



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO CAETANO DE ALMEIDA

**ESTUDO COMPARATIVO DAS CINZAS PROVENIENTES DA USINA
TERMELÉTRICA DO PECÉM COM OUTRAS CINZAS EXISTENTES NO BRASIL
E NO EXTERIOR, NO CENÁRIO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

FORTALEZA

2017

RODRIGO CAETANO DE ALMEIDA

ESTUDO COMPARATIVO DAS CINZAS PROVENIENTES DA USINA
TERMELÉTRICA DO PECÉM COM OUTRAS CINZAS EXISTENTES NO BRASIL E NO
EXTERIOR, NO CENÁRIO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Projeto de Graduação a ser apresentado como exigência para graduação no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará.

Orientador: Alexandre Araújo Bertini

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A45e Almeida, Rodrigo Caetano de.
Estudo comparativo das cinzas provenientes da Usina Termelétrica do Pecém com outras cinzas existentes no Brasil e no exterior, no cenário da construção civil / Rodrigo Caetano de Almeida. – 2017. 87 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.
1. Cinza Volante. 2. Cinza Pesada. 3. Revisão Bibliográfica. 4. Estudo Comparativo. I. Título.
CDD 620
-

RODRIGO CAETANO DE ALMEIDA

**ESTUDO COMPARATIVO DAS CINZAS PROVENIENTES DA USINA
TERMELÉTRICA DO PECÉM COM OUTRAS CINZAS EXISTENTES NO BRASIL
E NO EXTERIOR, NO CENÁRIO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Projeto de Graduação a ser apresentado como exigência para graduação no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará.

Aprovado em: __/__/__.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Marinho de Carvalho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Marcelo Silva Medeiros Jr., PhD.
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Professor Visitante

“When do you think people die? When they are shot through the heart by the bullet of a pistol? No. When they are ravaged by an incurable disease? No. When they drink a soup made from a poisonous mushroom!? No! It’s when... they are forgotten.”

Eiichiro Oda

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Danilo Caetano de Almeida e Goretty Batista de Almeida. Muito obrigado por tudo que vocês fizeram e por tudo que ainda fazem por mim. Sem vocês eu não seria ninguém.

À minha irmã, Gabriela Batista de Almeida, por sempre me dar forças e me ajudar quando eu preciso, apesar das muitas discussões em que nos metemos.

Às minhas duas avós que são únicas dos seus respectivos jeitos e sempre fazem de tudo por mim e por toda a minha família.

Aos meus tios, tias, primos e primas que, por mais distantes que estejam, sempre me desejam o bem e torcem para o meu sucesso.

Aos queridos amigos que eu tive a sorte de encontrar na faculdade, entre eles, Renan Marinho, Bruna Alves, Rodrigo Oliveira, Thiago Tomaz e Felipe Corso. Nas horas em que o cansaço e a desmotivação batiam, vocês não sabem como me ajudaram.

Aos meus grandes amigos da época do colégio, em especial Vitor Bessa, Lucas Abreu, e Marco Castelo Branco, que me provam a cada dia que amizades verdadeiras são eternas e que o grupo “Urmininu” ainda vai durar muitos anos e conseguir muitas histórias para contar.

Ao professor Alexandre Araújo Bertini, pela orientação, pelos conselhos, por toda ajuda que me deu no decorrer da minha trajetória como aluno universitário.

À Lílian Brasileiro por toda ajuda que me deu na minha pesquisa, por sempre se colocar disponível e pelos conselhos no meu trabalho.

Aos professores Ricardo Marinho e Marcelo Medeiros, por terem aceitado de prontidão o convite de participar da minha banca examinadora.

E por fim, muito obrigado a todos que um dia me desejaram o bem. Cada pequena ação pode gerar coisas muito maiores, e quem sabe se essa pequena ação não me fez chegar aqui hoje.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

Principalmente por questões ambientais, muitos profissionais buscam a utilização, ou reutilização, de resíduos de outros processos construtivos ou industriais. Um destes resíduos é a cinza proveniente da queima de carvão mineral. Esta cinza pode ser classificada como volante ou pesada. Nos últimos anos, a busca por usos eficientes dessas cinzas no meio da construção civil vem aumentando. Entretanto, ainda há muito desperdício e má disposição deste resíduo. Com o objetivo de encontrar possíveis novos usos para as cinzas provenientes da Termelétrica do Pecém, no Ceará, primeiramente recolheu-se amostras destas cinzas para caracterização. Em seguida, através de uma revisão bibliográfica, selecionou-se estudos que utilizavam cinzas, tanto volantes como pesadas, na área da construção civil. Com dados característicos desses dois grupos de cinza, realizou-se um estudo comparativo para verificar a semelhança entre as cinzas. Após verificadas essas semelhanças, determinou-se se era possível ou não a utilização das cinzas do Pecém nestes estudos selecionados. Foram, ao todo, selecionados 30 artigos, 15 para cada tipo de cinza. Destes, foram determinados 8 cinzas leves e uma cinza pesada semelhante com as cinzas vindas do Pecém. Porém, destas cinzas, foram encontrados 6 possíveis usos para cinzas leves locais e nenhum possível uso para as cinzas pesadas locais.

Palavras-chave: Cinza Volante. Cinza Pesada. Revisão Bibliográfica. Estudo Comparativo

ABSTRACT

Particularly for environmental reasons, many professionals seek the use or reuse of waste from other construction or industrial processes. One of these residues is the ash from burning coal. This ash can be classified as a fly ash or bottom ash. In recent years, the search for efficient uses of these ashes in the middle of civil construction has been increasing. However, there is still much waste and poor disposal of this waste. In order to find possible new uses for ash from the Pecém Thermal Power Plant in Ceará, samples were first collected for characterization. Then, through a literature review, we selected studies that used ashes, both fly ashes and bottom ashes, in the area of civil construction. With characteristic data of these two ash groups, a comparative study was carried out to verify the similarity between the ashes. After these similarities were verified, it was determined whether or not it was possible to use Pecém ashes in these selected studies. There were, altogether, selected 30 articles, 15 for each type of ash. Of these, 8 fly ashes and one bottom ash were determined as similar with the ashes from Pecém. However, of these ashes, 6 possible uses for local fly ash and no possible use for local bottom ash were found.

Keywords: Fly Ash. Bottom Ash. Literature Review. Comparative Study.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem da Cinza Leve proveniente da Termelétrica do Pecém, retirada em laboratório.....	23
Figura 2 - Imagem da Cinza Pesada proveniente da Termelétrica do Pecém, retirada em laboratório.....	31
Figura 3 - Etapas Metodológicas	41
Figura 4 - Dados granulométricos da cinza leve proveniente do Pecém	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva Granulométrica da cinza leve do Pecém	52
Gráfico 2 - Curva Granulométrica da cinza pesada do Pecém	56
Gráfico 3 - Curvas Granulométricas das cinzas leves dos artigos selecionados	59
Gráfico 4 - Curvas granulométricas das cinzas pesadas dos artigos selecionados	63
Gráfico 5 - Curvas granulométricas para comparação das cinzas leves	66
Gráfico 6 - Curvas granulométricas para comparação das cinzas pesadas	70
Gráfico 7 - Curvas granulométricas que mais se aproximam da cinza proveniente do Pecém	73
Gráfico 8 - Curvas granulométricas que mais se aproximam da cinza pesada proveniente do Pecém	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos Materiais Pozolânicos quanto à Granulometria	20
Quadro 2 - Classificação dos Materiais Pozolânicos quanto à Composição Química	21
Quadro 3 - Classificação dos Materiais Pozolânicos quanto aos Índices de Atividade Pozolânica.....	21
Quadro 4 - Critério para Análise Comparativa.....	44
Quadro 5 - Artigos sobre cinzas leves selecionados, com suas nomenclaturas neste estudo...	46
Quadro 6 - Quadro Complementar, com nomenclaturas das demais cinzas leves	48
Quadro 7 - Artigos sobre cinzas pesadas selecionados, com suas nomenclaturas neste estudo	48
Quadro 8 - Quadro Complementar, com nomenclaturas das demais cinzas pesadas	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química da cinza leve do Pecém	52
Tabela 2 - Resistência à compressão dos corpos-de-prova contendo cinzas	53
Tabela 3 - Resistência à compressão dos corpos-de-prova de referência	53
Tabela 4 - Massa específica da cinza pesada do Pecém.....	55
Tabela 5 - Peso das amostras para o ensaio granulométrico	55
Tabela 6 - Dados granulométricos da cinza pesada do Pecém.....	56
Tabela 7 - Composição Química da cinza pesada do Pecém	57
Tabela 8 - Material Pulverulento da cinza pesada do Pecém	57
Tabela 9 - Massa unitária da cinza pesada do Pecém	57
Tabela 10 - Massas específicas das cinzas leves dos artigos selecionados	58
Tabela 11 - Dados granulométricos do artigo "Leve-1"	59
Tabela 12 - Dados granulométricos do artigo "Leve-5"	59
Tabela 13 - Dados granulométricos do artigo "Leve-10".....	60
Tabela 14 - Composição química das cinzas leves dos artigos selecionados	60
Tabela 15 - Índice de desempenho pozolânico das cinzas leves dos artigos selecionados.....	61
Tabela 16 - Massas específicas das cinzas pesadas dos artigos selecionados	62
Tabela 17 - Composição química das cinzas pesadas dos artigos selecionados	63
Tabela 18 - Massa unitária das cinzas pesadas dos artigos selecionados	64
Tabela 19 - Tabela comparativa das massas específicas.....	65
Tabela 20 - Comparação granulométrica com a cinza do artigo "Leve-1"	66
Tabela 21 - Comparação granulométrica com as cinzas do artigo "Leve-5"	66
Tabela 22 - Comparação granulométrica com as cinzas do artigo "Leve-10"	67
Tabela 23 - Comparação entre as composições químicas das cinzas leves	67
Tabela 24 - Comparação entre os índices de desempenho pozolânico das cinzas leves	68
Tabela 25 - Tabela comparativa entre as massas específicas das cinzas pesadas	69
Tabela 26 - Comparação entre as composições químicas das cinzas pesadas	70
Tabela 27 - Cinzas leves com massa específica aprovada no critério estabelecido	72
Tabela 28 - Cinzas leves com composição química aprovada pelo critério estabelecido.....	73
Tabela 29 - Índices de desempenho pozolânico que se encaixaram na margem de erro	74
Tabela 30 - Cinzas com propriedades semelhantes às cinzas leves do Pecém.....	75
Tabela 31 - Cinzas pesadas com massa específica aprovada pelo critério estabelecido.....	75
Tabela 32 - Cinzas pesadas com composição química aprovada pelo critério estabelecido....	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização	14
1.2 Problema de Pesquisa	16
1.3 Questões Motivadoras	16
1.4 Justificativa	16
1.5 Objetivos.....	17
1.5.1 Objetivo Geral	17
1.5.2 Objetivos Específicos	17
1.6 Estrutura do Trabalho.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Pozolana	19
2.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos.....	20
2.3 Cinzas.....	22
2.3.1 Cinzas Volantes ou Leves	22
2.3.2 Cinzas Pesadas ou de Fundo	31
3 METODOLOGIA	41
3.1 Caracterização das cinzas da Termelétrica do Pecém.....	42
3.1.1 Massa Específica.....	42
3.1.2 Distribuição Granulométrica	42
3.1.3 Requisitos Químicos e Físicos da NBR 12653:2014	42
3.1.4 Fluorescência de Raios-X	43
3.1.5 Material pulverulento.....	43
3.2 Revisão Bibliográfica.....	43
3.3 Estudo Comparativo	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Caracterização das Cinzas do Pecém.....	50
4.1.1 Caracterização das Cinzas Leves.....	50
4.1.1.1 Massa Específica da Cinza Leve	51
4.1.1.2 Caracterização Granulométrica da Cinza Leve	51
4.1.1.3 Fluorescência de Raios-X da Cinza Leve	52
4.1.1.4 Atividade Pozolânica com Cal aos 7 dias.....	53
4.1.1.5 Índice de Desempenho Pozolânico.....	53
4.1.2 Caracterização das Cinzas Pesadas.....	54
4.1.2.1 Massa Específica da Cinza Pesada	55
4.1.2.2 Caracterização Granulométrica da Cinza Pesada	55
4.1.2.3 Fluorescência de Raios-X da Cinza Pesada	56

4.1.2.4	Material Pulverulento da Cinza Pesada	57
4.1.2.5	Massa Unitária da Cinza Pesada	57
4.2	Resultados – Cinzas Volantes.....	58
4.2.1	Propriedades Físicas – Cinzas Volantes	58
4.2.2	Propriedades Químicas – Cinzas Volantes	60
4.2.3	Índice de Desempenho Pozolânico e Atividade Pozolânica com Cal.....	61
4.3	Resultados – Cinzas Pesadas.....	62
4.3.1	Propriedades Físicas – Cinzas Pesadas.....	62
4.3.2	Propriedades Químicas – Cinzas Pesadas	63
4.3.3	Material Pulverulento e Massa Unitária das Cinzas Pesadas.....	64
4.4	Comparação entre as Cinzas	65
4.4.1	Comparação entre as Cinzas Leves.....	65
4.4.2	Comparação entre as Cinzas Pesadas.....	68
4.4.3	Discussão dos Resultados	71
4.4.3.1	Discussão – Cinzas Leves	71
4.4.3.2	Discussão – Cinzas Pesadas	75
5	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A questão ambiental vem se tornando tema nos foros nacionais e internacionais, estando atualmente mais inserida na opinião pública, nas comunidades e sendo norteadora na geração de novos produtos e serviços na área industrial e comercial (SALDANHA, 2014). Devido a isso, tem-se buscado cada vez mais modificar ou adaptar diversas atividades, afim de diminuir o impacto ambiental gerado por elas.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland e o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), em todo o Brasil são gerados, a cada ano, 200 milhões de toneladas de resíduos, dos quais cerca de três milhões são altamente poluentes (ABCP, 2012). Levando isso em consideração, pode-se perceber que a indústria da construção civil, por explorar e utilizar, em excesso, diversos recursos naturais, além de gerar quantidades consideráveis de resíduos, é considerada uma das principais responsáveis por impactos gerados no ambiente. Assim, Pacheco-Torgal e Jalali (2012) afirmam que o desenvolvimento e a utilização de novas técnicas e materiais que tenham a preocupação com a questão ambiental podem contribuir para um desenvolvimento mais sustentável nos processos construtivos.

