos .....                                                                                                        | 23        |
| <b>3.2 Métodos .....</b>                                                                                                                  | <b>23</b> |
| 3.2.1 Caracterização física do resíduo de scheelita (AS) .....                                                                            | 23        |
| 3.2.2 Beneficiamento da cinza de casca de arroz (CCA).....                                                                                | 23        |
| 3.2.3 Caracterização química da cinza da casca de arroz .....                                                                             | 24        |
| 3.2.4 Preparação das Argamassas .....                                                                                                     | 24        |
| 3.2.5 Determinação da variação dimensional de barras de argamassas de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio .....       | 24        |
| 3.2.6 Determinação da resistência à compressão simples (RCS) .....                                                                        | 25        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                                                                                    | <b>26</b> |
| <b>4.1 Caracterização física e química da areia de Scheelita .....</b>                                                                    | <b>26</b> |
| <b>4.2 Caracterização química da cinza da casca de arroz calcinada a 800°C .....</b>                                                      | <b>27</b> |
| <b>4.3 Variação dimensional das barras de argamassas confeccionadas com AS e CCA calcinada a 800° C.....</b>                              | <b>29</b> |

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4 RCS das argamassas confeccionadas com AS e CCA a temperatura de 800, após serem submetidas ao ataque por sulfato de sódio ao longo dos 42d ..... | 30 |
| 5 CONCLUSÕES.....                                                                                                                                    | 32 |
| REFERÊNCIAS .....                                                                                                                                    | 33 |

## 1 INTRODUÇÃO

O arroz está entre os cereais mais consumidos e produzidos do mundo. Segundo a Embrapa Arroz e Feijão (2016) o Brasil é um grande produtor desse cereal e essa produção só cresce nos últimos anos, contudo, apesar de ser algo positivo, esse fator fomenta alguns desafios no que diz respeito à destinação da grande quantidade de resíduos gerados durante o beneficiamento do arroz. Pensando no meio ambiente diversas áreas têm reaproveitado esses resíduos como subprodutos, incluindo o mercado da construção civil, que têm os incorporado em concretos e argamassas como adições minerais.

Outro desafio, que atinge a construção civil, é a presença de sulfatos solúveis, principalmente os de sódio, cálcio e magnésio, que são comuns em áreas de operação de minas e indústrias químicas. Sódio e cálcio são os sulfatos mais comuns nos solos, águas e processos industriais. Sulfatos de magnésio são mais raros, porém mais destrutivos. Todos os sulfatos são potencialmente danosos aos materiais cimentícios, reagindo com a pasta de cimento hidratado, a este feito dá-se o nome de “ataque por sulfatos”. (LAPA, 2008).

Para que os materiais de base cimentícia possam resistir ao ataque por sulfatos é preciso melhorar as suas características técnicas. Isso é possível através da incorporação de adições minerais em substituição parcial ao cimento, uma vez que essa incorporação pode resultar em melhores propriedades da matriz cimentícia, e dependendo das características do material adicionado pode contribuir pra mitigar as reações de sulfato.

A cinza da casca de arroz (CCA) é proveniente da queima da casca do arroz, e em função de suas características é considerada uma pozolana artificial, logo pode ser utilizada como uma adição mineral na mistura de argamassas a fim de conseguir um produto final capaz de mitigar o ataque por sulfatos.

A pozolanicidade das CCA pode ser melhorada através da queima controlada da casca de arroz em laboratório, surgindo então a necessidade de avaliar a utilização da CCA calcinada à temperatura de 800°C em substituição parcial ao cimento na confecção de argamassas alternativas (Scheelita em substituição total do agregado miúdo).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Verificar o ataque por sulfatos em argamassas confeccionadas com resíduo oriundo da mineração de scheelita, em substituição total do agregado convencional, e com cinza da casca de arroz calcinada a 800°C, em substituição parcial do cimento.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização química da cinza da casca de arroz calcinada a 800°C.
- Realizar a caracterização física e química da areia de Scheelita.
- Promover o ataque ao sulfato das argamassas confeccionadas com agregado artificial oriundo do resíduo Scheelita e substituição parcial do cimento pela cinza da casca de arroz calcinada a 800°C.
- Determinar a resistência à compressão simples das argamassas confeccionada com o Agregado artificial oriundo do resíduo Scheelita após ataque por sulfato.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Scheelita

O mineral scheelita pertence à classe dos tungstatos e especificamente é um tungstato de cálcio com composição:  $\text{CaWO}_4$  (LINHARES, 2014). Machado (2012) classifica a Scheelita como um mineral metálico não ferroso, por não apresentar ferro em sua composição. Destaca, ainda, que possui alta densidade, ponto de fusão superior a  $4.500^\circ\text{C}$ , boa condutividade elétrica, e que pode ser encontrada em quatro cores: branca, amarela, verde e marrom.

A maior mina de scheelita subterrânea da América do Sul é a Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos/RN. Os minérios de scheelita são facilmente identificados com a utilização de emissores de radiação ultravioleta (mineralights), uma vez que a scheelita possui propriedades de fotoluminescência (FERNANDES, 2011).

A produção atual da mina corresponde a 20 toneladas mensais, sendo que para cada tonelada de minério extraído se tem 250 kg de concentrado de scheelita e 750 kg de rejeito mineral, que por não ter uma destinação certa, é descartado a céu aberto (MACHADO, 2012).

A grande quantidade de resíduos da mineração de scheelita, gerada pela Mina Brejuí, e sua inadequada destinação no terraço da própria empresa, como mostra a Figura 1, vem causando um impacto ambiental negativo. Com o intuito de mitigar os danos causados pela grande quantidade de rejeito jogado em local indevido, há a necessidade de se buscar alternativas para o aproveitamento sustentável do rejeito gerado na exploração da scheelita. E uma dessas alternativas seria sua aplicação no setor da construção civil (ALVES, 2016).

**Figura 1** - Pilhas de AS da mina Brejuí.



FONTE: FERNANDES (2011).

Durante o processo de extração do minério, ocorre poluição visual, poluição sonora, poluição do ar, solo, águas superficiais e subterrâneas, assoreamento e erosão, afugentamento da fauna e perda da flora (BATISTA et al., 2018).

Estudos já vêm sendo realizados para reaproveitamento do resíduo da scheelita na construção civil. Machado (2012) estudou a incorporação do resíduo scheelita em cerâmica caulina, Paiva (2013) estudou a viabilidade do uso do resíduo da concentração da scheelita incorporada ao concreto de cimento Portland como substituto parcial do agregado miúdo, citado como areia natural. Já França Neta (2018) analisou o ataque por sulfato de sódio em argamassas confeccionadas com resíduos da mineração de Scheelita em substituição total ao agregado convencional (areia).

## **2.2 Ataques por sulfatos em argamassas**

Os materiais de base cimentícia são passíveis à ação destrutiva de meios aquosos contendo sulfatos, e esta ação danosa é chamada de “ataque por sulfatos”. Segundo os vários estudos sobre o assunto que vêm sendo realizados há mais de um século, a maior parte está associado à interação dos íons sulfatos com pasta de cimento hidratada (SOUZA, 2006).

Todos os sulfatos são potencialmente danosos à matriz cimentícia quando reagem com a pasta de cimento hidratado, embora os sulfatos de magnésio sejam os mais destrutivos (LAPA, 2008). Estes sulfatos estão presentes na natureza e podem ser encontrados na água dos rios, em lençóis freáticos, água de pântanos e decomposição de matéria orgânica, além de ambientes poluídos como esgotos, áreas de operação de minas e indústrias químicas, ou ainda no próprio agregado constituinte do concreto ou argamassa. As manifestações patológicas que os materiais cimentícios, podem sofrer devido ao ataque por sulfatos incluem perda de resistência, expansão, lascamento das camadas superficiais e desintegração (SOUZA, 2006).

O ataque por sulfatos é um dos mais agressivos danos que afetam a durabilidade dos materiais cimentícios em longo prazo, ocorre através de reações químicas entre os compostos hidratados do cimento e íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Estas reações, num primeiro momento, podem aumentar ligeiramente a resistência, como reflexo da densificação da microestrutura, mas posteriormente, ocorre a redução da coesão e conseqüentemente uma perda progressiva de resistência, rigidez e massa (SILVEIRA, 1996).

Para Costa (2004), o ataque por sulfato pode produzir etringita, quando reage com os produtos de hidratação da alumina e/ou aluminato tricálcico não hidratado, e gesso (gipsita) quando reage com o hidróxido de cálcio. O autor afirma ainda que no concreto endurecido, a

formação da etringita resultante do ataque de sulfato nem sempre leva à expansão, que em virtude da baixa resistência à tração do concreto, a formação de etringita, pode levar à fissuração e consequente redução da resistência e desempenho da peça, como afirmado anteriormente por Silveira (1996).

Segundo Collepardi (2003), o tipo de cimento, o tipo e concentração do sulfato, a qualidade da matriz cimentícia e as condições de exposição podem influenciar no ataque por sulfatos. O autor classifica ainda o ataque em dois tipos em função da origem da fonte destes nos materiais cimentícios e consequentemente o processo de deterioração: por sulfatos de origem externa e de origem interna.

Na deterioração por sulfatos de origem externa, os sulfatos têm origem no meio ambiente, como solos contaminados por sulfato ou exposição a águas agressivas contendo sulfato, e reagem com os produtos de hidratação do cimento, gerando reações expansivas. Já na deterioração por sulfatos de origem interna não há penetração de sulfatos do meio ambiente, estes têm origem intrínseca à matriz cimentícia, isto é a deterioração se dá por contaminação ou adição excessiva de sulfatos aos materiais constituintes, também por sulfatos provenientes da clínquerização com combustíveis alternativos ricos em enxofre (COLLEPARDI, 2003; SCHMALZ, 2018).

A degradação do material cimentício em consequência de reações químicas entre o concreto ou argamassa de cimento Portland e íons de sulfato de uma fonte externa, pode se manifestar de duas formas distintas: pela expansão da matriz cimentícia e/ou pela perda progressiva de resistência e perda de massa. Quando ocorre a expansão, essa provoca fissuras e consequentemente aumenta a permeabilidade e a fragilidade para a penetração de águas agressivas (LAPA, 2008).

Geralmente a agressão se inicia pelos cantos e arestas, se espalha superficialmente e por fim vai penetrando progressivamente na peça. Durante este processo ocorre, em geral, uma perda da rigidez e da resistência da matriz cimentícia (SILVA FILHO, 1994).

Para Brown (2002), os sulfatos também podem ser de origem tanto externa como interna e seus ataques em materiais cimentícios podem se manifestar de várias formas: a forma clássica do ataque por sulfato associado com etringita e/ou a formação de gipsita (gesso); pelo ataque sulfato físico associado com a cristalização de sais contendo sulfato em ou perto de uma superfície de evaporação; pela formação de etringita retardada; e através da formação de taumasita.

Hoppe Filho et al. (2015) especificam essa manifestação, que se dá pela presença de íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) provenientes do meio externo e que adentram na estrutura da matriz

cimentícia através dos poros da matriz hidratada, resultando numa reação com o hidróxido de cálcio (portlandita), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e com o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm), formando gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado), etringita secundária tardia e, a taumasita ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ).

#### 2.2.1 Ataque por sulfato associado com etringita e/ou a formação de gipsita (gesso)

Os primeiros produtos da reação química entre o sulfato e os produtos hidratados são a gipsita e a etringita. Estes compostos formam-se nas regiões próximas da superfície e propagam-se na matriz cimentícia, e demais materiais de base cimentícia, através da rede de poros dos mesmos. Dentro da pasta de cimento hidratada, os sulfatos reagem com cálcio para formar gipsita e com as fontes de cálcio e alumínio para formar etringita, que por serem expansivos, inferem tensões internas à pasta de cimento hidratada, que geram expansão e fissuração (SOUZA, 2006).

Segundo Al-Akhras (2006), o gesso e a etringita formados como resultado do ataque de sulfato são significativamente mais volumosos (1,2 a 2,2 vezes) do que os reagentes iniciais, por isso levam à expansão, rachaduras, deterioração e ruptura de estruturas de concreto.

#### 2.2.2 Pelo ataque sulfato físico associado com a cristalização de sais contendo sulfato em ou perto de uma superfície de evaporação

A expansão provinda da cristalização de sais (normalmente sulfato de sódio, carbonato de sódio e sulfato de magnésio) é também conhecida como “ataque por ação física”, uma vez que não está relacionada a reações químicas entre os sulfatos e os compostos da pasta de cimento hidratado (SOUZA, 2006).

Concentrações de  $\text{SO}_4^{2-}$ , em meio aquoso, penetram no interior da estrutura cimentícia por capilaridade, permeabilidade ou difusão. Todavia, devido à evaporação da água se dar de forma lenta estas concentrações podem ficar muito elevadas, formando assim, os cristais (SOUZA, 2016).

Souza (2006) afirma que com a cristalização, os sais de sulfato passam a ocupar um volume maior do que quando estavam dissolvidos no meio aquoso, causando expansão e degradação do material cimentício.

### 2.2.3 Formação de etringita retardada

A formação da etringita tardia ocorre quando a fonte de íons sulfatos é interna. Ocorre quando é usado na produção do concreto ou argamassa um agregado contaminado com gipsita ou cimento contendo teores elevados de sulfato. Em casos de formação de etringita tardia, foi constatado que seus elementos haviam sido curados a vapor (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam ainda que até 65°C a etringita é uma fase estável, mas se a temperatura da cura térmica a vapor for superior a 65°C, a etringita decompõe-se para formar monossulfato hidratado. Neville (2016) reitera que caso a temperatura no interior do material cimentício atinja de 70 a 80°C, a lenta formação de etringita pode levar à fissuração e expansão.

### 2.2.4 Formação de taumasita

O ataque por sulfato com formação de taumasita ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ) ocorre em concretos enterrados e a baixas temperaturas (inferior a 15°C), onde na presença de sulfatos, carbonatos e água, o C-S-H pode se converter em taumasita. A formação da taumasita causa degradação progressiva da superfície da matriz cimentícia, transformando a pasta de cimento endurecida em uma massa não coesa (NEVILLE, 2016).

## 2.3 Agentes mitigadores do ataque

Os fatores que influenciam o ataque por sulfato podem ser evitados ou controlados, visto que estes podem ser resumidos em fatores externos e fatores que dependem de especificações construtivas como: a quantidade e natureza do sulfato presente, o nível da água e sua variação sazonal, o fluxo da água subterrânea e a porosidade do solo, a forma de construção e a qualidade da matriz cimentícia (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Na prática, é possível notar que inúmeras obras de infraestrutura são expostas a ambientes altamente agressivos e por isso, apresentam degradação precoce, remetendo a falhas de especificação prévia que garantam adequada funcionalidade e durabilidade (Hoppe Filho et al., 2015). Quando não se pode impedir a água com sulfato de atingir a matriz cimentícia, como em casos onde a estrutura de concreto está submersa no mar, a única defesa contra o ataque por sulfato é o controle da qualidade do concreto, objetivando aumentar a durabilidade deste (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Para evitar ou amenizar o problema da agressão por sulfatos, devem ser empregadas medidas que produzam efeitos sobre os parâmetros que governam o processo. Desde ações que levem a redução da agressividade do ambiente, como também a modificação das características do material cimentício para torná-lo menos suscetível à degradação, sendo que neste caso as principais medidas poderiam ser a utilização de um cimento com baixos teores de Aluminato Tricálcico ( $C_3A$ ) ou a incorporação de adições ao cimento Portland (SILVA FILHO, 1994).

De acordo com Emmos (1993), citado por Lapa (2008), algumas medidas que podem ser adotadas para aumentar a resistência e, por conseguinte, a durabilidade da matriz cimentícia contra o ataque de sulfatos, são: a redução do fator a/c, o uso de cimento resistente a sulfatos, utilização de um baixo teor de aluminato tricálcico, e a introdução de adições minerais em proporções adequadas na matriz cimentícia. Mehta e Monteiro (2014) reafirmam tais medidas como fatores que contribuem para a baixa permeabilidade da matriz cimentícia, e assim para a mitigação dos efeitos deletérios dos sulfatos na mesma.

Meira (2009) afirma que, quando misturadas a concretos e argamassas, as adições minerais melhoram a sua durabilidade e resistência mecânica. Segundo Fonseca (2010), as adições modificam a estrutura interna da matriz cimentícia quando ainda no estado fresco, e propiciam diversos benefícios que aumentam a durabilidade e resistência desta no estado endurecido, como: redução na porosidade capilar, diminuição das fissuras de origem térmica, melhoria na resistência a ataque por sulfatos, melhoria na resistência à reação álcali-sílica, entre outros.

Fonseca (2010) afirma ainda que o uso de adições minerais, tanto ao cimento quanto ao concreto, é uma prática comum em várias partes do mundo, como nos Estados Unidos e em países da Europa, por exemplo, onde já existem normas internacionais que consideram o uso de adições minerais, especificando com muita propriedade e qualidade, as condições que cada uma das adições deve apresentar para serem utilizadas na produção de concreto.

Uma adição mineral que é utilizada desde os primórdios pelos gregos e romanos é o material pozolânico, por apresentar um bom desempenho mecânico e ainda possibilitar redução nos custos. Hoje as pozolanas ressurgem como uma alternativa viável a ser usada na construção civil (SOUZA, 2008).

A NBR 12653 define os materiais pozolânicos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. A norma ainda

os classifica em pozolanas naturais e artificiais, de acordo com a sua origem. A denominação materiais naturais refere-se a todos os materiais pozolânicos derivados de rochas ou minerais vulcânicos (com exceção das terras diatomáceas) que passam por processos de britagem, moagem e classificação. E as pozolanas artificiais são subprodutos de resíduos agrícolas e industriais que podem ou não sofrer algum tipo de processamento (cinza volante, sílica ativa, escória granulada de alto-forno, cinza da casca de arroz) (SILVA, 2004).

Segundo Netto (2006), as adições de pozolanas oferecem diversos benefícios às propriedades da matriz cimentícia, melhorando tanto a reologia (sua deformabilidade em função do tempo) no estado fresco, quanto o comportamento mecânico e a durabilidade no estado endurecido. Santos (2006) reitera essa afirmação e ainda aponta algumas melhorias do uso de material pozolânico frente ao ataque por sulfatos: (1) ao substituir parte do cimento por pozolana, reduz-se a quantidade de  $C_3A$  disponível para a reação; (2) como a reação pozolânica consome  $Ca(OH)_2$ , a quantidade deste fica bastante reduzida na pasta de cimento hidratada; (3) a formação do C-S-H oriundo da reação pozolânica tem menor relação  $CaO/SiO_2$  e (4) reduz, consideravelmente, a permeabilidade do concreto, dificultando o ingresso dos sulfatos. Poderia adicionar ainda outra melhoria, que é o fato de a reação pozolânica ocorrer de forma mais rápida que a reação de sulfatos.

## **2.4 Cinza da Casca de Arroz**

O Brasil é um grande produtor de arroz e segundo Souza et al. (2014), devido o alto poder calorífico da casca deste cereal, esta já é amplamente empregada como fonte de energia. Porém o resultado desse processo gera uma grande quantidade de cinzas. O autor alega que após a queima completa, cerca de 20% da casca de arroz é convertida em cinza que é comumente descartada de forma ambientalmente inadequada, gerando problemas ambientais como poluição do solo e contaminação de mananciais de água.

A cinza de casca de arroz constitui-se em um dos resíduos agroindustriais de maior produção no mundo. A realização de pesquisas sobre a utilização CCA tem como principal finalidade amenizar o impacto ambiental negativo gerado por seu descarte no meio ambiente, pois seu aproveitamento como material pozolânico na construção civil impede sua disposição em forma de aterro, que seria um fator gerador de poluição do solo, do ar e de rios e córregos (FONSECA, 2010; POUEY, 2006).

A CCA é um subproduto oriundo da combustão da casca de arroz que, quando moída finamente, adquire propriedades pozolânicas, reagindo com o hidróxido de cálcio liberado

durante a hidratação do cimento para formar compostos cimentantes semelhantes àqueles da hidratação do cimento (SOUZA, 2008). Diante disso, pode-se afirmar que a CCA é um material que pode ser utilizado como adição mineral.

Segundo Hoppe Filho et al. (2015), a atividade pozolânica da casca de arroz queimada (CCA) é significativa mesmo quando não se tem um controle da combustão e da temperatura. Logo a adição desse material em materiais cimentícios implica num aumento considerável da sílica e consequentemente a resistência à compressão simples também aumenta (SOUZA, 2008).

É importante que a introdução de qualquer material em um já existente resulte em um material que seja durável. A durabilidade é um dos fatores mais importantes para o conhecimento dos novos materiais em desenvolvimento, pois para que se haja confiabilidade nas características tecnológicas de um novo material e indicação deste como uma possibilidade técnica, a ser disponibilizada no mercado, é fundamental o conhecimento de suas condições de uso e de sua vida útil (FARIAS FILHO ET AL., 2011).

Os autores ainda afirmam que no estudo da durabilidade dos materiais vários parâmetros podem ser avaliados, principalmente, as propriedades mecânicas através da resistência à compressão simples, que será analisado no presente trabalho.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais**

##### **3.1.1 Materiais Convencionais**

Os materiais convencionais utilizados nessa pesquisa foram: cimento Portland CP V ARI MAX (Nacional, Sociedade Brasileira de Cimento Portland) e Cal hidratada (Carbomil®).

##### **3.1.2 Materiais Alternativos**

Os materiais alternativos utilizados foram: resíduo gerado na extração de Scheelita e cinza da casca de arroz (CCA). O resíduo de Scheelita foi denominado nesta pesquisa de areia de Scheelita (AS), o mesmo foi coletado na granulometria média e cedido pela Mineração Tomaz Salustino - Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos/RN. Enquanto, a CCA foi obtida na empresa Café Itans, localizada no município de Caicó/RN.

#### **3.2 Métodos**

##### **3.2.1 Caracterização física do resíduo de scheelita (AS)**

A caracterização física foi realizada determinando a granulometria do resíduo por peneiramento. O peneiramento do agregado oriundo do resíduo de Scheelita ocorreu por meio da série normal de peneiras, mediante os procedimentos da norma da ABNT NBR NM 248 (2003).

##### **3.2.2 Beneficiamento da cinza de casca de arroz (CCA)**

A casca de arroz passou por queima em olaria para retirada do teor de carbono, em seguida, realizou-se a calcinação da cinza resultante, em mufla a temperatura de 800°C por duas horas, em atmosfera oxidante. Após o processo de calcinação, o material passou em peneira ABNT nº 200 (0,074mm).

### 3.2.3 Caracterização química da cinza da casca de arroz

A composição química foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), esta técnica se baseia no princípio da absorção de raios X pelo material que provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Enquanto, a análise química será realizada através de espectrometria de fluorescência de raios X (EDX), com detector EDS (Shimadzu EDX 720) para obter os óxidos presentes na composição das amostras.

### 3.2.4 Preparação das Argamassas

A moldagem dos corpos de prova (CP's) das argamassas incorporadas com AS em substituição total ao agregado convencional/natural/comercial e substituição parcial ao cimento nas porcentagens de 15% e 25% pela CCA ocorreu conforme as prescrições das normas da ABNT NBR 13583 (2014) e NBR 7215(1996).

Logo, moldou-se no traço 1:3 doze CP's prismáticos com dimensões (25x25x285) mm para determinação da variação dimensional das barras de argamassas expostas a solução de sulfato de sódio e doze CP's cilíndricos nas dimensões (50x100) mm para verificação da ocorrência da degradação, após o ataque por sulfatos. Posteriormente, os corpos de prova foram curados em câmara úmida com 100% de umidade relativa por um período de 48 horas.

### 3.2.5 Determinação da variação dimensional de barras de argamassas de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio

Os ensaios de variação dimensional das argamassas causada pelo ataque de sulfato procederam conforme recomenda a norma da ABNT NBR 13583 (2014). Parte dos CP's foram imersos em solução de sulfato de sódio, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma, com as devidas adaptações necessárias ao desenvolvimento dessa pesquisa.

O ataque por sulfato de sódio consistiu em, após a desmoldagem e cura, dividir os CP's em duas séries de seis CP's (três para cada porcentagem de substituição: 15% e 25%), onde uma série foi imersa em solução de sulfato de sódio e outra série foi imersa em solução de água saturada com cal.