A grande produção anual de resíduos e a necessidade de minimizar os danos gerados ao meio ambiente demandam o tratamento ou armazenamento, de forma adequada, destes resíduos. Desta forma, além de evitar a degradação das áreas onde estes resíduos normalmente são depositados, a valorização dos subprodutos tem por efeito a redução do consumo de matérias primas virgens (LUZ, *et al.*, 2005). Percebe-se, portanto, a necessidade do reaproveitamento de resíduos, assunto que será tratado nesta pesquisa de maneira específica: através da utilização de cinzas na construção civil.

De acordo com Teixeira (2013), o Brasil possui uma matriz energética “limpa”, baseada no uso da hidroeletricidade e de biocombustíveis. Porém, o emprego de combustíveis como o gás natural, derivados de petróleo e carvão mineral deve aumentar nas próximas décadas. Devido às grandes reservas existentes no país, na ordem de 32 bilhões de toneladas, ao final de 1999, de acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil, o carvão é digno de

notoriedade e, por isso, o governo federal previu um incremento na geração de eletricidade por meio de termelétricas que utilizem esse combustível.

As usinas termelétricas no Brasil são do tipo convencional, ou seja, utilizam carvão pulverizado, onde a combustão do carvão se dá em altas temperaturas e, como em todo processo industrial, há a formação de resíduos, neste caso particular, cinzas provenientes da queima do carvão. Das cinzas formadas durante o processo de queima do carvão, aproximadamente 80% são cinzas volantes e 20% são cinzas pesadas (LACERDA, 2015).

Serão tratados como objetos de pesquisa os resíduos provenientes da Termelétrica do Pecém, localizada no município de São Gonçalo do Amarante, Ceará. De acordo com o Boletim Técnico 36 (2016), da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC), em regime de operação plena, o Complexo Termelétrico do Pecém produz 190 toneladas de cinzas pesadas e 900 toneladas de cinzas volantes por dia. Estas cinzas podem ser utilizadas em diversas áreas da construção civil. Segundo Silva (2013), muitas aplicações dos produtos da combustão do carvão mineral resultam em artefatos mais eficientes tecnicamente e economicamente em relação aos convencionais, como, por exemplo, a aplicação de cinzas volantes em concreto.

Para propor diversos usos para as cinzas provenientes da Termelétrica do Pecém, pretende-se realizar um estudo comparativo com diversos outros tipos de cinzas, utilizados tanto no Brasil quanto no exterior. Portanto, será feita uma ampla revisão bibliográfica, afim de auxiliar nesta comparação de resíduos. Trentini e Paim (1999) afirmam que a seleção criteriosa de uma revisão de literatura pertinente ao problema significa familiarizar-se com textos e, por eles, reconhecer os autores e o que eles estudaram anteriormente sobre o problema a ser estudado.

A qualidade das cinzas depende das propriedades do carvão, da eficiência da combustão, da alimentação de carvão pulverizado, do apropriado controle de qualidade na manutenção do tamanho das partículas, entre outros (SINGH, *et al.*, 2016). Portanto, através da revisão de literatura, serão analisadas as semelhanças entre as qualidades das cinzas da Termelétrica do Pecém e outras cinzas já utilizadas, para assim, determinar alguns possíveis usos para os resíduos estudados.

1.2 Problema de Pesquisa

É de grande interesse, econômico e ambiental, encontrar formas de minimizar os impactos gerados pela produção de energias não-renováveis. Somando-se a isso o fato da construção civil ser uma das grandes responsáveis por impactar o meio ambiente, através do grande uso de recursos naturais e da produção excessiva de resíduos, percebe-se que é muito positiva a reutilização de materiais nocivos ao ambiente, entre eles os produzidos por meios não-renováveis, na própria construção civil.

Neste sentido, percebe-se que os resíduos provenientes da Termelétrica do Pecém não estão sendo usados de maneira eficiente. Existem, possivelmente, diversas maneiras de reutilizar tais resíduos e este estudo exporá algumas delas.

1.3 Questões Motivadoras

As questões expostas abaixo são aquelas que motivam a pesquisa realizada neste trabalho:

- (a) Como será feita a caracterização das cinzas provenientes da Termelétrica do Pecém?
- (b) Como serão escolhidos os tipos de cinzas a serem comparados com as cinzas do Pecém?
- (c) Quais propriedades das cinzas serão utilizadas para a comparação?
- (d) Como será feito o estudo comparativo?
- (e) Como se dará a determinação dos possíveis usos das cinzas provenientes do Pecém após a comparação?

1.4 Justificativa

Na construção civil busca-se sempre atender, da melhor maneira possível, à tríade: qualidade, custo e tempo de construção. Procura-se sempre, por exemplo, construir um edifício de qualidade, com o menor custo e o mais rápido possível. Assim, geralmente, as inovações

tecnológicas que prevalecem nessa área são aquelas que não apresentam deficiências marcantes em nenhum destes indicadores.

Alguns pesquisadores mostram que, em diversos casos, estruturas que durante seus processos construtivos tiveram alguns materiais substituídos por cinzas provenientes de termelétricas, possuem uma qualidade igual, ou até mesmo superior, do que outras construídas tradicionalmente. Além disso, pelo fato da substituição acarretar no menor uso de matérias primas virgens, o processo construtivo acaba sendo de menor custo. Blocos de concreto feitos utilizando cinzas substituindo parcialmente o cimento, por exemplo, são mais baratos do que os tradicionais. Somando-se a isso o indicador do tempo, que com a substituição de materiais não sofre mudanças drásticas, percebe-se que o uso de cinzas provenientes de termelétrica é uma inovação viável na construção civil.

Portanto, por tratar-se de uma alternativa que diminui o impacto ambiental, pode gerar a redução de resíduos provenientes da Termelétrica do Pecém, além de apresentar possíveis vantagens construtivas, o estudo comparativo das cinzas estudadas se justifica.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é comparar as propriedades das cinzas provenientes da Termelétrica do Pecém com outras cinzas utilizadas no Brasil e no exterior afim de determinar possíveis novos usos para estas cinzas locais.

1.5.2 Objetivos Específicos

- (a) Caracterizar as cinzas provenientes da Termelétrica do Pecém;
- (b) Realizar uma revisão bibliográfica, selecionando diversos tipos de cinzas utilizadas na construção civil, nacional e internacional;

- (c) Confeccionar uma planilha com as propriedades das cinzas caracterizadas pelos diversos autores selecionados através da revisão bibliográfica do item anterior;
- (d) Comparar, com o auxílio da planilha feita, as cinzas da Termelétrica estudada e as cinzas caracterizadas em outras pesquisas.

1.6 Estrutura do Trabalho

A estrutura do trabalho foi dividida em cinco capítulos, que tem seu conteúdo explicado a seguir.

O primeiro capítulo é o de introdução, onde é realizada a contextualização do assunto a ser estudado, onde está exposta a justificativa do trabalho realizado, além de mostrar os problemas de pesquisa, as questões motivadoras, os objetivos gerais, específicos e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo engloba a revisão bibliográfica. Através de diversas pesquisas em livros, artigos, periódicos, teses, revistas especializadas, trabalhos científicos, entre outros, foi criado o embasamento teórico que ajuda a sustentar este trabalho. Conhecimentos acerca de materiais pozolânicos, tipos de cinzas e dos artigos selecionados para a realização deste estudo comparativo estão expostos neste capítulo.

O terceiro capítulo contempla a metodologia adotada ao realizar esse trabalho, demonstrando as ferramentas, os materiais e os passos que foram utilizados para se atingir o objetivo em questão.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões, demonstrando todas as características das cinzas estudadas em contraste com as características das cinzas dos artigos selecionados. Com isso, são feitas, também neste capítulo, as comparações necessárias para poder determinar os possíveis usos do material residual em questão.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões relativas ao trabalho apresentado, mostrando as considerações mais relevantes analisadas na produção do estudo, comparando os objetivos iniciais com os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pozolana

A NBR 12653:2015 expõem que o conceito de pozolana é: “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes”.

A Pozolana é um material natural ou artificial, que quando é incorporado a argamassas e concretos origina alterações nas características tecnológicas, o que resulta em propriedades superiores aos produtos sem incorporação de pozolana (SOUZA SANTOS, 1989). A resistência e durabilidade da pozolana como material cimentante pode ser testemunhado através das ruínas de obras romanas, que são relíquias que resistem ao tempo até os dias atuais (BAUER, 2008).

As primeiras evidências sobre a utilização de pozolana foram encontradas nas construções gregas da Ilha de Creta, há aproximadamente 2.000 anos a.C., onde foram utilizados fragmentos de argila calcinada em argamassas (MEHTA, 1987).

De acordo com Kaefer (1998), a origem do nome pozolana deve-se ao fato de que em aproximadamente 300 a.C., em Pozzuoli, Itália, próximo ao Monte Vesúvio, a utilização de cinza vulcânica ficou popularmente conhecida por ter sido utilizada para construir a Via Ápia, aquedutos, e o Coliseu, onde foi relatada a utilização de 1:2 de cal e pozolana.

A partir de então o termo pozolana era atribuído a materiais naturais de origem vulcânica, que possuíam propriedades semelhantes a cinza vulcânica da cidade de Pozzuoli, mas posteriormente esta definição passou a abranger outros materiais, que embora possuam origem distinta, apresentam comportamento semelhante, quanto à reação com cal na presença de água (MASSAZZA, 1993).

No Brasil, o primeiro registro de utilização de pozolana foi durante a construção de barragens, onde foram utilizadas cinzas volantes provenientes das termelétricas de Charqueadas e Candiota, localizadas no estado do Rio Grande do Sul (PRISZKULNIK, 1981).

2.2 Classificação dos Materiais Pozolânicos

Mehta (1987) afirma que as pozolanas se dividem em dois grupos quanto a sua origem, sendo natural ou artificial. A NBR 5736 (ABNT, 1991) define como naturais as pozolanas de origem vulcânica ou sedimentar, e como artificial as pozolanas resultantes de tratamento térmico ou subprodutos industriais.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), todas as pozolanas naturais possuem origem rochosa ou vulcânica, exceto a terra diatomácea. O processamento para utilização como adição geralmente envolve britagem, moagem, seleção por tamanho e ativação térmica, quando necessário. As pozolanas artificiais são subprodutos que exigem ou não algum processamento antes de ser utilizado como adição assim como secagem e pulverização.

Alguns exemplos de materiais pozolânicos naturais são os vidros e tufos vulcânicos, as argilas e folhelhos calcinados e as terras diatomáceas, e temos como exemplos de materiais pozolânicos artificiais a cinza volante, a escória de alto forno, a sílica ativa, e a cinza da casca de arroz (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A NBR-12653 (ABNT, 2015) classifica os materiais pozolânicos quanto a sua origem, dividindo em três classes, descritas da seguinte forma:

- a) Classe N: Pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas.
- b) Classe C: Pozolana gerada através da combustão de carvão mineral oriundo de usinas termoelétricas.
- c) Classe E: Pozolanas não enquadradas nas classes anteriores.

E as exigências físicas, químicas e de índice de atividade pozolânica, conforme o Quadro 1, Quadro 2 e Quadro 3.

Quadro 1 - Classificação dos Materiais Pozolânicos quanto à Granulometria

Propriedades	Classes		
	N	C	E
Material Retido na Peneira 45 μm , %máx	34	34	34

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2015)

Quadro 2 - Classificação dos Materiais Pozolânicos quanto à Composição Química

Propriedades	%	Classes de Materiais Pozolânicos		
		N	C	E
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	mín.	70	70	50
SO_3	máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de Umidade	máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao Fogo	máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na_2O	máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2015)

Quadro 3 - Classificação dos Materiais Pozolânicos quanto aos Índices de Atividade Pozolânica

Índice de Atividade Pozolânica			
	N	C	E
Com Cal aos 7 dias (MPa)	6	6	6
Com Cimento aos 28 dias (%mín.)	75	75	75
Água Requerida (%máx.)	115	110	110

Fonte: NBR-12653 (ABNT, 2015)

A American Society for Testing Materials (ASTM C 618-95) classifica os materiais pozolânicos da seguinte forma:

- Classe N: cruas ou calcinadas, oriundas de terras diatomáceas, quartzo de opalina e xistos; turfos vulcânicos e argilas.
- Classe F: Cinza volante produzida pela incineração de carvão betuminoso ou antracito, tendo atividade pozolânica.
- Classe E: Cinza oriunda de carvão betuminoso ou lignina, apresentado propriedades pozolânicas e cimentantes.

A caracterização de um material quanto às três classes depende das propriedades químicas e físicas pré-estabelecidas do material em análise, devendo atingir os parâmetros mínimos para o ser considerado pozolânico.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as classes F e E diferenciam entre si de acordo com o teor de cálcio. Sendo a classe F composta por menos de 10% de CaO e classificada como cinza de baixo teor de cálcio. E a classe E composta por 15 a 40% de CaO, classificada como cinza de alto teor de cálcio. Os autores atribuem a reação das cinzas com baixo teor de cálcio menor reação pozolânica, e as cinzas com alto teor de cálcio maior de reação pozolânica.

2.3 Cinzas

As cinzas provenientes da queima do carvão podem ser de dois tipos: (i) cinzas volantes ou leves (com fração granulométrica inferior a 100 μm). As cinzas leves são emitidas junto aos gases de exaustão e abatidas em sistemas de limpeza do tipo precipitadores eletrostáticos. (ii) cinzas de fundo ou pesadas (com fração granulométrica superior a 100 μm), são eliminadas pela parte inferior do equipamento, normalmente na forma de lama (LACERDA, 2015).

Embora a cinza pesada e a volante sejam subprodutos gerados em grande escala, a maior parte dos estudos realizados são sobre a cinza volante, pelo fato das características físicas da cinza volante serem favoráveis, necessitando o mínimo beneficiamento para a sua utilização como substituição parcial de cimento e devido a facilidade de estocagem em silos. Para a utilização da cinza pesada com o mesmo propósito seria necessário que a cinza fosse submetida à moagem e secagem prévia, o que elevaria o custo do produto (KREUZ, 2002).

2.3.1 Cinzas Volantes ou Leves

A cinza volante é um material obtido dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão, principalmente das usinas termoelétricas que queimam o carvão mineral para a produção de energia elétrica (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 1 - Imagem da Cinza Leve proveniente da Termelétrica do Pecém, retirada em laboratório.



Fonte: Autoria Própria (2017)

De acordo com a NBR 12653:2015, cinzas volantes são “resíduos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado, com atividade pozolânica”. A mesma norma explica que atividade pozolânica é a “capacidade que determinado material tem de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedades cimentícias”.

As diferenças significativas na composição mineralógica e nas propriedades dividem as cinzas volantes em duas categorias, que se diferenciam principalmente pelo teor de cálcio. As cinzas com baixo teor de cálcio possuem menos de 10 % de CaO e são, geralmente, produto de combustão de antracito e carvões betuminosos, e as cinzas com alto teor de cálcio que possuem 15 a 40% de CaO, geralmente produtos de combustão de carvões de lignita e subbetuminosos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Neville (2016) explica que, utilizando o método de Blaine, a superfície específica das cinzas volantes geralmente oscila de 250 a 600 m²/kg, o que, como afirma o autor, facilita bastante sua reação com o hidróxido de cálcio. Sobre a morfologia das cinzas volantes, este

mesmo autor esclarece que suas partículas têm formato esférico (trazendo vantagens em relação à demanda de água exigida para atingir uma determinada plasticidade nas misturas cimentícias), além de possuir elevada finura e diâmetro de partículas variando entre menos do que 1 mm.

A estequiometria do silicato de cálcio hidratado formado na hidratação do cimento Portland, em equivalência com Silva (2007), não é deveras incoerente àquela resultante da inserção de cinzas volantes ou pozolanas naturais nas misturas, todavia, a relação cálcio/silício é levemente superior. Esta relação, para Taylor (1997), é influenciada, sobretudo, pelo tempo de hidratação, teor e tipo de adição mineral incorporada à pasta de cimento, onde pozolanas muito reativas (sílica ativa, por exemplo), possuem relação cálcio/silício próxima de 1.

Yu, Y., Yu, J. e Ge (2016) afirmam que a introdução da cinza volante no concreto em substituição parcial do cimento reduz a hidratação inicial e, conseqüentemente, a resistência do composto nas primeiras idades, porém, confere melhores aspectos de compacidade e permeabilidade. Conforme estes autores, a atual produção mundial anual de cinzas de carvão é estimada em cerca de 700 milhões de toneladas, dos quais pelo menos 70% são compostos por cinza volantes.

Liu *et al.* (2016) explanam que as cinzas volantes são um dos materiais pozolânicos mais comuns e que, como demonstrado por vários estudos encontrados nas literaturas, a sua utilização em compostos cimentícios causa alta porosidade em idades precoces, o que resulta em menor resistência à penetração de íons cloreto e de dióxido de carbono neste período. No entanto, as cinzas volantes tem efeito micro filler, ou seja, de preenchimento, e reação pozolânica em idades mais avançadas, o que é benéfico para melhorar a resistência do concreto contra a entrada de substâncias nocivas durante toda a sua vida útil.

Simčič *et al.* (2015) desenvolveram uma pesquisa para avaliação do processo, a longo prazo, de penetração de cloretos em concretos com substituição parcial do cimento por dois tipos de cinza volante. Foram investigados os perfis de penetração de cloreto total e solúvel em água e profundidades de cobertura de concreto em ciclos de molhamento-secagem. Os autores obtiveram resultados satisfatórios para os concretos modificados quando comparados aos referenciais: menores profundidades de penetração de cloreto, atribuindo-se a isso a menor porosidade destes (ao longo do tempo essa diferença torna-se ainda mais evidente); menores cobrimentos necessários, tendo em conta o teor de cloreto para cloretos solúveis totais, logo, melhor resistência ao ataque de cloretos.

Puthipad *et al.* (2016) lembram que uma vez que a cinza volante é um subproduto da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, é desejável que seja reaproveitado em maior quantidade. Ainda segundo os autores, as cinzas volantes também são conhecidas por sofrerem reações pozolânicas e de hidratação, onde essas reações químicas podem manter a resistência à compressão necessária do concreto quando uma proporção de substituição adequada de cinzas volantes é empregada. Subsequentemente, a cinza volante é amplamente introduzida em compostos cimentícios devido ao seu baixo custo e alto desempenho como material suplementar ao cimento.

Um dos propósitos deste estudo é selecionar alguns artigos para realizar uma comparação das cinzas destes artigos com as cinzas da usina termelétrica do Pecém. Assim, será citado um pouco de cada artigo selecionado agora. O mesmo será feito no próximo tópico, acerca das cinzas pesadas ou de fundo.

De acordo com Gruchot *et al.* (2014), o propósito do seu artigo era examinar a possibilidade do uso de cinzas volantes, provenientes da usina termelétrica de Skawina, na Polônia, em barreiras de filtração minerais para aterros municipais e industriais ou para preenchimentos adicionais em camadas naturais impermeáveis que não possuem espessura suficiente.

Além disso, o escopo deste artigo incluía a determinação dos parâmetros geotécnicos básicos da cinza volante, assim como sua granulometria, massa específica, parâmetros de compactação, coeficientes de permeabilidade e módulo de compactação. Os parâmetros físicos das cinzas foram determinados usando métodos padrões para solos minerais (GRUCHOT, *et al.*, 2014).

A cinza volante usada neste estudo foi obtida da usina termelétrica Matla situada a, aproximadamente, 30 quilômetros de Secunda, em Mpumalanga, África do Sul. Essa usina foi a primeira das três grandes usinas termelétricas construídas no país na década de 80 e começou a ser operada completamente em Julho de 1983. (AYANDA, *et al.*, 2012).

Ayanda *et al.* (2012) afirmam que foram realizados diversos testes com as cinzas em questão, entre eles: fluorescência e difração de raios-x, análise da concentração de metais pesados, determinação do pH, determinação do tamanho das partículas e determinação da área de superfície.

As propriedades físicas, químicas e mineralógicas das cinzas volantes provenientes das usinas termelétricas “*Kolubara*”, “*Kostolac*” e “*Nikola Tesla*”, todas localizadas na Sérvia,

foram apresentadas, avaliadas e discutidas neste artigo. Além disso, foram estudadas as composições químicas, a estabilidade térmica e outras características mecânicas (TERZIC, *et al.*, 2013).

Três tipos diferentes de cinzas volantes, originadas das usinas termelétricas já citadas, foram rotuladas como “SFA1”, “SFA2” e “SFA3”, respectivamente. As cinzas volantes foram utilizadas sem passarem por nenhum tratamento prévio e sem serem misturadas com nenhum outro tipo de insumo, por se tratar de um caso aleatório para a prática. Para a análise, foram retiradas, aleatoriamente, de cada usina, amostras de 500 quilos de cinzas volantes antes delas serem levadas para o aterro. Após isso, cada amostra foi quarteada de forma que amostras menores, de 50 quilos cada, foram utilizadas para análise (TERZIC, *et al.*, 2013).

Nhan *et al* (1996) mostraram que o material utilizado para a barreira era composto por cinzas volantes, pó de cal e bentonita de cálcio. Foram realizadas análises da composição química das três substâncias.

As cinzas volantes utilizadas foram retiradas da usina elétrica Lakeview, localizada em Ontário, Canadá. São cinzas volantes de classe F com uma porcentagem de 3% de cálcio em sua composição. A pequena quantidade de cálcio nas cinzas é uma informação bastante significativa, pois mostra que é necessária a adição de hidróxido de cálcio para que o material se assemelhe mais a um cimento. O material utilizado como fonte de cálcio foi o pó de cal, que contém uma grande porcentagem de cálcio e magnésio. O terceiro componente, como citado anteriormente, foi a bentonita de cálcio, usada para aumentar a trabalhabilidade na compactação da mistura e para obter uma baixa condutividade hidráulica (NHAN, *et al.*, 1996).

O estudo das cinzas volantes como materiais substitutos em argamassas e os efeitos dessas cinzas na trabalhabilidade, analisados utilizando índices de consistência, foram apresentados neste artigo. Estas cinzas volantes, utilizadas neste trabalho, eram provenientes da Usina Termelétrica de Andorra.

Os valores de dispersão dos índices de consistência (IC) foram medidos e as correlações entre porcentagens de substituição de cinzas volantes, volumes de água e distribuições granulométricas de cinzas volantes foram estabelecidas. As relações lineares entre os valores de IC e os volumes de água foram obtidas na faixa de água de 200-225 mL (0,5 água/cimento + relação de cinzas volantes, 3,0 areia natural/cimento + relação de cinzas volantes). Um aumento do volume de água implica maiores valores de IC. As cinzas volantes originais foram separadas em quatro frações com diferentes distribuições granulométricas. Os valores de IC aumentam à medida que a superfície específica aumenta e diminuem à medida

que o diâmetro médio das cinzas volantes aumenta. Para a fração mais fina, o efeito lubrificante foi neutralizado pela adsorção de água nas superfícies das partículas de cinzas volantes. As curvas de distribuição de formas das cinzas volantes (original e suas frações) têm uma influência importante na trabalhabilidade (PERIS MORA, *et al.*, 1993).

Como parte deste trabalho foi elaborada a caracterização da cinza volante, produzida na Usina Termelétrica de Candiota, localizada a sudoeste do estado do Rio Grande do Sul. Todas as amostras estudadas foram coletadas úmidas, em quatro etapas, entre os anos de 1993 e 1994.

Para a determinação da composição mineralógica da cinza volante de Candiota foi utilizada a difração de raios X, microscopia de luz transmitida, análise térmica diferencial e análise termogravimétrica. A caracterização química foi realizada pelos laboratórios da CIENTEC, constituindo-se dos elementos maiores, elementos menores e traços. Por espectrometria de fluorescência de raios X foram analisados diversos óxidos. Por espectrometria de absorção atômica os outros elementos maiores e os menores. Nas análises físicas foram determinadas a granulometria, massa específica dos grãos, superfície específica, limites de plasticidade e liquidez e índices de atividade pozolânica com cimento e cal (WARPECHOWSKI DA SILVA, *et al.*, 1999).