Os CP's ficaram imersos por 42 dias, e foram realizadas medições em relógio comparador (Figura 2) aos 7, 14, 28 e 42 dias em cada uma das séries para que fosse possível calcular a variação sofrida.

**Figura 2 - Relógio comparador**



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

A expansão resultante nas barras de argamassas estudadas foi obtida conforme as equações recomendadas pela norma ABNT NBR 13583 (2014), porém a mesma não especifica um valor limite aceitável para expansão aos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio, logo adotou-se o limite de 0,06% estabelecido pela norma ASTM C 452 (2002) à medida que se trata de uma metodologia apropriada para avaliação de cimento Portland.

### 3.2.6 Determinação da resistência à compressão simples (RCS)

A RCS foi obtida conforme a norma da ABNT NBR 7215 (1996), a partir da média aritmética simples dos valores obtidos para três CP's cilíndricos com dimensões (50x100)mm para o traço 1:3.

O equipamento utilizado para romper os CP's foi a Máquina Universal Emic SSH300, célula Trd 30 com velocidade de carga de  $0,25 \pm 0,05$  MPA/s.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização física e química da areia de Scheelita

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas determinadas para o agregado oriundo da Scheelita (AS). Ao analisar os resultados obtidos para sua massa unitária, verificou-se que a AS foi classificada como agregado normal quando se utiliza a classificação proposta por Bauer (1995), que também considera ser de uso ideal para argamassas. Pois o valor da massa unitária apresentada por esse resíduo se encontra na faixa de valor  $1 \leq \gamma \leq 2 \text{ g/cm}^3$ . Logo, pode ser usado em argamassas.

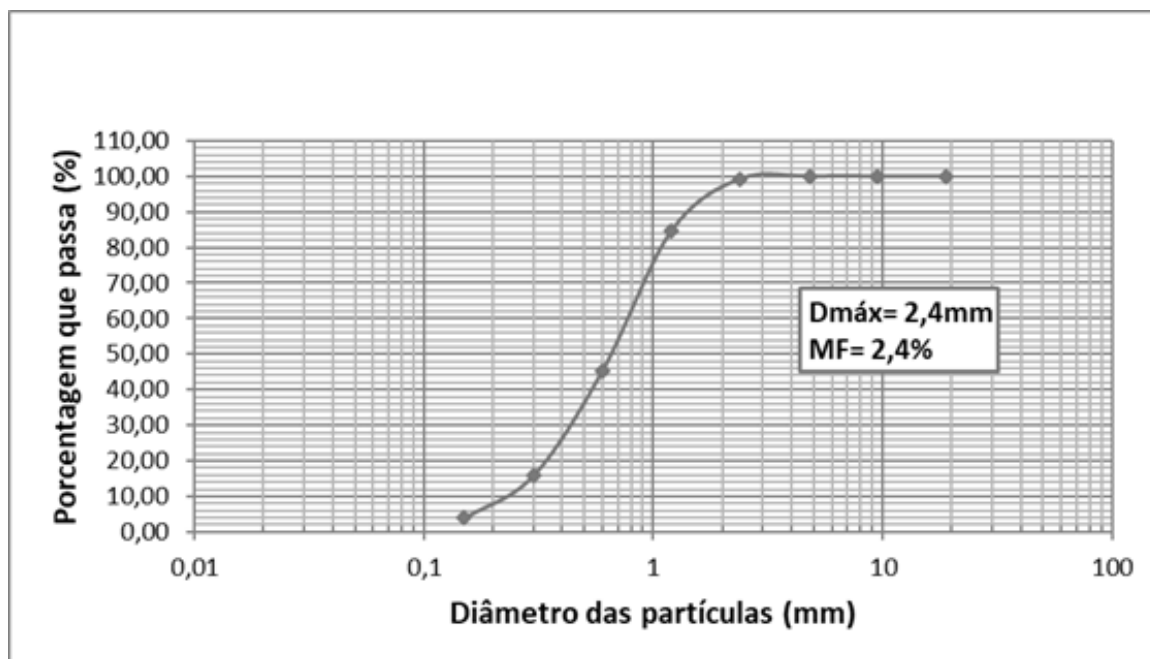
**Tabela 1** - Propriedades físicas da Areia de scheelita.

| Ensaio                                         |                      | AS     |
|------------------------------------------------|----------------------|--------|
| Massa unitária ou aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) |                      | 1,69   |
| Teor de materiais pulverulentos (%)            |                      | 1,4    |
| Granulometria                                  | Diâmetro máximo      | 2,37mm |
|                                                | Módulo de finura (%) | 2,4    |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Ainda segundo Bauer (1995), com relação ao modulo de finura da Areia de scheelita, que corresponde a 2,4%, o agregado estudado foi classificado como areia de granulometria média.

A Figura 3 apresenta a curva granulométrica da AS, de acordo com o comportamento dessa curva, constatou-se que AS tem granulometria graduada, fato que proporciona maior compacidade as argamassas.

**Figura 3** - Curva granulométrica da AS.

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

De acordo com a distribuição dos grãos observados na curva granulométrica (Figura 3), percebeu-se que AS pode ser utilizada na confecção de argamassas, por apresentar grãos mistos e bem graduados.

A composição química da AS é apresentada na Tabela 2. A areia de Scheelita apresentou valores elevados de óxido de cálcio (CaO) e de sílica (SiO<sub>2</sub>).

**Tabela 2** - Composição química da AS.

| Amostra | PF* (%) | SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | K <sub>2</sub> O (%) | TiO <sub>2</sub> (%) | CaO (%) | MgO (%) | Outros (%) |
|---------|---------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|---------|---------|------------|
| AS      | 15,74   | 21,76                | 7,62                               | 9,81                               | 0,55                 | 0,68                 | 38,46   | 3,33    | 2,05       |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

#### 4.2 Caracterização química da cinza da casca de arroz calcinada a 800°C

A Tabela 3 apresenta os óxidos que constituem a composição química da CCA calcinada a temperatura de 800°C.

**Tabela 3** – Composição química da CCA calcinada a 800°C.

| Determinações (%)              | CCA 800°C |
|--------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 91,55     |
| CaO                            | 1,65      |
| K <sub>2</sub> O               | 2,45      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,79      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,11      |
| MgO                            | 0,47      |
| SO <sub>3</sub>                | 0,55      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,25      |
| Outros óxidos                  | 0,18      |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

Observa-se na Tabela 3 que a CCA calcinada a 800°C apresenta elevados teores de sílica, principal componente químico. Dessa forma, pode-se afirmar que as cinzas obtidas apresentam composição química favorável para serem utilizadas em argamassas.

Porém, saber que há uma grande quantidade de sílica na CCA não é suficiente para garantir que ao adiciona-la na confecção de argamassas resultará em um produto com qualidades técnicas melhoradas. É necessário conhecer se a sílica em questão é amorfa (reativa) ou cristalina (praticamente inerte), e segundo Della, Kühn e Hotza (2001), a presença de sílica amorfa (reativa) ou cristalina (praticamente inerte) está diretamente ligada à temperatura e ao método de obtenção da cinza.

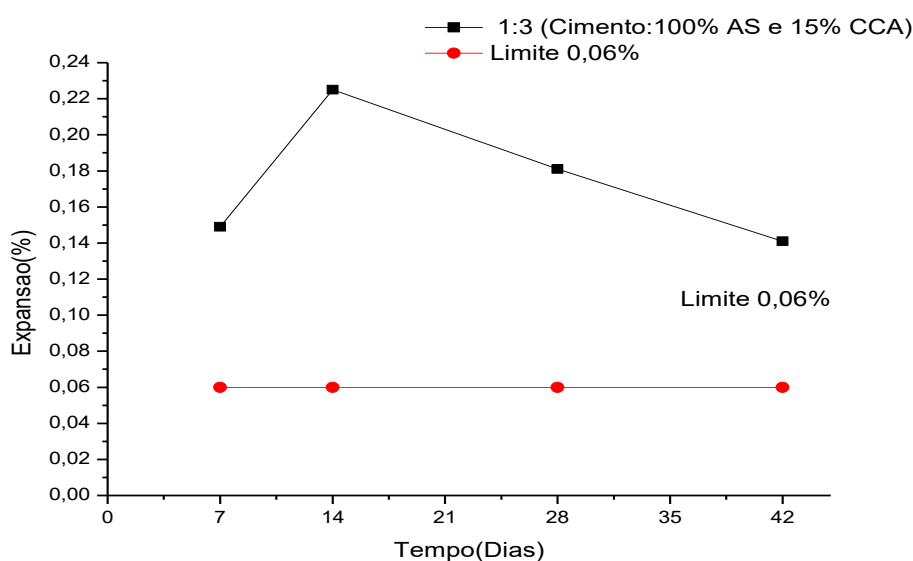
Segundo Nakata (1989) citada por Della, Kühn e Hotza (2001), mesmo a sílica da CCA sendo amorfa, o fato de ter um porcentagem considerável de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) pode baixar o ponto de fusão do material e consequentemente acelerar a cristalização da sílica cristobalita.

Para Payá et al. (2001) apresentado por Tashima et al. (2011) para que a CCA se apresente em um estado predominantemente amorfo é necessário que o processo de combustão da cinza não ultrapasse a temperatura de 600 °C. E em alguns casos a CCA já apresenta cristobalita a 800 °C, logo implicaria negativamente na reação com o material cimentício.

### 4.3 Variação dimensional das barras de argamassas confeccionadas com AS e CCA calcinada a 800° C

A Figura 4 ilustra a curva das expansões obtidas pela argamassa confeccionada com 15% de substituição parcial do cimento Portland pela CCA calcinada a 800° C e 100% de AS quando imersas em solução de sulfato de sódio ao longo dos 42d de exposição.

**Figura 4** - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio - 15% de substituição de cimento por CCA.

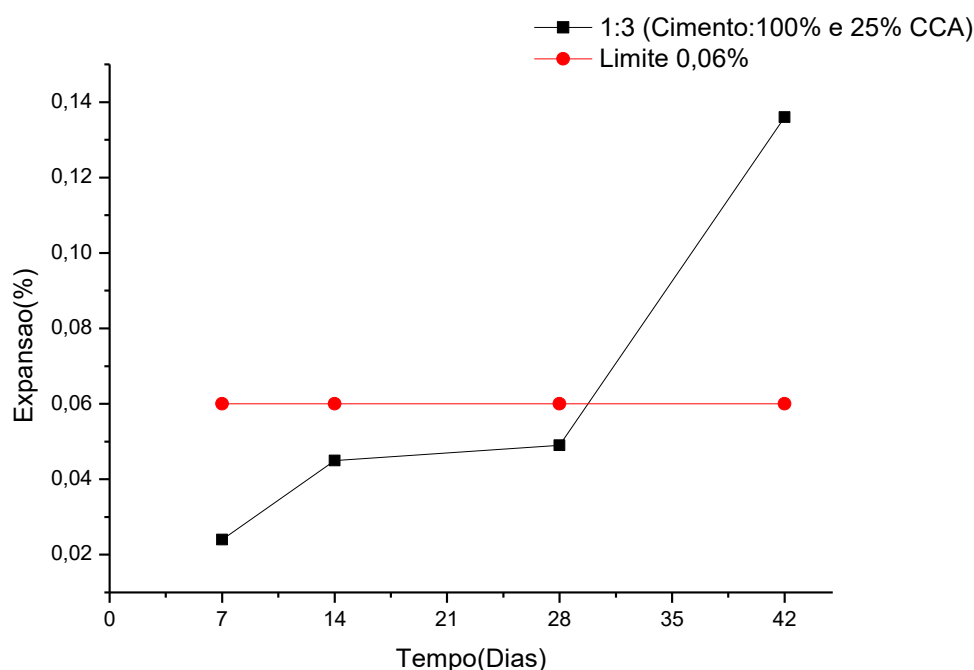


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Os valores obtidos para as expansões das argamassas incorporadas com resíduos de Scheelita e substituição de 15% do cimento Portland pela CCA calcinada a 800°C aos 7, 14, 28 e 42 dias de exposição ao ataque por sulfato de sódio obtiveram valores mais alto que o limite (0,06%) estabelecido pela norma ASTM C 452 (2002).