O objetivo deste artigo era contribuir para a tomada de decisão sobre a definição do uso de materiais finos responsáveis pela resistência à segregação do concreto auto-adensável (CAA). Neste estudo, amostras de CAA foram dosadas com cinza volante, um material pozolânico, e areia fina, que é um material não pozolânico, utilizando o método de dosagem proposto por Tutikian & Dal Molin (2007). Foi observado que a utilização de cinza volante aumentou a resistência à compressão, principalmente nas idades mais avançadas, assim como os valores de módulo de deformação e velocidade das ondas de ultrassom. Também diminuiu a penetração de íons cloretos, para os mesmos valores de resistência em comparação com os CAA com areia fina e o custo final dos CAA com cinza volante foi inferior. Foram apresentados tanto os diagramas de dosagem como os de desempenho (TUTIKIAN, *et al.*, 2011).

Os processos de fundição compreendem as etapas de fusão e vazamento de metais em moldes, obtendo a requerida forma sólida. Dentre os materiais dos moldes empregados, a fundição com molde em areia é o processo mais comum devido ao menor custo em relação aos demais. A indústria de fundição utiliza areia misturada a resinas orgânicas, inorgânicas e mistas para composição dos machos e moldes, nos quais o metal é vazado para formar diversas peças. Esse processo gera uma grande quantidade de areia residual, denominada areia de fundição

(AF), que tem que ser descartada em aterros especiais. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica do uso da AF em substituição à areia de construção convencional em argamassas álcali-ativadas. Essas argamassas foram preparadas a partir da álcali-ativação de cinza volante e metacaulim, com quatro teores distintos de substituição de AF: 25%, 50%, 75% e 100%. Após 7 e 28 dias de cura à temperatura ambiente as amostras foram submetidas a ensaios de resistência à compressão. A caracterização microestrutural foi realizada na idade de 28 dias com o auxílio do difratômetro de raios X e do espectômetro de infravermelho. Nos diferentes traços foi percebida a necessidade de aumento de água na composição da argamassa à medida que a proporção de AF foi aumentada. Este aumento de água influenciou na queda de resistência à compressão das argamassas, na medida em que o teor de substituição de AF foi aumentado (VARGAS, *et al.*, 2015).

A cinza volante (CV) e a areia de fundição (AF) utilizadas neste trabalho foram geradas em uma usina termelétrica e em uma indústria de fundição, respectivamente, ambas localizadas no estado do Rio Grande do Sul.

As cinzas volantes, um produto de combustão de carvão, uma vez tratadas como um lixo e dispostas em aterros sanitários, são usadas hoje em obras de subestruturas e rodovias. A pesquisa de propriedades de cinzas volantes pode resolver os problemas de tratamento e uso inteligente deste material residual. Usando espécimes de testes laboratoriais, neste artigo, as propriedades físicas das cinzas volantes pozolânicas de carvão, um resíduo betuminoso da Usina Termelétrica de Iasi, localizada na Romênia, são investigadas para analisar a composição das cinzas volantes, utilizando, às vezes, a comparação com a composição daquelas de Suceava, outra usina termelétrica, também localizada na Romênia. O uso de cinzas volantes como substituição parcial do cimento Portland geralmente é limitado à cinza volante de carvão betuminoso. As cinzas volantes melhoram o desempenho do cimento tornando-o mais forte, mais durável e mais resistente ao ataque químico. A reciclagem de cinzas volantes tornou-se uma preocupação crescente nos últimos anos e a estabilização do solo envolve também a adição de cinzas volantes para melhorar o desempenho de engenharia de um determinado solo. O artigo descreve alguns benefícios do uso de cinzas volantes para o nosso meio ambiente. O uso de cinzas volantes é aceito nos últimos anos principalmente devido à economia de cimento, ao consumo de resíduos industriais e à produção de materiais duráveis, especialmente devido à melhoria da estabilização da qualidade das cinzas volantes (ROTARU, *et al.*, 2010).

Entre os vários usos das cinzas volantes, sua utilização em massa é possível apenas em aplicações de engenharia geotécnica. Isso requer caracterização da cinza volante com

referência a aplicações geotécnicas. Este artigo apresenta uma revisão desses estudos realizados. Os resultados mostram que a cinza volante é um material de drenagem livre com ângulo de atrito interno de mais de 30 graus. A massa específica é menor, levando a menores pesos da unidade resultando em pressões de terra mais baixas. Pode ser resumido que as cinzas volantes (com algumas modificações/aditivos, se necessário) podem ser efetivamente utilizadas em aplicações geotécnicas (PANDIAN, 2004).

As características químicas, mineralógicas e físicas das cinzas volantes de três usinas de energia na Índia foram avaliadas por uma variedade de métodos complementares, incluindo microscopia óptica e eletrônica, granulometria laser, difração e fluorescência de raios X e técnicas de plasma acopladas indutivamente. Análises mineralógicas e geoquímicas também foram realizadas nos carvões de alimentação das respectivas usinas, e os resultados foram utilizados para avaliar as mudanças produzidas durante diferentes processos de combustão. As diferenças de tamanho e forma de partículas para as cinzas, e também diferenças na petrologia de cinzas e mineralogia, foram relacionadas a diferenças na matéria mineral dos carvões alimentares e às características de moagem e temperaturas de combustão nas diferentes usinas. Existe um potencial de usar essas cinzas volantes como geoliner por causa de sua textura fina e baixa permeabilidade. Os testes de lixiviação também foram realizados nas cinzas, como base para avaliar o potencial de impactos adversos nos sistemas de águas subterrâneas (SHREYA, *et al.*, 2015).

Shreya *et al.* (2015) frisaram também que os materiais foram misturados com bentonita para diminuir ainda mais a permeabilidade. As composições de elementos principais e traço dessas cinzas foram determinadas. A maioria dos elementos estudados foram lixiviados em concentrações mais baixas do que as médias para os mesmos elementos de cinzas volantes europeias. Espera-se, portanto, que essas cinzas não proporcionem uma fonte significativa de contaminação adicional para permear a água, se forem usadas com bentonita, como material geoliner.

Neste estudo, objetivou-se a síntese de zeólitas, pelo processo hidrotérmico em meio alcalino, utilizando como fonte alternativa de silício as cinzas volantes de carvão e a caracterização dos produtos obtidos. As cinzas de carvão, antes de serem utilizadas no processo, passaram por um processo de secagem em estufa a 110°C por 24 horas. Para a caracterização das cinzas foram realizados ensaios de difração e fluorescência de raios X, análise termogravimétrica e avaliação da distribuição granulométrica. Tendo como base a

caracterização das amostras, pode-se destacar que foram sintetizadas zeólitas com fase majoritária sodalita, além de quartzo e mulita como subprodutos (LACERDA, 2015).

A geopolimerização é um processo de transformação de fontes ricas em óxidos de alumínio e silício em materiais ligantes com características similares às do cimento Portland hidratado. Sabe-se que é possível obter níveis satisfatórios de resistência mecânica dependendo da composição química dos materiais precursores, do proporcionamento dos materiais e das condições de cura. Neste contexto, reporta-se um estudo experimental exploratório em pastas de geopolímeros a base de cinza volante ativada com solução de hidróxido de sódio. Variaram-se a concentração molar do ativador alcalino de base hidróxido de sódio, a relação mássica entre a solução ativadora e a cinza volante, e a temperatura de cura. Evidenciou-se, assim, o potencial do emprego de geopolímeros em situações que exigem rápida liberação de elementos moldados. Com os resultados obtidos, confirmou-se o potencial do emprego do cimento geopolimérico como material de construção civil (LIVI, 2013).

O assunto deste artigo é a medida em que, durante os ciclos de molhagem e secagem, os íons de cloreto penetram em concreto modificado com cinzas volantes. Foram registrados perfis de cloreto detalhados que mostram como os teores de cloreto total e solúvel em água variam com a profundidade de penetração desses íons no concreto. Para estudar o efeito do tempo de exposição, do teor de cinzas volantes e da composição das cinzas volantes em tal penetração, utilizaram-se dois tipos diferentes de cinzas volantes como substituição parcial do cimento Portland, sendo as proporções de 0%, 20% e 50% em peso do aglutinante (SIMČIČ, *et al.*, 2015).

Este artigo apresenta um estudo de laboratório sobre o desenvolvimento da resistência do concreto contendo cinzas volantes e o melhor uso de cinzas volantes no concreto. As cinzas volantes foram adicionadas de acordo com o método de substituição parcial em misturas. Um total de 28 misturas com diferentes desenhos de mistura foram preparadas. Foram preparados quatro grupos de misturas, cada grupo contendo seis projetos de mistura e usando o conteúdo de cimento de uma das misturas de controle como base para o projeto da mistura. As cinzas volantes no valor de aproximadamente 15%, 25%, 33%, 42%, 50% e 58% do restante do teor de cimento foram adicionadas como substituição parcial do cimento. Todos os espécimes foram curados por umidade durante 28 e 180 dias antes do teste de resistência à compressão. A eficiência e o teor máximo de cinzas volantes que proporcionam a máxima resistência à compressão foram obtidos usando equações de resistência de Bolomey e Feret.

Assim, determinou-se a quantidade máxima de cinzas volantes utilizáveis com a eficiência ideal (ONER, *et al.*, 2005).

2.3.2 Cinzas Pesadas ou de Fundo

Cinzas de fundo (ou cinzas pesadas) são resíduos silicoaluminosos, produtos da combustão de carvão mineral pulverizado em leito de arraste em usinas termelétricas; são retiradas da fornalha pela sua base, caindo dentro de tanques com água de resfriamento (CHIES; SILVA; ZWONOK, 2003).

Figura 2 - Imagem da Cinza Pesada proveniente da Termelétrica do Pecém, retirada em laboratório.



Fonte: Autoria Própria (2017)

Livi (2013) expõe que a cinza pesada é composta principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, com porcentagens menores de óxido de cálcio, óxido de magnésio, sulfatos e outras combinações. Froener (2016) explicita que as características químicas das cinzas pesadas, que representam o segundo resíduo de maior relevância na indústria termoelétrica, são semelhantes às das cinzas volantes, diferenciando-se fundamentalmente pelos contaminantes presentes (metais pesados ou voláteis), densidade, granulometria e conteúdo de fases amorfas, porém, estas não são utilizadas como adição pozolânica por serem de granulometria mais

grosseira e menos reativas, não recebendo, portanto, a atenção devida na indústria da construção civil.

A autora citada anteriormente discorre que dentre as vantagens e desvantagens do seu uso, sabe-se que a baixa reatividade desta cinza pode ser melhorada por meio de beneficiamentos, tais como moagem e/ou tratamentos térmicos e que mais uma alternativa à melhoria desta reatividade é o uso combinado com outros precursores disponíveis na região, de natureza mais reativa e/ou de composição química complementar.

Sani, Muftah e Muda (2010) afirmam que estas cinzas são materiais fisicamente grosseiros, porosos, vítreos, granulares, acinzentados e incombustíveis que são recolhidos a partir do fundo de fornos de usinas termelétricas que utilizam o carvão como combustível; que a composição química da cinza produzida depende dos tipos de forno, carvão e procedimentos utilizados na termelétrica; e que a partir do processo de queima cerca de 80% do produto se tornará cinzas volantes e os 20% remanescentes serão cinzas pesadas.

Os autores supracitados comentam que muitos estudos já foram desenvolvidos e apontam que a cinza pesada tem algumas propriedades cimentantes que podem aumentar a resistência a longo prazo em comparação à misturas compostas apenas com areia natural. Estes mesmos autores estudaram a substituição parcial do agregado miúdo de origem natural pela cinza pesada em concretos especiais e inferiram que o teor de 30% de substituição foi o mais satisfatório, visto que obteve um bom desenvolvimento de resistência ao longo das idades estudadas.

Ibrahim et al. (2015) defendem que as cinzas pesadas de carvão, devido aos seus atributos de dureza e leveza, é uma boa alternativa para substituição do agregado miúdo natural. O desenvolvimento da resistência do concreto composto por estas cinzas é relativamente lento, começando, em geral, após os 28 dias de produção. Considera-se que as cinzas pesadas são utilizadas como substituição da areia no concreto devido às suas distribuições de tamanho de partícula semelhantes e massas específicas parecidas, porém, em comparação com a areia comumente utilizada, as cinzas pesadas contêm um maior teor de finos. Estes autores consideraram o teor de 10% de substituição (com relação água/cimento de 0,45) como ótimo em sua pesquisa.

Carvalho (2015) verificou na bibliografia que alguns pesquisadores desenvolveram experimentos utilizando a cinza pesada em substituição parcial do agregado miúdo natural para confecção de blocos de concreto, base para construção de estradas, argamassa e concreto. O

autor frisa que do ponto de vista ambiental e tecnológico essas pesquisas são bastante relevantes, já que um aperfeiçoamento em algumas propriedades do material que contém o resíduo é viável.