A Figura 5 ilustra a curva das expansões obtidas pela argamassa com 25% de substituição parcial do cimento Portland pela CCA calcinada a 800° C e 100% de AS quando imersas em solução de sulfato de sódio ao longo dos 42d de exposição.

**Figura 5** - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio - 25% de substituição de cimento por CCA.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

O valor obtido para a expansão das argamassas incorporadas com resíduos de Scheelita e substituição de 25% do cimento Portland pela CCA calcinada a 800°C aos 42 dias de exposição ao ataque por sulfato de sódio foi mais alto que o limite (0,06%) estabelecido pela norma ASTM C 452 (2002).

Então, as argamassas estudadas não são resistentes ao ataque por sulfato quando o método de avaliação aplicado for a variação dimensional dessas barras imersas em solução de sulfato de sódio, estabelecido pela norma da ABNT NBR 13583 (2014) e se adota o limite estabelecido pela norma da ASTM C 452 (2002).

4.4 RCS das argamassas confeccionadas com AS e CCA a temperatura de 800, após serem submetidas ao ataque por sulfato de sódio ao longo dos 42d

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para resistência à compressão simples dos corpos de prova após imersão em água destilada (42 dias) e em solução de sulfato de sódio (42 dias).

**Tabela 4** - Valores de resistência à compressão simples dos CP's após ataque por sulfato.

| Substituição<br>(% de CCA) | RCS 42d de<br>Imersão em<br>água (Mpa) | Desvio<br>Padrão | RCS após 42d de imersão<br>em solução de sulfato de<br>sódio (Mpa) | Desvio<br>Padrão |
|----------------------------|----------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------|
| 15%                        | 12,22                                  | $\pm 2,45$       | 12,22                                                              | $\pm 0,98$       |
| 25%                        | 13,44                                  | $\pm 1,19$       | 12,59                                                              | $\pm 1,99$       |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Ao analisar os valores obtidos para RCS (Tabela 4), verificou-se que a resistência dos corpos de prova após a imersão de 42 dias em solução de sulfato de sódio e imersão em água obteve não caracterizam a ocorrência da degradação dessas barras após o ataque. Apesar das expansões terem demonstrado o ataque por sulfato de sódio nas argamassas estudadas. Diante disso, é possível afirmar a não ocorrência de perda mecânica da resistência, porém pode ter havido uma degradação interna (não da resistência).

## 5 CONCLUSÕES

Após a realização do estudo do ataque por sulfato de sódio de barras de argamassas confeccionadas com resíduo oriundo da mineração de Scheelita em substituição total ao agregado convencional, é possível concluir:

- As barras de argamassas confeccionadas com substituições parciais de 15% e 25% do cimento Portland pela CCA calcinada a 800° C e substituição total do agregado natural pela AS são suscetíveis ao ataque por sulfato de sódio.
- Os teores de substituição parcial pela CCA calcinada a 800° C não foram suficientes para tornar as argamassas estudadas resistentes ao ataque por sulfatos.
- O agregado AS pode ser considerado reativo à medida que ocorreu o ataque por sulfato de sódio e apresenta na sua constituição química um teor considerável de alumina.
- As argamassas estudadas não apresentam durabilidade para serem utilizadas em ambientes agressivos, ricos em sulfatos.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 452**: Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate, 2002.

AL-AKHRAS, N. M. **Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1727-1734, 2006.

ALVES, B. S.; PEREIRA, D. D.; IZÍDIO JÚNIOR, L. R.; GURGEL, M. T. Análise comparativa o agregado miúdo com o rejeito da scheelita para aplicação na construção civil. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 06 a 10 de novembro de 2016, Natal-RN. **Anais...** Natal/RN, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5737**: Cimentos Portland a sulfato- Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13583**: Cimento Portland- Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio– Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão– Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados- Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BATISTA, Larissa S. et al. ANÁLISE DA INCOPORAÇÃO DE RESÍDUO DE SCHEELITA EM CONCRETO ALTERNATIVO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2018, São Bernardo do Campo. **Anais...** . São Bernardo do Campo: Congea, 2018. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/XI-008.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2019.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 1ªed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.1, 1994. 435p.

Brown, P. W. Thaumasite formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, n° 24, 301-303, 2002.

COLLEPARDI, M. A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete. **Cement & Concrete Composites** , Amsterdã, v. 25, n. 4-5, p. 401-407, 2003.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Belo Horizonte, 2004. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg; HOTZA, Dachamir. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, [s.l.], v. 24, n. 6, p.000-000, dez. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422001000600013>.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados de conjuntura da produção de arroz (*Oryza sativa* L.) no Brasil (1985-2015): área, produção e rendimento**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2016. Disponível em: <http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>. Acesso em: 06 jun. 2019.

EMMONS, Peter H. **Concrete Repair and Maintenance**. Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p. ISBN 0- 87629- 286- 4

FARIAS FILHO, J.; MENEZES, R.; FERREIRA, H. S.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos. **Revista Cerâmica**. v. 57, p. 395-403, 2011.

FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

HOPPE FILHO, J. et al. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, p.168-177, jun. 2015. FAPUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581905>.

FRANÇA NETA, Maria de Lourdes Xavier de. **ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO EM ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE SCHEELITA EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL AO AGREGADO CONVENCIONAL**. 2018. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Angicos, 2018.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56f. Dissertação (Especialização em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

LINHARES, A. S.; SILVA, B. T. A. **Aplicação do rejeito da scheelita em camadas granulares de pavimentos**. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; VII Congresso Luso-Brasileiro de Geotécnica; VI Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas; e VII Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 9 a 13 de setembro de 2014, Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia-GO, 2014.

MACHADO, T. G. **Estudo da adição de resíduo de scheelita em matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura**. 143 f. 2012. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. 751p.

MEIRA, L. R. **Propriedades Mecânicas e Retração do Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz Natural, Sem Beneficiamento de Moagem**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

NAKATA, Y. et al. Preparation and properties of SiO<sub>2</sub> from rice hulls. **Journal of the Ceramic Society of Japan International Edition**, v. 97, n. 8, p. 830-836, 1989

NETTO, Rafael Mantuano. **Materiais pozolânicos**. Universidade Federal de Minas Gerais, monografia apresentada no curso de especialização em engenharia civil, Escola de Engenharia da UFMG-Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto** / A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. 105 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal- RN, 2013.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J; BORRACHERO, M. V.; MELLADO, A; ORDOÑEZ, L. M. Determination of amorphous sílica in rice husk ash by a rapid analytical method. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 227-231, 2001.

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

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.

SCHMALZ, Rosana. **DURABILIDADE DE ARGAMASSAS SUBMETIDAS AO ATAQUE DE SULFATOS: EFEITO DA ADIÇÃO DA NANOSÍLICA**. 2018. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

SILVA, Carlos Adriano Rufino da. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unesp, Ilha Solteira, 2004.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVEIRA, Adriana Augustin. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. 1996. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SOUZA, Diego Jesus de. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento portland**. 2016. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SOUZA, Jozilene de. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz**. 2008. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

SOUZA, Juliane Palmas de et al. **A Utilização da Cinza da Casca de Arroz da Região de Dourados em Substituição Parcial ao Agregado Miúdo em Microconcreto: Resistência Mecânica e Durabilidade**. In: ENCONTRO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 8., 2014, Dourados. **Artigo**. Dourados: UFGD, 2014.

SOUZA, Rui Barbosa de. **Suscetibilidade de Pastas de Cimento ao Ataque por Sulfato - Método de Ensaio Acelerado**. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TASHIMA, M. M. et al. Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil. **HOLOS Environment**, v. 11, n. 1, p. 81-89, 2011.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA LUIZA DE ARAÚJO

**ATAQUE POR SULFATO EM ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM CINZA  
DE CASCA DE ARROZ E AGREGADO ORIUNDO DA SCHEELITA**

ANGICOS

2019

ANA LUIZA DE ARAÚJO

**ATAQUE POR SULFATO EM ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM CINZA  
DE CASCA DE ARROZ E AGREGADO ORIUNDO DA SCHEELITA**

Trabalho Final de Graduação apresentado a  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
como um requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sâmea Valensca Alves  
Barros

ANGICOS

2019

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

A658a ARAUJO, ANA LUIZA DE.  
ATAQUE POR SULFATO EM ARGAMASSAS  
CONFECCIONADAS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E  
AGREGADO ORIUNDO DA SCHEELITA / ANA LUIZA DE  
ARAUJO. - 2019.  
36 f. : il.

Orientadora: SÂMEA VALENSCA ALVES BARROS.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,  
2019.

1. ADIÇÕES MINERAIS. 2. MATERIAL POZOLÂNICO. 3.  
DURABILIDADE. I. BARROS, SÂMEA VALENSCA ALVES,  
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANA LUIZA DE ARAÚJO

**ATAQUE POR SULFATO EM ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM CINZA  
DE CASCA DE ARROZ E AGREGADO ORIUNDO DA SCHEELITA**

Trabalho Final de Graduação apresentado a  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
como um requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 14 / 08 / 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

Sâmeca Valensca Alves Barros

Sâmeca Valensca Alves Barros, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente

Ilana Maria da Silva Barros

Ilana Maria da Silva Barros, Eng. civil. Me. (UFERSA)  
Membro Examinador

Gerbeson Carlos Batista Dantas

Gerbeson Carlos Batista Dantas, Eng. Civil. (UFERSA)  
Membro Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por estar comigo em todos os momentos que passei durante esses anos na UFERSA-Angicos, por ter me ajudado e me dado forças quando pensei que não iria conseguir. "Este Deus faz tudo perfeito e cumpre o que promete. Ele é como um escudo para os que procuram a Sua proteção." (Salmos 18:30).

Aos meus pais, que diante as dificuldades não mediram esforços para me dar a melhor educação, e sempre me incentivarem a estudar mais. Obrigada por todo amor e paciência para comigo diante dos meus estresses nessa reta final de curso. Obrigada por serem o meu alicerce!

A minha orientadora, a professora Sâmea Valensca Alves Barros, pelo incentivo e paciência para comigo. Por me entender diante das dificuldades que enfrentei. Por me provar, mais uma vez, que tenho com quem contar dentro da universidade. Obrigada por ter acreditado que seria possível a realização deste trabalho!

Ao técnico de laboratório de construção civil do IFRN- Campus Mossoró, Valteson da Silva, pela contribuição concedida na realização dos ensaios realizados no laboratório mencionado e pela disponibilidade de tirar todas as dúvidas que surgiram.

À técnica de laboratório de engenharia civil da UFERSA Angicos, Ádna Érica Melo de Sousa, por se disponibilizar em contribuir pacientemente durante todos os procedimentos realizados, mesmo quando necessário repeti-los ou ainda passar do horário de expediente. Muito obrigada!

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, a todo o seu corpo docente, direção e administração, que fizeram com que esse momento se tornasse real;

A todos os professores da UFERSA - Campus Angicos que deram sua contribuição para o meu conhecimento. Em especial aqueles que mais que professores, tornaram-se amigos, Kleber Cavalcante, Edcarlos Alves, Klaus André, Bruna Lima, Maria Creuza.

A minha prima Ingrid Luana e minha amiga Thalita Felício, que foram verdadeiros pilares nesses últimos meses de curso, me sustentando, aconselhando, intercedendo e incentivando quando as coisas apertaram.

Aos amigos-anjos que ganhei junto com a universidade e que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui. Em especial, Jéssica Lacerda, Paulo Moraes, Kenned Rossino, Andriele Barros, Maria Bruna, Bruna Luadna, Matheus Silva, Katyellen. Obrigada por me ajudarem seja com as disciplinas, seja com um incentivo nos finais de período.

Aos meus queridos e amados amigos da vida, pelo carinho e incentivo sempre que estava desanimada, e por me entenderem quando não podia sair nos fins de semana porque tinha que ficar em casa estudando.

Aos engenheiros civis Ilana Maria da Silva Barros e Gerbeson Carlos Batista Dantas que se dispuseram a contribuir com o presente trabalho. Muito obrigada!