Singh e Siddique (2016) advertem que o método atual de eliminação das cinzas pesadas, em lagos, representa um risco para a saúde humana e para o ambiente já que os constituintes perigosos destas cinzas migram e podem contaminar a água subterrânea ou superficial e, portanto, afetar organismos vivos. A indústria da construção tem um enorme potencial para o uso de cinzas pesadas como material de construção visto que suas partículas têm características de intertravamento.

Os autores falam ainda que as cinzas pesadas são mais leves e mais frágeis em comparação à areia natural de rio, ou seja, possuem baixa densidade e têm uma textura porosa que se degrada facilmente sob carga ou compactação, no entanto, caso sejam derivadas de carvões com alto teor de enxofre e baixa espessura, não são intensamente porosas e são bastante densas. Em sua pesquisa os autores concluíram que este é um material adequado para ser usado como substituição parcial de areia na fabricação de concreto.

Kim e Lee (2011) verificaram a aplicação da cinza pesada como agregado miúdo e graúdo em concreto de alto desempenho. Uma areia de britagem e a fração fina da cinza pesada foram utilizadas como agregado miúdo (com diâmetro máximo de 2,36 mm) e o cascalho e a cinza pesada na fração grossa como agregados graúdos (4,75-13,2 mm). A massa específica das cinzas pesadas nas duas frações foi menor do que as dos outros agregados (30% para o miúdo e quase 40% para o graúdo); a absorção de água foi bem maior (miúdo de 0,08% para 5,45% e graúdo de 0,56% para 8,14%) e porosidade quase 10 vezes superior, porém, o módulo de finura dos dois agregados miúdos foi praticamente idêntico. Os autores realizaram substituições parciais (20, 25, 50, 75 e 100%) para cada fração isoladamente e depois uma junção das duas com 50% e 100% de cada.

Os autores supracitados avaliaram que, no estado fresco, o uso da cinza pesada como agregado miúdo quase não influenciou na trabalhabilidade do concreto, no entanto, como agregado graúdo, houve uma diminuição de até 20,8% no caso da substituição total, atribuindo este resultado à forma diferenciada, superfície mais áspera e maior porosidade. No estado endurecido houve uma redução da massa específica do concreto à medida que a proporção de cinza pesada era aumentada: no caso da substituição total das duas frações obteve-se 2000 kg/m³.

Aos 7 e 28 dias obteve-se por volta de 60 e 70MPa de resistência à compressão axial, nesta ordem, e as substituições não influenciaram fortemente. O módulo de elasticidade diminuiu de acordo com o aumento das substituições: o concreto com substituição total das duas frações alcançou resultado 49% menor em relação à amostra de controle. A resistência à flexão diminuiu quase linearmente ao passo que aumentou a proporção de substituição. Observou-se que as fissuras foram mais facilmente propagadas pelas partículas de cinza pesada, enquanto que os outros agregados eram difíceis de penetrar e, em consequência disso, a direção da propagação de fissuras foi divergente.

Park et al. (2009) estudaram o uso das cinzas volantes (adição de 20% - teor considerado ótimo em testes prévios) e das cinzas pesadas em substituições parciais e totais ao agregado graúdo natural de origem granítica (de 0 a 100%, com intervalos de 20%), em duas faixas granulométricas, separadamente (5-13 mm e 13-20mm), em concreto poroso para pavimentação. Os autores observaram uma absorção de água 15% maior na faixa de menor diâmetro máximo em relação à outra para os dois tipos de agregado, porém, as cinzas pesadas apresentaram absorção de água quase duas vezes maior em relação aos naturais.

Como resposta nos compostos, os mesmos autores alcançaram um índice de vazios e permeabilidade menor à medida que a proporção de mistura de cinza aumentou, no entanto, a diferença foi pequena. O contrário ocorreu nos ensaios de resistências à compressão e à flexão, onde os resultados tenderam a diminuir à medida que a proporção de cinza era aumentada. A ruptura dos espécimes contendo apenas agregados naturais ocorreu na interface pasta/agregado, já nos compostos com cinza pesada, ocorreu no próprio agregado. Os autores concluíram que, neste caso, para incorporações em grandes quantidades, faz-se necessário a inclusão de algum elemento de reforço que melhore a resistência à compressão e à tração.

Um estudo sobre a incorporação de cinzas pesadas de carvão, provenientes de estações de energia termelétricas, como material substituto para areia natural na produção de concreto é apresentado neste artigo. A textura geralmente grosseira, fundida e vítrea de cinzas de fundo a torna o substituto ideal para agregados naturais. O uso de cinzas de fundo no concreto apresenta vários desafios técnicos: as características físicas e mineralógicas das cinzas de fundo; o efeito sobre a demanda de água e a participação na hidratação de cimentos. Na produção do concreto, foram utilizadas substituições em volume. Duas maneiras diferentes de empregar cinzas de fundo foram usadas para compensar as proporções da mistura: uma considerando a umidade natural presente nas partículas porosas e a outra não considerando isso, buscando

manter a mesma força. Essas considerações são fundamentais, dado que o processo de extração de cinza pesada é realizado com umidade (ANDRADE, *et al.*, 2007).

A cinza pesada utilizada foi coletada da lagoa da usina termelétrica Jorge Lacerda, Santa Catarina.

Este artigo apresenta os resultados de um estudo para comparar as propriedades dos concretos preparados com o uso de areia de rio, pedras finas trituradas (PFT), cinza pesada de forno (CPF) e agregado reciclado fino (ARF) como agregados finos. Dois métodos foram utilizados para projetar as misturas de concreto: (i) relação água-cimento fixo (A/C) e (ii) faixas fixas de queda. A investigação incluiu o teste de resistência à compressão, retração de secagem e resistência à penetração de cloreto dos concretos. Os resultados do teste mostraram que, em relações A/C fixas, a resistência à compressão e a retração de secagem diminuíram com o aumento no conteúdo de CPF. ARF diminuiu a resistência à compressão e aumentou a retração de secagem do concreto. No entanto, ao projetar as misturas de concreto com um valor de queda fixo, em todas as idades do teste, quando o CPF foi usado como agregado fino para substituir agregados naturais, o concreto tinha maior resistência à compressão, menor retração de secagem e maior resistência à penetração de cloreto. Mas o uso de ARF levou a uma redução na resistência à compressão, mas aumentou os valores de retração. Os resultados sugerem que tanto CPF como ARF podem ser usados como agregados finos para produção de concreto (KOU, *et al.*, 2009).

Dois tipos de resíduos resultam da combustão de biomassa para geração de energia: cinza volante de biomassa (CVB), que é usada como fertilizante na agricultura, e cinza pesada de biomassa (CPB), atualmente sem aplicações práticas e geralmente depositada em aterros sanitários. Este estudo fornece informações significativas sobre o comportamento mecânico das argamassas feitas com CPB e a influência de várias variáveis em tais comportamentos, como o tipo de cimento, o teor de cimento, a relação de incorporação do CPB e o tipo de material substituído pelo CPB. Duas famílias de argamassa foram produzidas de acordo com o tipo de cimento aplicado. Em cada família, foram utilizados três coeficientes de substituição volumétrica de areia natural (AN) com CPB e três coeficientes de cimento. A resistência foi analisada em diferentes idades para avaliar sua evolução ao longo do tempo. Houve uma tendência decrescente com a aplicação do CPB para todas as propriedades analisadas. Diferentes comportamentos foram observados de acordo com o tipo de cimento utilizado ou o tipo de material substituído pelo CPB. Além disso, existe uma influência de porosidade e densidade na resistência devido à alta absorção do CPB, permitindo estabelecer

relacionamentos significativos entre as propriedades analisadas. Este documento comprova a viabilidade das argamassas com CPB, dependendo do tipo de cimento e da relação de incorporação do CPB (BELTRÁN, *et al.*, 2016).

A influência trazida pela incorporação de cinzas pesadas de forno (CPF) sobre as propriedades do concreto com agregados leves foi estudada sistematicamente. No total, foram projetadas seis misturas de concreto voltadas para uma resistência à compressão de 30 MPa, incluindo uma mistura de controle feita com todos os agregados de peso normal, com uma relação água/cimento de 0,6, e outras cinco misturas de concreto, com relação água/cimento de 0,39, usando 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de CPF substituindo o agregado fino natural (pedra fina triturada). Os resultados do teste mostraram que o concreto com substituição tinha menor resistência e rigidez em comparação com o concreto agregado normal. Mas, em termos de eficácia da resistência proporcionada pelo peso unitário do concreto, indicado pela resistência à compressão em MPa dividido pela densidade saturada de superfície seca, pode ser obtida uma razão satisfatória quando não mais de 50% de CPF for usado para substituir a pedra fina triturada. O teste de propriedade de isolamento térmico demonstrou que, ao usar o agregado leve poroso, a condutividade térmica poderia ser reduzida para cerca de 70% da mistura de controle. Quando mais CPF foi usado para substituir a pedra fina triturada, o valor da condutividade térmica pôde ser reduzido ainda mais. Os resultados deste estudo demonstraram que é viável produzir concreto agregado leve com alto volume de incorporação de CPF para o isolamento de construções (ZHANG, *et al.*, 2015).

A cinza pesada de biomassa pode conter uma grande quantidade de matéria orgânica, que é a propriedade mais restritiva para reutilizar este subproduto. A reutilização potencial é determinada por propriedades químicas e físicas. A presença de partículas leves e matéria orgânica confere à cinza pesada de biomassa certas características físicas e químicas que reduzem significativamente a possibilidade de reutilização. Portanto, este artigo relatou o estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas contendo cinzas pesadas de biomassa aplicando diferentes métodos de processamento. O cimento foi substituído por diferentes taxas de substituição das cinzas e várias amostras foram tratadas aplicando técnicas diferentes, como moagem, eliminação de partículas leves e combustão. Os resultados mostraram melhorias significativas nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas nas quais algum tratamento foi aplicado. A extração de partículas leves e a remoção de matéria orgânica por queima melhoraram consideravelmente o comportamento mecânico das argamassas fabricadas. Portanto, as argamassas com cinzas de base de biomassa trituradas

sem partículas flutuantes e sem matéria orgânica levaram a uma queda de força de compressão de 10% em relação à argamassa de controle. Assim, este estudo apresenta uma possibilidade de valorização de resíduos por meio da reutilização deste tipo de subproduto na fabricação de argamassa e concreto (ROSALES, *et al.*, 2017).

Objetivando ajudar na busca de novas aplicações para os subprodutos industriais, oriundos da queima de carvão mineral, este artigo apresenta um estudo em concretos com diferentes consumos de cimento, diferentes quantidades de substituição de agregados naturais por cinza pesada e diferentes quantidades de substituição do cimento por cinza pesada em dosagens com diferentes tipos de cimentos Portland. Para se fazer uma comparação mais fidedigna entre os concretos, estes foram confeccionados para um mesmo abatimento de tronco de cone. Através dos resultados obtidos das curvas de dosagens pode-se observar, nos concretos com incorporação de cinza pesada em relação aos concretos de referência, uma redução significativa no consumo de cimento para a obtenção de concretos com as mesmas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido (KREUZ, 2002).

O concreto auto-adensável é uma mistura fluída que se consolida sob seu próprio peso e que pode fluir através de elementos estruturais densamente reforçados e complexos. O objetivo deste artigo é estudar o efeito das cinzas de fundo de carvão como substituição parcial do agregado fino no concreto auto-adensável e investigar o efeito desse tipo de cinza na resistência à tração. O teste envolveu a designação de 0%, 10%, 20% e 30% de cinzas pesadas como uma substituição parcial do agregado fino com variação da taxa de água/cimento de 0,35, 0,40 e 0,45. A maior resistência à tração do concreto foi de 4,25 MPa alcançada pela amostra de controle com a proporção água/cimento de 0,35 aos 28 dias. O incremento dos níveis de substituição das cinzas resultou na redução da resistência à tração e da densidade do concreto (IBRAHIM, *et al.*, 2015).

Este artigo investiga a influência do uso de cinzas de fundo de carvão como substituição de agregados finos naturais nas propriedades do concreto no estado fresco. Foram realizados testes para a perda de água e a determinação dos tempos de ajuste e do encolhimento de plástico para avaliar o material na presença de cinzas de fundo. A influência da porosidade da cinza pesada sobre a potencial absorção de água e perda de água do material, bem como sobre o consumo de água de concretos produzidos com cinzas de fundo, também é discutida. Os resultados mostraram que, no estado fresco, os concretos produzidos com a cinza inferior são susceptíveis à perda de água e quanto maior a porcentagem de cinzas de fundo usado como uma substituição de areia natural, menor a deformação através do encolhimento de plástico. Em

conclusão, diferentes formas de mistura de cinzas de fundo resultam em concretos com diferentes propriedades no estado fresco, mas as tendências comportamentais são mantidas quando a cinza é empregada como substituto para agregados naturais (ANDRADE, *et al.*, 2009).