## RESUMO

O Brasil é um grande produtor de arroz e o beneficiamento desse cereal gera uma grande quantidade de resíduos que não tem uma destinação certa e acabam gerando grandes impactos ambientais negativos. Somado a isso, o país é território da maior mina de extração do mineral scheelita, e o resíduo resultante do processo de extração também não tem uma destinação certa, e é disposto a céu aberto. É tentando resolver esse problema que diversas áreas têm reaproveitado ambos resíduos como subprodutos, buscando melhorias nos produtos finais. Diante disso, este trabalho objetiva estudar o ataque por sulfatos em argamassa confeccionada com o agregado oriundo do resíduo Scheelita, em substituição total do agregado convencional, e com cinza da casca de arroz calcinada a 800°C, em substituição parcial do cimento. Para isso foi feito verificado a expansão de corpos de prova de argamassa através dos procedimentos estabelecidos pela norma da ABNT NBR 13583 (2014) com as devidas adaptações necessárias ao desenvolvimento dessa pesquisa, e verificou-se ainda a resistência à compressão simples. Os resultados indicaram que as substituições adotadas não foram suficientes para mitigar o ataque por sulfato, pois a expansão das barras de argamassa ultrapassou o limite estabelecido pela norma da ASTM C 452 (2002). Apesar das expansões terem demonstrado o ataque por sulfato de sódio nas argamassas estudadas, o ensaio de resistência à compressão simples mostrou que não houve degradação das barras no que refere à perda mecânica da resistência.

**Palavras-chave:** Adições minerais. Material pozolânico. Durabilidade.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Pilhas de rejeito da mina Brejuí.....                                                                                           | 15 |
| <b>Figura 2</b> - Relógio comparador.....                                                                                                         | 25 |
| <b>Figura 3</b> - Curva granulométrica da AS. ....                                                                                                | 27 |
| <b>Figura 4</b> - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio - 15% de substituição de cimento por CCA..... | 29 |
| <b>Figura 5</b> - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio - 25% de substituição de cimento por CCA..... | 30 |

## LISTA DE TABELAS

|          |   |                                                                                    |    |
|----------|---|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – | Propriedades físicas da Areia de scheelita .....                                   | 26 |
| Tabela 2 | – | Composição química da AS .....                                                     | 27 |
| Tabela 3 | – | Composição química da CCA calcinada a 800°C .....                                  | 28 |
| Tabela 4 | – | Valores de resistência à compressão simples dos CP's após ataque por sulfato ..... | 31 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                                                                              |                                            |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| ABNT                                                                         | Associação Brasileira de Normas Técnicas   |
| AFm                                                                          | Monossulfoaluminato de cálcio hidratado    |
| AS                                                                           | Areia de Scheelita                         |
| ASTM                                                                         | American Society for Testing and Materials |
| CaO                                                                          | Óxido de cálcio                            |
| Ca(OH) <sub>2</sub>                                                          | Hidróxido de cálcio                        |
| CaSiO <sub>3</sub> .CaCO <sub>3</sub> .CaSO <sub>4</sub> .15H <sub>2</sub> O | Taumasita                                  |
| C <sub>3</sub> A                                                             | Aluminato Tricálcico                       |
| CCA                                                                          | Cinza da casca de arroz (CCA)              |
| C-S-H                                                                        | Silicato de cálcio hidratado               |
| CP's                                                                         | Corpos de Prova                            |
| EDX                                                                          | Espectrometria de Fluorescência de Raios X |
| FRX                                                                          | Fluorescência de Raios X                   |
| RCS                                                                          | Resistência à Compressão Simples           |
| SiO <sub>2</sub>                                                             | Dióxido de silício                         |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                                                | Íons sulfato                               |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                                                                                 | 13 |
| <b>1.1 Objetivos</b>                                                                                                                | 14 |
| 1.1.1 Objetivo geral                                                                                                                | 14 |
| 1.1.2 Objetivos específicos                                                                                                         | 14 |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                                                                                        | 15 |
| <b>2.1 Scheelita</b>                                                                                                                | 15 |
| <b>2.2 Ataques por sulfatos em argamassas</b>                                                                                       | 16 |
| 2.2.1 Ataque por sulfato associado com etringita e/ou a formação de gipsita (gesso) ...                                             | 18 |
| 2.2.2 Pelo ataque sulfato físico associado com a cristalização de sais contendo sulfato em ou perto de uma superfície de evaporação | 18 |
| 2.2.3 Formação de etringita retardada                                                                                               | 19 |
| 2.2.4 Formação de taumasita                                                                                                         | 19 |
| <b>2.3 Agentes mitigadores do ataque</b>                                                                                            | 19 |
| <b>2.4 Cinza da Casca de Arroz</b>                                                                                                  | 21 |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                                                                                       | 23 |
| <b>3.1 Materiais</b>                                                                                                                | 23 |
| 3.1.1 Materiais Convencionais                                                                                                       | 23 |
| 3.1.2 Materiais Alternativos                                                                                                        | 23 |
| <b>3.2 Métodos</b>                                                                                                                  | 23 |
| 3.2.1 Caracterização física do resíduo de scheelita (AS)                                                                            | 23 |
| 3.2.2 Beneficiamento da cinza de casca de arroz (CCA)                                                                               | 23 |
| 3.2.3 Caracterização química da cinza da casca de arroz                                                                             | 24 |
| 3.2.4 Preparação das Argamassas                                                                                                     | 24 |
| 3.2.5 Determinação da variação dimensional de barras de argamassas de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio       | 24 |
| 3.2.6 Determinação da resistência à compressão simples (RCS)                                                                        | 25 |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                                                                                    | 26 |
| <b>4.1 Caracterização física e química da areia de Scheelita</b>                                                                    | 26 |
| <b>4.2 Caracterização química da cinza da casca de arroz calcinada a 800°C</b>                                                      | 27 |
| <b>4.3 Variação dimensional das barras de argamassas confeccionadas com AS e CCA calcinada a 800° C</b>                             | 29 |

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4 RCS das argamassas confeccionadas com AS e CCA a temperatura de 800, após serem submetidas ao ataque por sulfato de sódio ao longo dos 42d ..... | 30 |
| 5 CONCLUSÕES.....                                                                                                                                    | 32 |
| REFERÊNCIAS .....                                                                                                                                    | 33 |

## 1 INTRODUÇÃO

O arroz está entre os cereais mais consumidos e produzidos do mundo. Segundo a Embrapa Arroz e Feijão (2016) o Brasil é um grande produtor desse cereal e essa produção só cresce nos últimos anos, contudo, apesar de ser algo positivo, esse fator fomenta alguns desafios no que diz respeito à destinação da grande quantidade de resíduos gerados durante o beneficiamento do arroz. Pensando no meio ambiente diversas áreas têm reaproveitado esses resíduos como subprodutos, incluindo o mercado da construção civil, que têm os incorporado em concretos e argamassas como adições minerais.

Outro desafio, que atinge a construção civil, é a presença de sulfatos solúveis, principalmente os de sódio, cálcio e magnésio, que são comuns em áreas de operação de minas e indústrias químicas. Sódio e cálcio são os sulfatos mais comuns nos solos, águas e processos industriais. Sulfatos de magnésio são mais raros, porém mais destrutivos. Todos os sulfatos são potencialmente danosos aos materiais cimentícios, reagindo com a pasta de cimento hidratado, a este feito dá-se o nome de “ataque por sulfatos”. (LAPA, 2008).

Para que os materiais de base cimentícia possam resistir ao ataque por sulfatos é preciso melhorar as suas características técnicas. Isso é possível através da incorporação de adições minerais em substituição parcial ao cimento, uma vez que essa incorporação pode resultar em melhores propriedades da matriz cimentícia, e dependendo das características do material adicionado pode contribuir pra mitigar as reações de sulfato.

A cinza da casca de arroz (CCA) é proveniente da queima da casca do arroz, e em função de suas características é considerada uma pozolana artificial, logo pode ser utilizada como uma adição mineral na mistura de argamassas a fim de conseguir um produto final capaz de mitigar o ataque por sulfatos.

A pozolanicidade das CCA pode ser melhorada através da queima controlada da casca de arroz em laboratório, surgindo então a necessidade de avaliar a utilização da CCA calcinada à temperatura de 800°C em substituição parcial ao cimento na confecção de argamassas alternativas (Scheelita em substituição total do agregado miúdo).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Verificar o ataque por sulfatos em argamassas confeccionadas com resíduo oriundo da mineração de scheelita, em substituição total do agregado convencional, e com cinza da casca de arroz calcinada a 800°C, em substituição parcial do cimento.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização química da cinza da casca de arroz calcinada a 800°C.
- Realizar a caracterização física e química da areia de Scheelita.
- Promover o ataque ao sulfato das argamassas confeccionadas com agregado artificial oriundo do resíduo Scheelita e substituição parcial do cimento pela cinza da casca de arroz calcinada a 800°C.
- Determinar a resistência à compressão simples das argamassas confeccionada com o Agregado artificial oriundo do resíduo Scheelita após ataque por sulfato.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Scheelita

O mineral scheelita pertence à classe dos tungstatos e especificamente é um tungstato de cálcio com composição:  $\text{CaWO}_4$  (LINHARES, 2014). Machado (2012) classifica a Scheelita como um mineral metálico não ferroso, por não apresentar ferro em sua composição. Destaca, ainda, que possui alta densidade, ponto de fusão superior a  $4.500^\circ\text{C}$ , boa condutividade elétrica, e que pode ser encontrada em quatro cores: branca, amarela, verde e marrom.

A maior mina de scheelita subterrânea da América do Sul é a Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos/RN. Os minérios de scheelita são facilmente identificados com a utilização de emissores de radiação ultravioleta (mineralights), uma vez que a scheelita possui propriedades de fotoluminescência (FERNANDES, 2011).

A produção atual da mina corresponde a 20 toneladas mensais, sendo que para cada tonelada de minério extraído se tem 250 kg de concentrado de scheelita e 750 kg de rejeito mineral, que por não ter uma destinação certa, é descartado a céu aberto (MACHADO, 2012).

A grande quantidade de resíduos da mineração de scheelita, gerada pela Mina Brejuí, e sua inadequada destinação no terraço da própria empresa, como mostra a Figura 1, vem causando um impacto ambiental negativo. Com o intuito de mitigar os danos causados pela grande quantidade de rejeito jogado em local indevido, há a necessidade de se buscar alternativas para o aproveitamento sustentável do rejeito gerado na exploração da scheelita. E uma dessas alternativas seria sua aplicação no setor da construção civil (ALVES, 2016).

**Figura 1** - Pilhas de AS da mina Brejuí.



FONTE: FERNANDES (2011).

Durante o processo de extração do minério, ocorre poluição visual, poluição sonora, poluição do ar, solo, águas superficiais e subterrâneas, assoreamento e erosão, afugentamento da fauna e perda da flora (BATISTA et al., 2018).

Estudos já vêm sendo realizados para reaproveitamento do resíduo da scheelita na construção civil. Machado (2012) estudou a incorporação do resíduo scheelita em cerâmica caulina, Paiva (2013) estudou a viabilidade do uso do resíduo da concentração da scheelita incorporada ao concreto de cimento Portland como substituto parcial do agregado miúdo, citado como areia natural. Já França Neta (2018) analisou o ataque por sulfato de sódio em argamassas confeccionadas com resíduos da mineração de Scheelita em substituição total ao agregado convencional (areia).

## **2.2 Ataques por sulfatos em argamassas**

Os materiais de base cimentícia são passíveis à ação destrutiva de meios aquosos contendo sulfatos, e esta ação danosa é chamada de “ataque por sulfatos”. Segundo os vários estudos sobre o assunto que vêm sendo realizados há mais de um século, a maior parte está associado à interação dos íons sulfatos com pasta de cimento hidratada (SOUZA, 2006).

Todos os sulfatos são potencialmente danosos à matriz cimentícia quando reagem com a pasta de cimento hidratado, embora os sulfatos de magnésio sejam os mais destrutivos (LAPA, 2008). Estes sulfatos estão presentes na natureza e podem ser encontrados na água dos rios, em lençóis freáticos, água de pântanos e decomposição de matéria orgânica, além de ambientes poluídos como esgotos, áreas de operação de minas e indústrias químicas, ou ainda no próprio agregado constituinte do concreto ou argamassa. As manifestações patológicas que os materiais cimentícios, podem sofrer devido ao ataque por sulfatos incluem perda de resistência, expansão, lascamento das camadas superficiais e desintegração (SOUZA, 2006).

O ataque por sulfatos é um dos mais agressivos danos que afetam a durabilidade dos materiais cimentícios em longo prazo, ocorre através de reações químicas entre os compostos hidratados do cimento e íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Estas reações, num primeiro momento, podem aumentar ligeiramente a resistência, como reflexo da densificação da microestrutura, mas posteriormente, ocorre a redução da coesão e conseqüentemente uma perda progressiva de resistência, rigidez e massa (SILVEIRA, 1996).

Para Costa (2004), o ataque por sulfato pode produzir etringita, quando reage com os produtos de hidratação da alumina e/ou aluminato tricálcico não hidratado, e gesso (gipsita) quando reage com o hidróxido de cálcio. O autor afirma ainda que no concreto endurecido, a

formação da etringita resultante do ataque de sulfato nem sempre leva à expansão, que em virtude da baixa resistência à tração do concreto, a formação de etringita, pode levar à fissuração e consequente redução da resistência e desempenho da peça, como afirmado anteriormente por Silveira (1996).

Segundo Collepardi (2003), o tipo de cimento, o tipo e concentração do sulfato, a qualidade da matriz cimentícia e as condições de exposição podem influenciar no ataque por sulfatos. O autor classifica ainda o ataque em dois tipos em função da origem da fonte destes nos materiais cimentícios e consequentemente o processo de deterioração: por sulfatos de origem externa e de origem interna.

Na deterioração por sulfatos de origem externa, os sulfatos têm origem no meio ambiente, como solos contaminados por sulfato ou exposição a águas agressivas contendo sulfato, e reagem com os produtos de hidratação do cimento, gerando reações expansivas. Já na deterioração por sulfatos de origem interna não há penetração de sulfatos do meio ambiente, estes têm origem intrínseca à matriz cimentícia, isto é a deterioração se dá por contaminação ou adição excessiva de sulfatos aos materiais constituintes, também por sulfatos provenientes da clínquerização com combustíveis alternativos ricos em enxofre (COLLEPARDI, 2003; SCHMALZ, 2018).

A degradação do material cimentício em consequência de reações químicas entre o concreto ou argamassa de cimento Portland e íons de sulfato de uma fonte externa, pode se manifestar de duas formas distintas: pela expansão da matriz cimentícia e/ou pela perda progressiva de resistência e perda de massa. Quando ocorre a expansão, essa provoca fissuras e consequentemente aumenta a permeabilidade e a fragilidade para a penetração de águas agressivas (LAPA, 2008).

Geralmente a agressão se inicia pelos cantos e arestas, se espalha superficialmente e por fim vai penetrando progressivamente na peça. Durante este processo ocorre, em geral, uma perda da rigidez e da resistência da matriz cimentícia (SILVA FILHO, 1994).

Para Brown (2002), os sulfatos também podem ser de origem tanto externa como interna e seus ataques em materiais cimentícios podem se manifestar de várias formas: a forma clássica do ataque por sulfato associado com etringita e/ou a formação de gipsita (gesso); pelo ataque sulfato físico associado com a cristalização de sais contendo sulfato em ou perto de uma superfície de evaporação; pela formação de etringita retardada; e através da formação de taumasita.

Hoppe Filho et al. (2015) especificam essa manifestação, que se dá pela presença de íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) provenientes do meio externo e que adentram na estrutura da matriz

cimentícia através dos poros da matriz hidratada, resultando numa reação com o hidróxido de cálcio (portlandita), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e com o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm), formando gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado), etringita secundária tardia e, a taumasita ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ).

#### 2.2.1 Ataque por sulfato associado com etringita e/ou a formação de gipsita (gesso)

Os primeiros produtos da reação química entre o sulfato e os produtos hidratados são a gipsita e a etringita. Estes compostos formam-se nas regiões próximas da superfície e propagam-se na matriz cimentícia, e demais materiais de base cimentícia, através da rede de poros dos mesmos. Dentro da pasta de cimento hidratada, os sulfatos reagem com cálcio para formar gipsita e com as fontes de cálcio e alumínio para formar etringita, que por serem expansivos, inferem tensões internas à pasta de cimento hidratada, que geram expansão e fissuração (SOUZA, 2006).

Segundo Al-Akhras (2006), o gesso e a etringita formados como resultado do ataque de sulfato são significativamente mais volumosos (1,2 a 2,2 vezes) do que os reagentes iniciais, por isso levam à expansão, rachaduras, deterioração e ruptura de estruturas de concreto.

#### 2.2.2 Pelo ataque sulfato físico associado com a cristalização de sais contendo sulfato em ou perto de uma superfície de evaporação

A expansão provinda da cristalização de sais (normalmente sulfato de sódio, carbonato de sódio e sulfato de magnésio) é também conhecida como “ataque por ação física”, uma vez que não está relacionada a reações químicas entre os sulfatos e os compostos da pasta de cimento hidratado (SOUZA, 2006).

Concentrações de  $\text{SO}_4^{2-}$ , em meio aquoso, penetram no interior da estrutura cimentícia por capilaridade, permeabilidade ou difusão. Todavia, devido à evaporação da água se dar de forma lenta estas concentrações podem ficar muito elevadas, formando assim, os cristais (SOUZA, 2016).

Souza (2006) afirma que com a cristalização, os sais de sulfato passam a ocupar um volume maior do que quando estavam dissolvidos no meio aquoso, causando expansão e degradação do material cimentício.

### 2.2.3 Formação de etringita retardada

A formação da etringita tardia ocorre quando a fonte de íons sulfatos é interna. Ocorre quando é usado na produção do concreto ou argamassa um agregado contaminado com gipsita ou cimento contendo teores elevados de sulfato. Em casos de formação de etringita tardia, foi constatado que seus elementos haviam sido curados a vapor (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam ainda que até 65°C a etringita é uma fase estável, mas se a temperatura da cura térmica a vapor for superior a 65°C, a etringita decompõe-se para formar monossulfato hidratado. Neville (2016) reitera que caso a temperatura no interior do material cimentício atinja de 70 a 80°C, a lenta formação de etringita pode levar à fissuração e expansão.

### 2.2.4 Formação de taumasita

O ataque por sulfato com formação de taumasita ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ) ocorre em concretos enterrados e a baixas temperaturas (inferior a 15°C), onde na presença de sulfatos, carbonatos e água, o C-S-H pode se converter em taumasita. A formação da taumasita causa degradação progressiva da superfície da matriz cimentícia, transformando a pasta de cimento endurecida em uma massa não coesa (NEVILLE, 2016).

## 2.3 Agentes mitigadores do ataque

Os fatores que influenciam o ataque por sulfato podem ser evitados ou controlados, visto que estes podem ser resumidos em fatores externos e fatores que dependem de especificações construtivas como: a quantidade e natureza do sulfato presente, o nível da água e sua variação sazonal, o fluxo da água subterrânea e a porosidade do solo, a forma de construção e a qualidade da matriz cimentícia (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Na prática, é possível notar que inúmeras obras de infraestrutura são expostas a ambientes altamente agressivos e por isso, apresentam degradação precoce, remetendo a falhas de especificação prévia que garantam adequada funcionalidade e durabilidade (Hoppe Filho et al., 2015). Quando não se pode impedir a água com sulfato de atingir a matriz cimentícia, como em casos onde a estrutura de concreto está submersa no mar, a única defesa contra o ataque por sulfato é o controle da qualidade do concreto, objetivando aumentar a durabilidade deste (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Para evitar ou amenizar o problema da agressão por sulfatos, devem ser empregadas medidas que produzam efeitos sobre os parâmetros que governam o processo. Desde ações que levem a redução da agressividade do ambiente, como também a modificação das características do material cimentício para torná-lo menos suscetível à degradação, sendo que neste caso as principais medidas poderiam ser a utilização de um cimento com baixos teores de Aluminato Tricálcico ( $C_3A$ ) ou a incorporação de adições ao cimento Portland (SILVA FILHO, 1994).

De acordo com Emmos (1993), citado por Lapa (2008), algumas medidas que podem ser adotadas para aumentar a resistência e, por conseguinte, a durabilidade da matriz cimentícia contra o ataque de sulfatos, são: a redução do fator a/c, o uso de cimento resistente a sulfatos, utilização de um baixo teor de aluminato tricálcico, e a introdução de adições minerais em proporções adequadas na matriz cimentícia. Mehta e Monteiro (2014) reafirmam tais medidas como fatores que contribuem para a baixa permeabilidade da matriz cimentícia, e assim para a mitigação dos efeitos deletérios dos sulfatos na mesma.

Meira (2009) afirma que, quando misturadas a concretos e argamassas, as adições minerais melhoram a sua durabilidade e resistência mecânica. Segundo Fonseca (2010), as adições modificam a estrutura interna da matriz cimentícia quando ainda no estado fresco, e propiciam diversos benefícios que aumentam a durabilidade e resistência desta no estado endurecido, como: redução na porosidade capilar, diminuição das fissuras de origem térmica, melhoria na resistência a ataque por sulfatos, melhoria na resistência à reação álcali-sílica, entre outros.

Fonseca (2010) afirma ainda que o uso de adições minerais, tanto ao cimento quanto ao concreto, é uma prática comum em várias partes do mundo, como nos Estados Unidos e em países da Europa, por exemplo, onde já existem normas internacionais que consideram o uso de adições minerais, especificando com muita propriedade e qualidade, as condições que cada uma das adições deve apresentar para serem utilizadas na produção de concreto.

Uma adição mineral que é utilizada desde os primórdios pelos gregos e romanos é o material pozzolânico, por apresentar um bom desempenho mecânico e ainda possibilitar redução nos custos. Hoje as pozzolanas ressurgem como uma alternativa viável a ser usada na construção civil (SOUZA, 2008).

A NBR 12653 define os materiais pozzolânicos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. A norma ainda

os classifica em pozolanas naturais e artificiais, de acordo com a sua origem. A denominação materiais naturais refere-se a todos os materiais pozolânicos derivados de rochas ou minerais vulcânicos (com exceção das terras diatomáceas) que passam por processos de britagem, moagem e classificação. E as pozolanas artificiais são subprodutos de resíduos agrícolas e industriais que podem ou não sofrer algum tipo de processamento (cinza volante, sílica ativa, escória granulada de alto-forno, cinza da casca de arroz) (SILVA, 2004).

Segundo Netto (2006), as adições de pozolanas oferecem diversos benefícios às propriedades da matriz cimentícia, melhorando tanto a reologia (sua deformabilidade em função do tempo) no estado fresco, quanto o comportamento mecânico e a durabilidade no estado endurecido. Santos (2006) reitera essa afirmação e ainda aponta algumas melhorias do uso de material pozolânico frente ao ataque por sulfatos: (1) ao substituir parte do cimento por pozolana, reduz-se a quantidade de  $C_3A$  disponível para a reação; (2) como a reação pozolânica consome  $Ca(OH)_2$ , a quantidade deste fica bastante reduzida na pasta de cimento hidratada; (3) a formação do C-S-H oriundo da reação pozolânica tem menor relação  $CaO/SiO_2$  e (4) reduz, consideravelmente, a permeabilidade do concreto, dificultando o ingresso dos sulfatos. Poderia adicionar ainda outra melhoria, que é o fato de a reação pozolânica ocorrer de forma mais rápida que a reação de sulfatos.

## **2.4 Cinza da Casca de Arroz**

O Brasil é um grande produtor de arroz e segundo Souza et al. (2014), devido o alto poder calorífico da casca deste cereal, esta já é amplamente empregada como fonte de energia. Porém o resultado desse processo gera uma grande quantidade de cinzas. O autor alega que após a queima completa, cerca de 20% da casca de arroz é convertida em cinza que é comumente descartada de forma ambientalmente inadequada, gerando problemas ambientais como poluição do solo e contaminação de mananciais de água.

A cinza de casca de arroz constitui-se em um dos resíduos agroindustriais de maior produção no mundo. A realização de pesquisas sobre a utilização CCA tem como principal finalidade amenizar o impacto ambiental negativo gerado por seu descarte no meio ambiente, pois seu aproveitamento como material pozolânico na construção civil impede sua disposição em forma de aterro, que seria um fator gerador de poluição do solo, do ar e de rios e córregos (FONSECA, 2010; POUEY, 2006).