A resistência e a retração por secagem de concretos com a areia natural substituída por cinzas pesadas de forno a 0%, 30%, 50%, 70% e 100% em massa, foram estudadas, com relação água-cimento fixa. Os resultados mostraram que, em relações de água-cimento fixas, a resistência à compressão e a retração por secagem diminuíram com o aumento do teor de cinzas pesadas. No entanto, com trabalhabilidade fixa, a resistência à compressão foi comparável à do concreto de controle, enquanto a retração por secagem aumentou com o aumento do teor de cinzas além do nível de reposição de 30%. No entanto, 30% da areia natural pode ser substituída de forma benéfica pela cinza de fundo para produzir concreto, sem afetar de forma prejudicial as propriedades de retração por secagem (BAI, *et al.*, 2005).

As cinzas pesadas de forno utilizadas foram fornecidas pela usina elétrica Kilroot, Irlanda do Norte, no Reino Unido.

O presente estudo tem como objetivo determinar e avaliar a aplicabilidade de uma cinza pesada industrial, fornecida pela usina termelétrica de Tunçbilek, na Turquia, na indústria de concreto. Nas experiências laboratoriais, a cinza pesada foi utilizada até 25% como um substituto parcial do cimento Portland. Para poder reduzir o teor de carbono não queimado, as cinzas foram tratadas por três processos diferentes (classificação de tamanho de partícula, separação média pesada e separação eletrostática). Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que a adição de cinzas pesadas até 10% como material de substituição para o cimento Portland poderia melhorar as propriedades mecânicas do concreto e, portanto, poderia ser usado na indústria do concreto (KURAMA; KAYA, 2008).

Neste estudo, foram realizados experimentos para avaliar a utilização de cinzas de fundo como agregados finos e graúdos em concreto de alta resistência com resistência à compressão de 60-80 MPa. Em primeiro lugar, foram investigadas as características químicas e físicas das partículas de cinzas pesadas, como composições químicas, massa específica e imagens SEM. Outras experiências foram conduzidas através da substituição de cinzas finas e graúdas com areia normal e cascalho variando em porcentagens (25%, 50%, 75% e 100%). O efeito das cinzas finas e graúdas sobre as características do fluxo e a densidade da mistura de concreto foi investigado no aspecto de formas de partículas e absorção de pasta de cinzas de fundo. Foram avaliadas propriedades mecânicas, como forças de compressão e módulo de

elasticidade e resistência à flexão de concreto de alta resistência com cinzas de fundo. Além disso, também mostrou que ambos os agregados de cinzas finas e graúdas tinham maior influência sobre a resistência à flexão do que a resistência à compressão (KIM; LEE, 2011).

Este estudo avalia propriedades de qualidade e toxicidade de cinzas de fundo de carvão, como agregado graúdo, e analisa propriedades mecânicas de concreto poroso dependendo das taxas de mistura dessas cinzas. Como resultado, a solidez e a resistência à abrasão do agregado graúdo de cinzas de carvão foram satisfeitas de acordo com o padrão de agregados para o concreto. À medida que a taxa de mistura das cinzas pesadas de carvão aumentou, a influência da razão de vazio e do coeficiente de permeabilidade foi muito pequena, mas a resistência à compressão e à flexão diminuíram. Quando a cinza de fundo foi misturada em 40%, a resistência diminuiu drasticamente. Além disso, à medida que a taxa de mistura de cinzas de carvão aumentou, foi confirmado que os espécimes de teste foram destruídos por fratura agregada mais do que a fratura de aglutinante e fratura de interface. Para utilizar cinzas de carvão em grandes quantidades, pensa-se que um método de melhoria em relação à resistência deve ser discutido, como a incorporação de materiais de reforço e a melhoria da dureza agregada (PARK, *et al.*, 2009).

Neste estudo, além das cinzas pesadas utilizadas como agregado graúdo, também foram caracterizadas e utilizadas cinzas volantes provenientes da mesma usina termelétrica. Portanto, para o estudo comparativo, que será exposto mais a frente neste relatório, os dados deste artigo serão usados para comparação tanto das cinzas pesadas como das cinzas leves.

Este artigo apresenta o uso de cinzas de fundo lavadas como agregado fino em concreto especial. A cinza de fundo lavada é um material residual que é retirado da usina elétrica e o material fonte é chamado de cinza de fundo. Para substituir a quantidade de uso de carbono no concreto, submergiu-se a cinza pesada completamente na água por 3 dias para produzir uma cinza lavada com baixa composição de carbono. O objetivo do estudo é investigar a viabilidade e o uso potencial de cinzas de fundo lavadas em aplicações no concreto. Os resultados das propriedades físicas e químicas das cinzas de fundo lavadas foram discutidos. Foram preparadas misturas de concreto diferentes com uma proporção constante de água/cimento de 0,55 com cinzas de fundo lavadas em diferentes proporções, bem como uma proporção de controle. As propriedades mecânicas do concreto especial com 30% de substituição da cinza de fundo lavada em peso de areia natural são um ótimo uso em concreto para obter uma resistência favorável e bom padrão de desenvolvimento de resistência ao longo do tempo (SANI, *et al.*, 2010).

Este artigo apresenta uma investigação experimental sobre o efeito da cinza pesada de incinerador (CPI) e do processo resfriado de CPI derretido sobre as propriedades de argamassa fresca e resistência à compressão, retração, reação de agregado alcalino e distribuição de tamanhos de poros de argamassas endurecidas. O CPI foi utilizado separa em dois tipos: um CPI original e uma cinza pesada de incinerador pulverizada (CPIP), com tamanho de partícula máximo de 4,75 e 0,074 mm e utilizadas para substituir parcialmente a areia e o cimento Portland, respectivamente. As características de atividade pozolânica da cinza pulverizada foram obtidas através da fusão do CPIP em um forno elétrico a 1450°C durante uma hora e refrigeradas por água (ACPI) e ar (ARCPI). Os resultados indicaram que a cinza de fundo de incinerador causou redução na resistência à compressão, massa unitária e valores de fluidez quando usada como substituição para areia e cimento. No entanto, o CPI pode ser processado por fusão para recuperar a atividade pozolânica reativa, que pode ser usada para substituir parcialmente o cimento. A incorporação de ACPI e ARCPI diminuiu a porosidade total dos poros capilares das argamassas em comparação com o CPIP comum. Portanto, ACPI e ARCPI podem atuar como um material de cimento ou como um enchimento inerte em compósitos à base de cimento (CHENG, 2012).

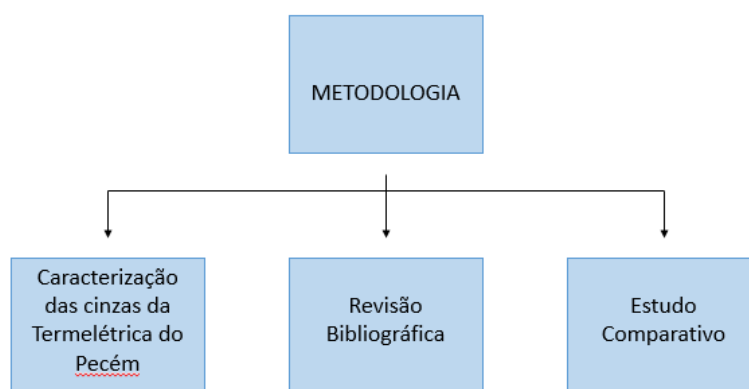
Um estudo experimental foi realizado para avaliar as propriedades do concreto autoadensável feito com cinzas pesadas de carvão. As misturas foram preparadas com quatro porcentagens (0, 10, 20 e 30) de cinzas de fundo de carvão como substituição parcial de agregados finos. As propriedades investigadas foram: consistência, resistência à compressão, resistência à abrasão, permeabilidade rápida ao cloreto, absorção de água e corrosão. Os testes de resistência à compressão, resistência à abrasão e permeabilidade ao cloreto foram conduzidos até a idade de 365 dias, enquanto os testes de absorção de água e corrosão foram conduzidos até a idade de 28 dias. Os resultados dos testes indicaram que as misturas de concreto autoadensável desenvolveram uma resistência à compressão aos 28 dias entre 25,8 e 35,2 MPa. As misturas feitas com cinzas pesadas apresentaram resistência a permeabilidade de cloretos muito baixa. A resistência à abrasão, a absorção de água e a corrosão das misturas de concreto aumentaram com o aumento do teor de cinzas no fundo de uma determinada idade, no entanto, diminuíram com o tempo (SIDDIQUE, 2013).

3 METODOLOGIA

O método a ser utilizado no desenvolvimento da pesquisa é de caráter fundamentalmente experimental e será desenvolvido em três etapas. A etapa 1 consistirá na análise técnica: caracterização das cinzas volantes e das cinzas pesadas, provenientes da Termelétrica do Pecém. Esta etapa será feita em conjunto com o trabalho “Utilização de cinzas de termelétrica na confecção de blocos de concreto para alvenaria”, idealizado por Francisca Lilian Cruz Brasileiro, mestranda do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará.

A etapa 2 consistirá de uma ampla revisão bibliográfica, onde serão selecionados trabalhos de diversos autores, relacionados com usos de cinzas em diversas áreas da construção civil. Com a seleção destes trabalhos, será confeccionada uma planilha compilando os dados característicos de cada tipo de cinza estudada. Em seguida, na etapa 3, será feito um estudo comparativo entre as características das cinzas da Termelétrica do Pecém e das cinzas compiladas na planilha.

Figura 3 - Etapas Metodológicas



Fonte: Autoria Própria (2017)

3.1 Caracterização das cinzas da Termelétrica do Pecém

3.1.1 Massa Específica

A realização deste ensaio é muito importante, visto que a massa específica é uma propriedade essencial para a escolha de materiais. Isso se deve à circunstância de que, para um melhor efeito de comparação, o volume de cada material a ser utilizado na confecção dos traços deve ser o mesmo, e não a massa. Assim, cada traço será desenvolvido em massa, porém, com compensação da massa específica, promovendo, então, uma substituição em volume. Para a cinza volante em estudo, segue-se o método proposto pela NBR NM 23:2001, já para a fração miúda da cinza pesada utiliza-se o recomendado na NBR NM 52:2009, enquanto que para a fração graúda da cinza pesada acompanha-se o fixado pela NBR NM 53:2009.

3.1.2 Distribuição Granulométrica

Como a pesquisa se trata de substituições, a análise comparativa da granulometria dos materiais comumente utilizados e dos resíduos em estudo é de suma importância. Caso a distribuição granulométrica destes seja muito distinta, o estudo da substituição é um tanto comprometido. No caso da cinza volante em estudo, este ensaio se dá pela granulometria a laser, que foi realizada pela equipe da Companhia de Cimentos Apodi, em Quixeré – CE, enquanto que para a cinza pesada cumpre-se o indicado pela NBR NM 248:2003.

3.1.3 Requisitos Químicos e Físicos da NBR 12653:2014

A norma de requisitos para classificação de um material como pozolânico (NBR 12653:2015) apresenta requisitos físicos e químicos para sua certificação. Alguns dos ensaios exigidos são: soma dos teores dos óxidos de silício, alumínio e ferro (NBR NM 22:2012); teor de óxido sulfúrico (NBR NM 16:2012); material retido na peneira 45 µm (NBR 15894-3:2010); índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle (NBR 5752:2014); atividade pozolânica com cal aos sete dias (NBR 5751:2015). Em alguns casos, os

métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland ou o metacaulim pelo material pozolânico estudado, neste caso, as cinzas volante e pesada.

3.1.4 Fluorescência de Raios-X

A relevância deste ensaio se dá pela informação dos elementos químicos e de suas concentrações na composição dos resíduos estudados. Com isso é possível entender a influência que as substituições entre materiais e as cinzas provenientes da termelétrica possam vir a causar nas propriedades dos materiais modificados. Este ensaio será realizado pela equipe do Laboratório de Raios-X da Universidade Federal do Ceará.

3.1.5 Material pulverulento

Este ensaio é regido pela NBM NM 46:2003 e determina o material fino que passa através da peneira de 75 mm, por lavagem. Será realizado na cinza pesada em estudo. No caso dos blocos de vedação, onde há pouco consumo de cimento, a presença de material pulverulento não é tão deletéria ao bloco, podendo até ajudar na compactidade da mistura. Entretanto, no caso dos blocos estruturais, este material fino em grandes quantidades acaba prejudicando a ação do cimento e comprometendo a resistência final do bloco. Por isso, a realização deste ensaio também é importante.

3.2 Revisão Bibliográfica

Nesta etapa realizou-se uma ampla pesquisa que teve como intuito selecionar trabalhos, tanto nacionais quanto internacionais, com relação e utilizando tanto cinzas volantes, ou leves, como cinzas pesadas, ou de fundo. O critério para esta seleção foi a relevância destes trabalhos para o cenário da construção civil, área onde a pesquisa está focada. Foram selecionados 30 artigos ao todo, sendo 15 focados em cinzas leves e 15 com foco em cinzas pesadas.