A CCA é um subproduto oriundo da combustão da casca de arroz que, quando moída finamente, adquire propriedades pozolânicas, reagindo com o hidróxido de cálcio liberado

durante a hidratação do cimento para formar compostos cimentantes semelhantes àqueles da hidratação do cimento (SOUZA, 2008). Diante disso, pode-se afirmar que a CCA é um material que pode ser utilizado como adição mineral.

Segundo Hoppe Filho et al. (2015), a atividade pozolânica da casca de arroz queimada (CCA) é significativa mesmo quando não se tem um controle da combustão e da temperatura. Logo a adição desse material em materiais cimentícios implica num aumento considerável da sílica e consequentemente a resistência à compressão simples também aumenta (SOUZA, 2008).

É importante que a introdução de qualquer material em um já existente resulte em um material que seja durável. A durabilidade é um dos fatores mais importantes para o conhecimento dos novos materiais em desenvolvimento, pois para que se haja confiabilidade nas características tecnológicas de um novo material e indicação deste como uma possibilidade técnica, a ser disponibilizada no mercado, é fundamental o conhecimento de suas condições de uso e de sua vida útil (FARIAS FILHO ET AL., 2011).

Os autores ainda afirmam que no estudo da durabilidade dos materiais vários parâmetros podem ser avaliados, principalmente, as propriedades mecânicas através da resistência à compressão simples, que será analisado no presente trabalho.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais**

##### **3.1.1 Materiais Convencionais**

Os materiais convencionais utilizados nessa pesquisa foram: cimento Portland CP V ARI MAX (Nacional, Sociedade Brasileira de Cimento Portland) e Cal hidratada (Carbomil®).

##### **3.1.2 Materiais Alternativos**

Os materiais alternativos utilizados foram: resíduo gerado na extração de Scheelita e cinza da casca de arroz (CCA). O resíduo de Scheelita foi denominado nesta pesquisa de areia de Scheelita (AS), o mesmo foi coletado na granulometria média e cedido pela Mineração Tomaz Salustino - Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos/RN. Enquanto, a CCA foi obtida na empresa Café Itans, localizada no município de Caicó/RN.

#### **3.2 Métodos**

##### **3.2.1 Caracterização física do resíduo de scheelita (AS)**

A caracterização física foi realizada determinando a granulometria do resíduo por peneiramento. O peneiramento do agregado oriundo do resíduo de Scheelita ocorreu por meio da série normal de peneiras, mediante os procedimentos da norma da ABNT NBR NM 248 (2003).

##### **3.2.2 Beneficiamento da cinza de casca de arroz (CCA)**

A casca de arroz passou por queima em olaria para retirada do teor de carbono, em seguida, realizou-se a calcinação da cinza resultante, em mufla a temperatura de 800°C por duas horas, em atmosfera oxidante. Após o processo de calcinação, o material passou em peneira ABNT nº 200 (0,074mm).

### 3.2.3 Caracterização química da cinza da casca de arroz

A composição química foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), esta técnica se baseia no princípio da absorção de raios X pelo material que provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Enquanto, a análise química será realizada através de espectrometria de fluorescência de raios X (EDX), com detector EDS (Shimadzu EDX 720) para obter os óxidos presentes na composição das amostras.

### 3.2.4 Preparação das Argamassas

A moldagem dos corpos de prova (CP's) das argamassas incorporadas com AS em substituição total ao agregado convencional/natural/comercial e substituição parcial ao cimento nas porcentagens de 15% e 25% pela CCA ocorreu conforme as prescrições das normas da ABNT NBR 13583 (2014) e NBR 7215(1996).

Logo, moldou-se no traço 1:3 doze CP's prismáticos com dimensões (25x25x285) mm para determinação da variação dimensional das barras de argamassas expostas a solução de sulfato de sódio e doze CP's cilíndricos nas dimensões (50x100) mm para verificação da ocorrência da degradação, após o ataque por sulfatos. Posteriormente, os corpos de prova foram curados em câmara úmida com 100% de umidade relativa por um período de 48 horas.

### 3.2.5 Determinação da variação dimensional de barras de argamassas de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio

Os ensaios de variação dimensional das argamassas causada pelo ataque de sulfato procederam conforme recomenda a norma da ABNT NBR 13583 (2014). Parte dos CP's foram imersos em solução de sulfato de sódio, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma, com as devidas adaptações necessárias ao desenvolvimento dessa pesquisa.

O ataque por sulfato de sódio consistiu em, após a desmoldagem e cura, dividir os CP's em duas séries de seis CP's (três para cada porcentagem de substituição: 15% e 25%), onde uma série foi imersa em solução de sulfato de sódio e outra série foi imersa em solução de água saturada com cal.

Os CP's ficaram imersos por 42 dias, e foram realizadas medições em relógio comparador (Figura 2) aos 7, 14, 28 e 42 dias em cada uma das séries para que fosse possível calcular a variação sofrida.

**Figura 2 - Relógio comparador**



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

A expansão resultante nas barras de argamassas estudadas foi obtida conforme as equações recomendadas pela norma ABNT NBR 13583 (2014), porém a mesma não especifica um valor limite aceitável para expansão aos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio, logo adotou-se o limite de 0,06% estabelecido pela norma ASTM C 452 (2002) à medida que se trata de uma metodologia apropriada para avaliação de cimento Portland.

### 3.2.6 Determinação da resistência à compressão simples (RCS)

A RCS foi obtida conforme a norma da ABNT NBR 7215 (1996), a partir da média aritmética simples dos valores obtidos para três CP's cilíndricos com dimensões (50x100)mm para o traço 1:3.

O equipamento utilizado para romper os CP's foi a Máquina Universal Emic SSH300, célula Trd 30 com velocidade de carga de  $0,25 \pm 0,05$  MPA/s.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização física e química da areia de Scheelita

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas determinadas para o agregado oriundo da Scheelita (AS). Ao analisar os resultados obtidos para sua massa unitária, verificou-se que a AS foi classificada como agregado normal quando se utiliza a classificação proposta por Bauer (1995), que também considera ser de uso ideal para argamassas. Pois o valor da massa unitária apresentada por esse resíduo se encontra na faixa de valor  $1 \leq \gamma \leq 2 \text{ g/cm}^3$ . Logo, pode ser usado em argamassas.

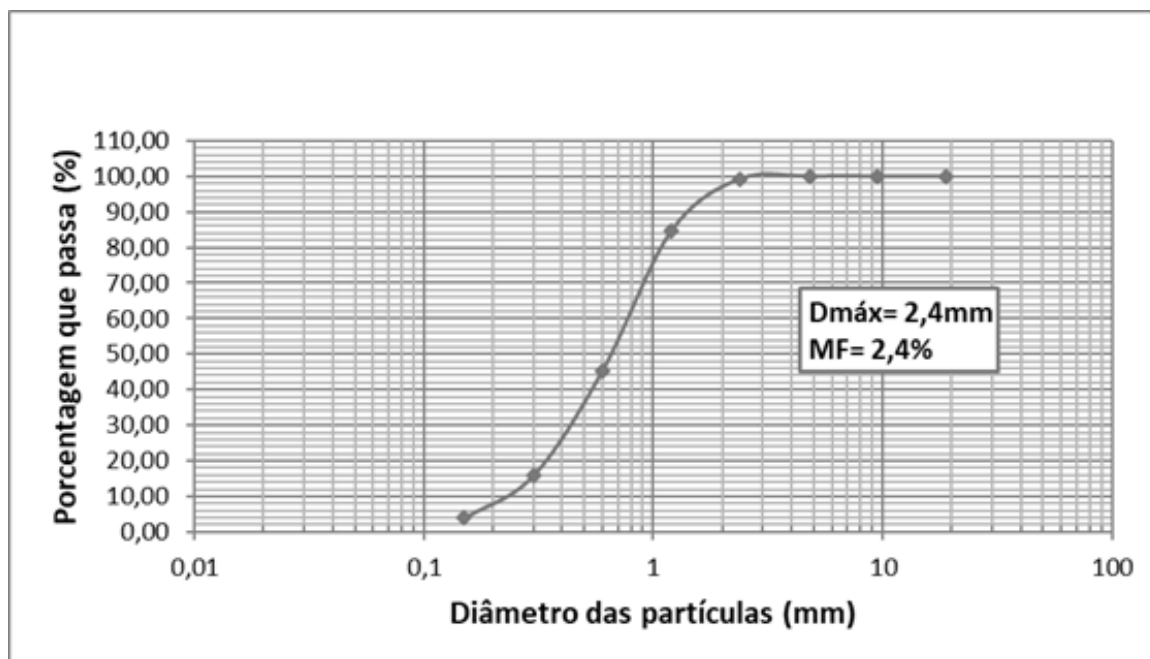
**Tabela 1** - Propriedades físicas da Areia de scheelita.

| Ensaio                                         |                      | AS     |
|------------------------------------------------|----------------------|--------|
| Massa unitária ou aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) |                      | 1,69   |
| Teor de materiais pulverulentos (%)            |                      | 1,4    |
| Granulometria                                  | Diâmetro máximo      | 2,37mm |
|                                                | Módulo de finura (%) | 2,4    |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Ainda segundo Bauer (1995), com relação ao módulo de finura da Areia de scheelita, que corresponde a 2,4%, o agregado estudado foi classificado como areia de granulometria média.

A Figura 3 apresenta a curva granulométrica da AS, de acordo com o comportamento dessa curva, constatou-se que AS tem granulometria graduada, fato que proporciona maior compacidade as argamassas.

**Figura 3** - Curva granulométrica da AS.

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

De acordo com a distribuição dos grãos observados na curva granulométrica (Figura 3), percebeu-se que AS pode ser utilizada na confecção de argamassas, por apresentar grãos mistos e bem graduados.

A composição química da AS é apresentada na Tabela 2. A areia de Scheelita apresentou valores elevados de óxido de cálcio (CaO) e de sílica (SiO<sub>2</sub>).

**Tabela 2** - Composição química da AS.

| Amostra | PF* (%) | SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | K <sub>2</sub> O (%) | TiO <sub>2</sub> (%) | CaO (%) | MgO (%) | Outros (%) |
|---------|---------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|---------|---------|------------|
| AS      | 15,74   | 21,76                | 7,62                               | 9,81                               | 0,55                 | 0,68                 | 38,46   | 3,33    | 2,05       |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

#### 4.2 Caracterização química da cinza da casca de arroz calcinada a 800°C

A Tabela 3 apresenta os óxidos que constituem a composição química da CCA calcinada a temperatura de 800°C.

**Tabela 3** – Composição química da CCA calcinada a 800°C.

| Determinações (%)              | CCA 800°C |
|--------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 91,55     |
| CaO                            | 1,65      |
| K <sub>2</sub> O               | 2,45      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,79      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,11      |
| MgO                            | 0,47      |
| SO <sub>3</sub>                | 0,55      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,25      |
| Outros óxidos                  | 0,18      |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

Observa-se na Tabela 3 que a CCA calcinada a 800°C apresenta elevados teores de sílica, principal componente químico. Dessa forma, pode-se afirmar que as cinzas obtidas apresentam composição química favorável para serem utilizadas em argamassas.

Porém, saber que há uma grande quantidade de sílica na CCA não é suficiente para garantir que ao adiciona-la na confecção de argamassas resultará em um produto com qualidades técnicas melhoradas. É necessário conhecer se a sílica em questão é amorfa (reativa) ou cristalina (praticamente inerte), e segundo Della, Kühn e Hotza (2001), a presença de sílica amorfa (reativa) ou cristalina (praticamente inerte) está diretamente ligada à temperatura e ao método de obtenção da cinza.

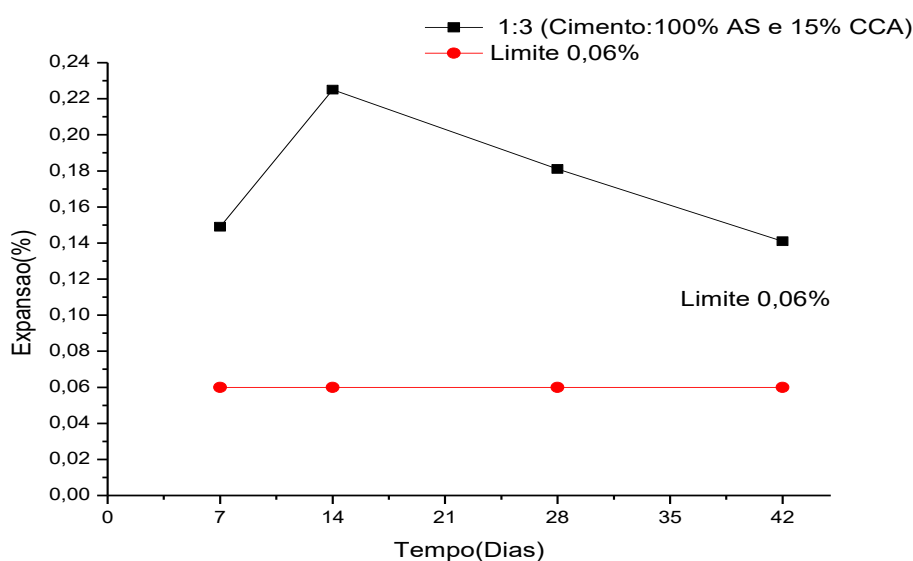
Segundo Nakata (1989) citada por Della, Kühn e Hotza (2001), mesmo a sílica da CCA sendo amorfa, o fato de ter um porcentagem considerável de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) pode baixar o ponto de fusão do material e consequentemente acelerar a cristalização da sílica cristobalita.

Para Payá et al. (2001) apresentado por Tashima et al. (2011) para que a CCA se apresente em um estado predominantemente amorfo é necessário que o processo de combustão da cinza não ultrapasse a temperatura de 600 °C. E em alguns casos a CCA já apresenta cristobalita a 800 °C, logo implicaria negativamente na reação com o material cimentício.

### 4.3 Variação dimensional das barras de argamassas confeccionadas com AS e CCA calcinada a 800° C

A Figura 4 ilustra a curva das expansões obtidas pela argamassa confeccionada com 15% de substituição parcial do cimento Portland pela CCA calcinada a 800° C e 100% de AS quando imersas em solução de sulfato de sódio ao longo dos 42d de exposição.

**Figura 4** - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio - 15% de substituição de cimento por CCA.

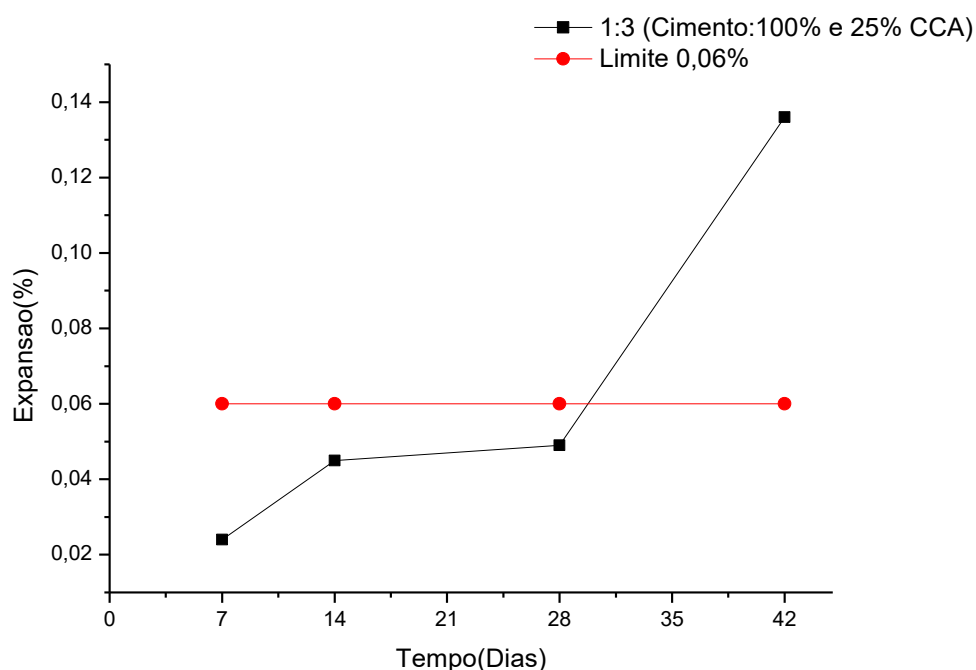


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Os valores obtidos para as expansões das argamassas incorporadas com resíduos de Scheelita e substituição de 15% do cimento Portland pela CCA calcinada a 800°C aos 7, 14, 28 e 42 dias de exposição ao ataque por sulfato de sódio obtiveram valores mais alto que o limite (0,06%) estabelecido pela norma ASTM C 452 (2002).

A Figura 5 ilustra a curva das expansões obtidas pela argamassa com 25% de substituição parcial do cimento Portland pela CCA calcinada a 800° C e 100% de AS quando imersas em solução de sulfato de sódio ao longo dos 42d de exposição.

**Figura 5** - Expansões dimensionais ao longo dos 42d de imersão em solução de sulfato de sódio - 25% de substituição de cimento por CCA.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

O valor obtido para a expansão das argamassas incorporadas com resíduos de Scheelita e substituição de 25% do cimento Portland pela CCA calcinada a 800°C aos 42 dias de exposição ao ataque por sulfato de sódio foi mais alto que o limite (0,06%) estabelecido pela norma ASTM C 452 (2002).

Então, as argamassas estudadas não são resistentes ao ataque por sulfato quando o método de avaliação aplicado for a variação dimensional dessas barras imersas em solução de sulfato de sódio, estabelecido pela norma da ABNT NBR 13583 (2014) e se adota o limite estabelecido pela norma da ASTM C 452 (2002).

4.4 RCS das argamassas confeccionadas com AS e CCA a temperatura de 800, após serem submetidas ao ataque por sulfato de sódio ao longo dos 42d

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para resistência à compressão simples dos corpos de prova após imersão em água destilada (42 dias) e em solução de sulfato de sódio (42 dias).

**Tabela 4** - Valores de resistência à compressão simples dos CP's após ataque por sulfato.

| Substituição<br>(% de CCA) | RCS 42d de<br>Imersão em<br>água (Mpa) | Desvio<br>Padrão | RCS após 42d de imersão<br>em solução de sulfato de<br>sódio (Mpa) | Desvio<br>Padrão |
|----------------------------|----------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------|
| 15%                        | 12,22                                  | $\pm 2,45$       | 12,22                                                              | $\pm 0,98$       |
| 25%                        | 13,44                                  | $\pm 1,19$       | 12,59                                                              | $\pm 1,99$       |

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Ao analisar os valores obtidos para RCS (Tabela 4), verificou-se que a resistência dos corpos de prova após a imersão de 42 dias em solução de sulfato de sódio e imersão em água obteve não caracterizam a ocorrência da degradação dessas barras após o ataque. Apesar das expansões terem demonstrado o ataque por sulfato de sódio nas argamassas estudadas. Diante disso, é possível afirmar a não ocorrência de perda mecânica da resistência, porém pode ter havido uma degradação interna (não da resistência).

## 5 CONCLUSÕES

Após a realização do estudo do ataque por sulfato de sódio de barras de argamassas confeccionadas com resíduo oriundo da mineração de Scheelita em substituição total ao agregado convencional, é possível concluir:

- As barras de argamassas confeccionadas com substituições parciais de 15% e 25% do cimento Portland pela CCA calcinada a 800° C e substituição total do agregado natural pela AS são suscetíveis ao ataque por sulfato de sódio.
- Os teores de substituição parcial pela CCA calcinada a 800° C não foram suficientes para tornar as argamassas estudadas resistentes ao ataque por sulfatos.
- O agregado AS pode ser considerado reativo à medida que ocorreu o ataque por sulfato de sódio e apresenta na sua constituição química um teor considerável de alumina.
- As argamassas estudadas não apresentam durabilidade para serem utilizadas em ambientes agressivos, ricos em sulfatos.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 452**: Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate, 2002.

AL-AKHRAS, N. M. **Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1727-1734, 2006.

ALVES, B. S.; PEREIRA, D. D.; IZÍDIO JÚNIOR, L. R.; GURGEL, M. T. Análise comparativa o agregado miúdo com o rejeito da scheelita para aplicação na construção civil. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 06 a 10 de novembro de 2016, Natal-RN. **Anais...** Natal/RN, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5737**: Cimentos Portland a sulfato- Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13583**: Cimento Portland- Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio– Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão– Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados- Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BATISTA, Larissa S. et al. ANÁLISE DA INCOPORAÇÃO DE RESÍDUO DE SCHEELITA EM CONCRETO ALTERNATIVO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2018, São Bernardo do Campo. **Anais...** . São Bernardo do Campo: Congea, 2018. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/XI-008.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2019.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 1ªed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.1, 1994. 435p.

Brown, P. W. Thaumasite formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, n° 24, 301-303, 2002.

COLLEPARDI, M. A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete. **Cement & Concrete Composites** , Amsterdã, v. 25, n. 4-5, p. 401-407, 2003.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Belo Horizonte, 2004. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg; HOTZA, Dachamir. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, [s.l.], v. 24, n. 6, p.000-000, dez. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422001000600013>.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados de conjuntura da produção de arroz (*Oryza sativa* L.) no Brasil (1985-2015): área, produção e rendimento**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2016. Disponível em: <http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>. Acesso em: 06 jun. 2019.

EMMONS, Peter H. **Concrete Repair and Maintenance**. Kingston: R. S. Means Company, 1993. 295 p. ISBN 0- 87629- 286- 4

FARIAS FILHO, J.; MENEZES, R.; FERREIRA, H. S.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos. **Revista Cerâmica**. v. 57, p. 395-403, 2011.

FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

HOPPE FILHO, J. et al. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, p.168-177, jun. 2015. FAPUNIFESP (SCIELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581905>.

FRANÇA NETA, Maria de Lourdes Xavier de. **ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO EM ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE SCHEELITA EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL AO AGREGADO CONVENCIONAL**. 2018. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Angicos, 2018.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56f. Dissertação (Especialização em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

LINHARES, A. S.; SILVA, B. T. A. **Aplicação do rejeito da scheelita em camadas granulares de pavimentos**. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; VII Congresso Luso-Brasileiro de Geotécnica; VI Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas; e VII Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 9 a 13 de setembro de 2014, Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia-GO, 2014.

MACHADO, T. G. **Estudo da adição de resíduo de scheelita em matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura**. 143 f. 2012. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. 751p.

MEIRA, L. R. **Propriedades Mecânicas e Retração do Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz Natural, Sem Beneficiamento de Moagem**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

NAKATA, Y. et al. Preparation and properties of SiO<sub>2</sub> from rice hulls. **Journal of the Ceramic Society of Japan International Edition**, v. 97, n. 8, p. 830-836, 1989

NETTO, Rafael Mantuano. **Materiais pozolânicos**. Universidade Federal de Minas Gerais, monografia apresentada no curso de especialização em engenharia civil, Escola de Engenharia da UFMG-Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto** / A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. 105 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal- RN, 2013.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J; BORRACHERO, M. V.; MELLADO, A; ORDOÑEZ, L. M. Determination of amorphous sílica in rice husk ash by a rapid analytical method. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 227-231, 2001.

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

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.

SCHMALZ, Rosana. **DURABILIDADE DE ARGAMASSAS SUBMETIDAS AO ATAQUE DE SULFATOS: EFEITO DA ADIÇÃO DA NANOSÍLICA**. 2018. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

SILVA, Carlos Adriano Rufino da. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinza de casca de arroz**. 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unesp, Ilha Solteira, 2004.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SILVEIRA, Adriana Augustin. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. 1996. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SOUZA, Diego Jesus de. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento portland**. 2016. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SOUZA, Jozilene de. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz**. 2008. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

SOUZA, Juliane Palmas de et al. **A Utilização da Cinza da Casca de Arroz da Região de Dourados em Substituição Parcial ao Agregado Miúdo em Microconcreto: Resistência Mecânica e Durabilidade**. In: ENCONTRO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 8., 2014, Dourados. **Artigo**. Dourados: UFGD, 2014.

SOUZA, Rui Barbosa de. **Suscetibilidade de Pastas de Cimento ao Ataque por Sulfato - Método de Ensaio Acelerado**. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TASHIMA, M. M. et al. Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil. **HOLOS Environment**, v. 11, n. 1, p. 81-89, 2011.