Foram analisadas as características das cinzas, tanto volantes quanto pesadas, dos trabalhos selecionados e, com isso, foram confeccionadas tabelas, compilando essas propriedades características para, em seguida comparar as cinzas selecionadas com as cinzas provenientes do Pecém.

3.3 Estudo Comparativo

Após caracterizar as cinzas provenientes da termelétrica do Pecém e selecionar artigos focados tanto em cinzas leves quanto em cinzas pesadas, comparou-se estes dois grupos de dados.

A margem de erro foi fixada em $\pm 10\%$. Isso quer dizer que foi considerado como aceitável as características das cinzas dos artigos selecionados dentro desta margem. Porém, além disso, foi feita uma análise individual de cada caso comparativo. O motivo disto é o fato de existirem características mais relevantes do que outras em cada estudo. Em alguns estudos, por exemplo, não teria sentido descartar uma cinza com dados de massa específica e composição química aceitáveis por que sua área específica ficou fora da margem de erro.

Quadro 4 - Critério para Análise Comparativa

Critério de Avaliação	Variação Percentual
Margem de Erro	$\pm 10\%$

Fonte: Autoria Própria (2017)

A comparação granulométrica foi realizada de maneira visual, através de gráficos contendo as curvas granulométricas tanto das cinzas do Pecém como das cinzas dos artigos selecionados.

Por fim, Rotaru e Boboc (2010) afirmaram que, em geral, as cinzas provenientes da queima de carvão mineral têm sua composição química dividida em três grupos. O primeiro possui pouca reatividade com água mas tem carga elétrica de superfície, e é formado por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Para este estudo, este grupo será chamado de “Grupo I”. O segundo é formado por metais absorvidos pelas superfícies dos óxidos. Por representarem apenas uma pequena

parcela da composição das cinzas, este grupo será desconsiderado neste estudo. E, por fim, o terceiro é formado por componentes com alta reação com a água, como compostos com Cálcio ou Potássio, que podem fazer com que a cinza apresente características cimentícias. Neste estudo, este grupo será chamado de “Grupo II”. Portanto, para a comparação das composições químicas das cinzas, foi calculada a variação percentual dos “Grupos I e II” de componentes químicos, com os valores das cinzas provenientes do Pecém como referência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados deste estudo são: os dados da caracterização das cinzas da Usina Termelétrica do Pecém, a exposição dos dados das caracterizações das cinzas dos artigos selecionados na revisão bibliográfica e a comparação entre os dois grupos de dados citados.

Os resultados serão expostos em quatro diferentes tópicos: “Caracterização das Cinzas do Pecém”, “Resultados – Cinzas Volantes”, “Resultados – Cinzas Pesadas” e “Comparação entre as Cinzas”. Além disso, dados característicos de diferentes propriedades (físicas, químicas, entre outras) das cinzas também serão mostrados separadamente. É importante ressaltar que alguns artigos selecionados não possuem caracterizações completas das cinzas. Foram selecionados trabalhos que apresentaram apenas dados referentes às propriedades químicas das cinzas, por exemplo.

A seguir, com o objetivo de facilitar o manuseio e a compreensão dos dados, estão expostos quadros citando os artigos selecionados, seus autores principais, o ano em que foram publicados e a nomenclatura que será utilizada para se referir às suas cinzas.

Quadro 5 - Artigos sobre cinzas leves selecionados, com suas nomenclaturas neste estudo

Artigos – Cinzas Volantes ou Leves			
Artigo	Autores	Ano	Nomenclatura
Usability of fly ash for filtration barriers	Gruchot, A.; et al.	2014	Leve-1
Characterization of fly Ash generated from Matla Power Station in Mpumalanga, South Africa	Ayanda, O. S.; et al.	2012	Leve-2
Evaluation of Lignite Fly Ash for Utilization as Component in Construction Materials	Terzic, A.; et al.	2013	Leve-3*
Utilizing coal fly ash as a landfill barrier material	Nhan, C. T.; et al.	1996	Leve-4
Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars	Peris Mora, E.; et al.	1993	Leve-5*
Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico	Warpechowski da Silva, N. I.; et al.	1999	Leve-6
Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante	Tutikian, B. F.; Dal Molin, D.	2011	Leve-7

(Continuação)

Artigos – Cinzas Volantes ou Leves			
Artigo	Autores	Ano	Nomenclatura
Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição	de Vargas, A. S.; et al.	2015	Leve-8
Material used in substructure and road works: physical characteristics of Pozzolana fly ash from thermal power plant of Iasi, Romania	Rotaru, A.; Boboc, V.	2010	Leve-9*
Fly ash characterization with reference to geotechnical Applications	Pandian, N. S.	2004	Leve-10*
Multi-technique study of fly ash from the Bokaro and Jharia coalfields (Jharkhand state, India): A contribution to its use as a geoliner	Shreya, N.; et al.	2015	Leve-11*
Síntese e caracterização de zeólita tipo sodalita obtida a partir de cinzas volantes de carvão mineral utilizado na usina termoeletrica de Candiota-RS	Lacerda, L. V.	2015	Leve-12
Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio	Livi, C. N.	2013	Leve-13
Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles	Simcic, T; et al.	2015	Leve-14*
An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete	Oner, A.; et al.	2005	Leve-15

Fonte: Autoria Própria (2017)

Pode-se perceber no quadro acima, na coluna “Nomenclatura”, que alguns elementos estão marcados com “*”. Isso significa que estes artigos possuem mais de uma amostra de cinza volante, de origens diferentes, caracterizada. Por isso, como complemento ao quadro recém apresentado, temos o quadro a seguir:

Quadro 6 - Quadro Complementar, com nomenclaturas das demais cinzas leves

Artigo	Cinzas Caracterizadas	Nomenclatura
Evaluation of Lignite Fly Ash for Utilization as Component in Construction Materials	SFA1	Leve-3.1
	SFA2	Leve-3.2
	SFA3	Leve-3.3
Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars	T0	Leve-5.1
	T1	Leve-5.2
	T2	Leve-5.3
	T3	Leve-5.4
	T4	Leve-5.5
Material used in substructure and road works: physical characteristics of Pozzolana fly ash from thermal power plant of Iasi, Romania	Iasi (I)	Leve-9.1
	Suceava (S)	Leve-9.2
Fly ash characterization with reference to geotechnical Applications	Korba	Leve-10.1
	Vijayawada	Leve-10.2
	Badarpur	Leve-10.3
	Ramagundam	Leve-10.4
	Neyveli	Leve-10.5
Multi-technique study of fly ash from the Bokaro and Jharia coalfields (Jharkhand state, India): A contribution to its use as a geoliner	Bokaro	Leve-11.1
	Chandrapura	Leve-11.2
	Jharia	Leve-11.3
Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles	FA I	Leve-14.1
	FA II	Leve-14.2

Fonte: Aatoria Própria (2017)

Da mesma maneira como foi feito com as cinzas volantes, foram confeccionados quadros auxiliares, principal e complementar, para as cinzas pesadas. Eles estão apresentados a seguir.

Quadro 7 - Artigos sobre cinzas pesadas selecionados, com suas nomenclaturas neste estudo

Artigos - Cinzas Pesadas ou de Fundo			
Artigo	Autores	Ano	Nomenclatura
Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement	Andrade, L. B.; et al.	2007	Pesada-1

(Continuação)

Artigos - Cinzas Pesadas ou de Fundo			
Artigo	Autores	Ano	Nomenclatura
Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates	Kou, S. - C.; Poon, C. -S.	2009	Pesada-2
Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash	Beltrán, M. G.; et al.	2016	Pesada-3
Use of Furnace Bottom Ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties	Zhang, B.; Poon, C. -S.	2015	Pesada-4
Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars	Rosales, J.; et al.	2017	Pesada-5*
Utilização de cinzas pesadas de termelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos	Kreuz, A. L.	2002	Pesada-6
Split Tensile Strength on Self-compacting Concrete Containing Coal Bottom Ash	Ibrahim, M. H. W.; et al.	2015	Pesada-7
Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete	Andrade, L. B.; et al.	2009	Pesada-8
Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate	Bai, Y.; et al.	2005	Pesada-9
Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture	Kurama, H.; Kaya, M.	2008	Pesada-10
Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high- strength concrete	Kim, H. K.; Lee, H. K.	2011	Pesada-11*
An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea	Park, S. B.; et al.	2009	Pesada-12*
The Properties of Special Concrete Using Washed Bottom Ash (WBA) as Partial Sand Replacement	Sani, M. S. H. M.; et al.	2010	Pesada-13
Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars	Cheng, A.	2012	Pesada-14
Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash	Siddique, R.	2013	Pesada-15*

Fonte: Autoria Própria (2017)

Quadro 8 - Quadro Complementar, com nomenclaturas das demais cinzas pesadas

Artigo	Cinzas Caracterizadas	Nomenclatura
Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars	BBA	Pesada-5.1
	BBA-NL	Pesada-5.2
	BBA-CO	Pesada-5.3
	BBA-CO-NL	Pesada-5.4
	BBA-C	Pesada-5.5
	BBA-C-NL	Pesada-5.6
	BBA-C-CO	Pesada-5.7
	BBA-C-CO-NL	Pesada-5.8
Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete	Fine Bottom Ash	Pesada-11.1
	Coarse Bottom Ash	Pesada-11.2
An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea	Fly Ash	Leve-16
	Coal Bottom Ash	Pesada-12
Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars	IBA	Pesada-14.1
	AIBA	Pesada-14.2
	WIBA	Pesada-14.3
Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash	Fly Ash	Leve-17
	Bottom Ash	Pesada-15

Fonte: Autoria Própria (2017)

Percebe-se no quadro 8 a existência de cinzas volantes caracterizadas, “Leve-16” e “Leve-17”. Isto se deve pelo fato de que dois dos quinze artigos selecionados para o estudo comparativo das cinzas pesadas também apresentaram estudos acerca de cinzas leves. Portanto, estes estudos complementares foram aproveitados neste trabalho.

4.1 Caracterização das Cinzas do Pecém

4.1.1 Caracterização das Cinzas Leves

4.1.1.1 Massa Específica da Cinza Leve

Por se tratar de um material em pó, a massa específica da cinza leve foi encontrada seguindo o método proposto pela NBR NM 23:2001, como citado anteriormente, utilizando o frasco volumétrico de Le Chalelier.

Tomou-se cuidados especiais quanto a formação de bolhas dentro do frasco citado, realizando-se vibrações e batidas manuais para que estas bolhas fossem expulsas. Outro problema foi a presença de material suspenso na água, que possivelmente fazia parte das plerosferas presentes no material. Devido à presença reduzida deste material, ele não foi considerado no cálculo.

Assim, o valor encontrado para a massa específica da cinza leve proveniente da Termelétrica do Pecém foi de 2,23 g/cm³.

4.1.1.2 Caracterização Granulométrica da Cinza Leve

A granulometria da cinza leve foi realizada por um processo a laser. A seguir, na Figura 4, encontra-se uma imagem com os resultados obtidos com esse processo, mostrando as porcentagens em volume referentes à cada tamanho dos grãos das cinzas.

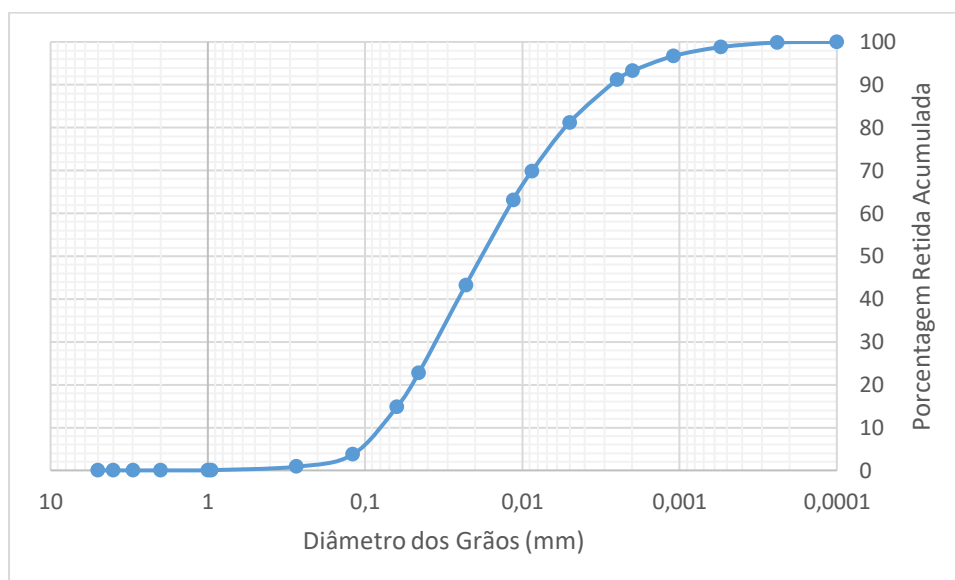
Figura 4 - Dados granulométricos da cinza leve proveniente do Pecém

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.59	11.482	3.65	120.226	1.16	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.70	13.183	3.83	138.038	0.76	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.01	1.445	0.82	15.136	3.99	158.489	0.43	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.02	1.660	0.98	17.378	4.13	181.970	0.21	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.04	1.905	1.16	19.953	4.23	208.930	0.15	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.06	2.188	1.35	22.909	4.28	239.883	0.12	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.08	2.512	1.56	26.303	4.26	275.423	0.13	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.11	2.884	1.77	30.200	4.17	316.228	0.14	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.15	3.311	1.99	34.674	4.03	363.078	0.12	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.20	3.802	2.19	39.811	3.83	416.869	0.11	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.25	4.365	2.39	45.709	3.60	478.630	0.09	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.30	5.012	2.58	52.481	3.36	549.541	0.07	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.33	5.754	2.76	60.256	3.09	630.957	0.06	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.37	6.607	2.94	69.183	2.80	724.436	0.05	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.41	7.586	3.11	79.433	2.46	831.764	0.03	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.45	8.710	3.29	91.201	2.06	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.51	10.000	3.47	104.713	1.61	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

Fonte: Relatório emitido pela Companhia de Cimentos Apodi, em Quixeré – CE (2017)

Com estes resultados, foi possível traçar o gráfico granulométrico da cinza em questão. Para isto, foi utilizado o *software Excel*.

Gráfico 1 - Curva Granulométrica da cinza leve do Pecém



Fonte: Autoria Própria (2017)

4.1.1.3 Fluorescência de Raios-X da Cinza Leve

Como citado anteriormente, esse ensaio foi realizado pela equipe do Laboratório de Raios-X da Universidade Federal do Ceará. Por se tratar de um ensaio realizado com materiais em forma de pó, a cinza volante foi enviada em seu estado natural. Abaixo encontra-se uma tabela, expondo os dados encontrados:

Tabela 1 - Composição Química da cinza leve do Pecém

Óxidos (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	Cl	SrO	P_2O_5	Rb_2O	ZrO_2	ThO_2
Material												
Cinza Volante	48,81	14,66	16,72	3,05	9,13	3,66	-	0,51	3	0,06	0,28	0,12

Fonte: Autoria Própria (2017)

4.1.1.4 Atividade Pozolânica com Cal aos 7 dias

O experimento é determinado pela ABNT NBR 5751:2015. A norma de materiais pozolânicos (ABNT NBR 12563:2015) apresenta alguns requisitos para a classificação dos materiais deste tipo e fixa um valor mínimo de 6 MPa para este ensaio. Utilizando a cinza volante em estudo, obteve-se 6,83 MPa.

4.1.1.5 Índice de Desempenho Pozolânico

Este ensaio, como citado no tópico 3, foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5752:2014. Foram preparados seis corpos de prova padrões, moldados apenas com cimento, e seis corpos de prova moldados com 25% de material pozolânico, no caso, cinza volante. Em seguida, todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, e as tabelas 2 e 3 foram confeccionadas, excluindo-se os dois maiores valores do grupo das cinzas volantes e os dois menores valores do grupo padrão.

Tabela 2 - Resistência à compressão dos corpos-de-prova contendo cinzas

Índice de Desempenho Pozolânico com cimento – CINZA		
Identificação	Resistência à Compressão (Mpa)	Desvio Relativo
CP2	29,37	1,24%
CP3	29,33	1,37%
CP5	29,00	2,48%
CP6	31,25	5,09%
MÉDIA	29,74	
DESVIO PADRÃO	1,02	

Fonte: Aatoria Própria (2017)

Tabela 3 - Resistência à compressão dos corpos-de-prova de referência

Índice de Desempenho Pozolânico com cimento - PADRÃO		
Identificação	Resistência à Compressão (Mpa)	Desvio Relativo
CP1	29,23	2,51%
CP3	26,93	5,56%

(Continuação)

Índice de Desempenho Pozolânico com cimento - PADRÃO		
Identificação	Resistência à Compressão (Mpa)	Desvio Relativo
CP5	29,63	3,91%
CP6	28,27	0,86%
MÉDIA	28,52	-
PADRÃO	1,20	-

Fonte: Autorial Própria (2017)

Por fim, utilizando as médias das resistências à compressão calculadas, foi aplicada a seguinte fórmula, retirada da ABNT NBR 5752:2014, para o cálculo do índice de desempenho pozolânico com cimento Portland aos 28 dias da cinza leve:

$$I_{cimento} = \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \cdot 100$$

Onde,

$I_{cimento}$ é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, expresso em porcentagem;

f_{CA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento Portland, expressa em MPa;

f_{CB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento e 25% de material pozolânico.

Assim, encontrou-se para a cinza volante um $I_{cimento}$ igual à 104,21%. Esse valor é bastante positivo para as cinzas em questão pois mostra que, aos 28 dias, em média, as cinzas volantes conseguiram uma resistência maior do que aquela encontrada nos corpos de prova tradicionais, utilizando apenas cimento.

4.1.2 Caracterização das Cinzas Pesadas

4.1.2.1 Massa Específica da Cinza Pesada

Existem normas brasileiras que prescrevem métodos para determinação da massa específica de agregados miúdos (ABNT NBR NM 52:2009) e agregados graúdos (ABNT NBR NM 53:2009). Por este motivo, a cinza pesada foi separada em duas frações por meio de um corte na peneira de abertura #4,75 mm, sendo considerado como agregado miúdo o que passou nesta e como agregado graúdo o que ficou retido.

Tabela 4 - Massa específica da cinza pesada do Pecém

Massa Específica (g/cm³)	
Cinza pesada (miúdo)	Cinza pesada (graúdo)
1,97	1,1

Fonte: Autoria Própria (2017)

4.1.2.2 Caracterização Granulométrica da Cinza Pesada

Para a determinação da curva granulométrica da cinza pesada foi realizado o estabelecido pela ABNT NBR NM 248:2003. Foram preparadas duas amostras de cinzas e elas foram peneiradas manualmente.

Tabela 5 - Peso das amostras para o ensaio granulométrico

	Peso das Amostras (g)
Cinza Pesada - Amostra 1	11887
Cinza Pesada - Amostra 2	12956
Cinza Pesada – Média	12421,5

Fonte: Autoria Própria (2017)

Tabela 6 - Dados granulométricos da cinza pesada do Pecém

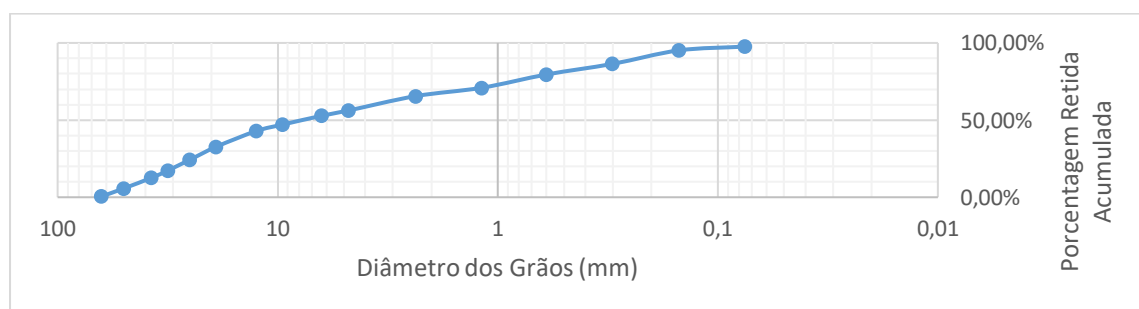
Peneira ABNT		Granulometria								
Nº	Malha (mm)	Cinza Pesada 1			Cinza Pesada 2			Cinza Pesada - Média		
		Peso (g)	Individual (%)	Acumulada (%)	Peso (g)	Individual (%)	Acumulada (%)	Peso (g)	Individual (%)	Acumulada (%)
-	63	0	0,00	0,00	146,00	1,13	1,13	-	0,56%	0,56%
-	50	831	6,99	6,99	437,00	3,37	4,50	-	5,18%	5,75%
-	37,5	1026	8,63	15,62	646,00	4,99	9,49	-	6,81%	12,55%
-	31,5	592	4,98	20,60	602,00	4,65	14,13	-	4,81%	17,37%
-	25	999	8,40	29,01	726,00	5,60	19,74	-	7,00%	24,37%
-	19	1033	8,69	37,70	1041,00	8,03	27,77	-	8,36%	32,73%
-	12,5	1058	8,90	46,60	1481,00	11,43	39,20	-	10,17%	42,90%
-	9,5	420	3,53	50,13	628,00	4,85	44,05	-	4,19%	47,09%
-	6,3	659	5,54	55,67	762,00	5,88	49,93	-	5,71%	52,80%
4	4,75	363	3,05	58,73	500,00	3,86	53,79	-	3,46%	56,26%
8	2,36	1139	9,58	68,31	1160,00	8,95	62,74	-	9,27%	65,53%
16	1,18	516	4,34	72,65	846,00	6,53	69,27	-	5,44%	70,96%
30	0,6	1159	9,75	82,40	961,00	7,42	76,69	-	8,58%	79,55%
50	0,3	771	6,49	88,89	948,00	7,32	84,01	-	6,90%	86,45%
100	0,15	813	6,84	95,73	1375,00	10,61	94,62	-	8,73%	95,17%
	<0,150	218	1,83	97,56	400,00	3,09	97,71	-	2,46%	97,63%
Total		11597	97,56	-	12659,00	97,71	-	-	97,63%	-
DMAX		-	-	50	-	-	50	-	-	50
Módulo de Finura		-	-	4,67	-	-	4,41	-	-	0,05

Fonte: Autoria Própria (2017)

Obteve-se um diâmetro máximo característico (D_{MAX}) de 50 mm e um módulo de finura de 4,54 considerando apenas a fração miúda e de 5,46 na amostra como um todo.

Semelhante ao que foi realizado no tópico 4.1.1.2 com as cinzas volantes, foram utilizados os dados granulométricos médios da cinza pesada para traçar sua curva granulométrica. Utilizou-se, para tal, o *software Excel*.

Gráfico 2 - Curva Granulométrica da cinza pesada do Pecém



Fonte: Autoria Própria (2017)

4.1.2.3 Fluorescência de Raios-X da Cinza Pesada

Como citado anteriormente, este ensaio é realizado com materiais em forma de pó. Portanto, a cinza pesada como agregado miúdo foi peneirada na #0,15 mm e, para a obtenção

de pó na cinza pesada como agregado graúdo, foi utilizado um moinho de bolas e a mesma peneira citada anteriormente.

Tabela 7 - Composição Química da cinza pesada do Pecém

Óxidos (%)	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>CaO</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Cl</i>	<i>SrO</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>Rb₂O</i>	<i>ZrO₂</i>	<i>ThO₂</i>
Material												
Cinza Pesada Miúdo	56,94	13,46	5,56	4,06	7,31	2,59	0,08	-	-	-	-	-
Cinza Pesada Graúdo	54,63	9,17	24,9	3,3	5	2,85	-	0,16	-	-	-	-

Fonte: Aatoria Própria (2017)

4.1.2.4 Material Pulverulento da Cinza Pesada

O material pulverulento é definido como partículas minerais com dimensão inferior a 75 µm, incluindo os materiais insolúveis em água, presentes nos agregados. Esta avaliação foi definida na cinza pesada segundo a ABNT NBR NM 46:2003, também separando as duas frações granulométricas por meio da peneira de abertura #4,75 mm.

Tabela 8 - Material Pulverulento da cinza pesada do Pecém

Cinza Pesada Miúdo (%)	Cinza Pesada Graúdo (%)
12,47	0,73

Fonte: Aatoria Própria (2017)

4.1.2.5 Massa Unitária da Cinza Pesada

A análise foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006 com a amostra in natura e, em seguida, nas duas frações granulométricas, nos estados solto e compactado.

Tabela 9 - Massa unitária da cinza pesada do Pecém

	Cinza Pesada in natura (g/cm³)	Cinza Pesada Miúdo (g/cm³)	Cinza Pesada Graúdo (g/cm³)
Solto	0,727	0,807	0,484
Compactado	0,787	0,925	-

Fonte: Aatoria Própria (2017)

4.2 Resultados – Cinzas Volantes

Neste tópico, estão expostos os dados, acerca das cinzas leves, retirados dos artigos selecionados.

4.2.1 Propriedades Físicas – Cinzas Volantes

Primeiramente, serão expostos os valores das massas específicas das cinzas leves. Esta característica física estava presente em oito artigos selecionados, sendo seis artigos de cinzas leves e dois artigos de cinza pesada. Isso se deve, como já comentado, ao fato de dois artigos selecionados com enfoque nas cinzas pesadas também falarem acerca de cinza leves.

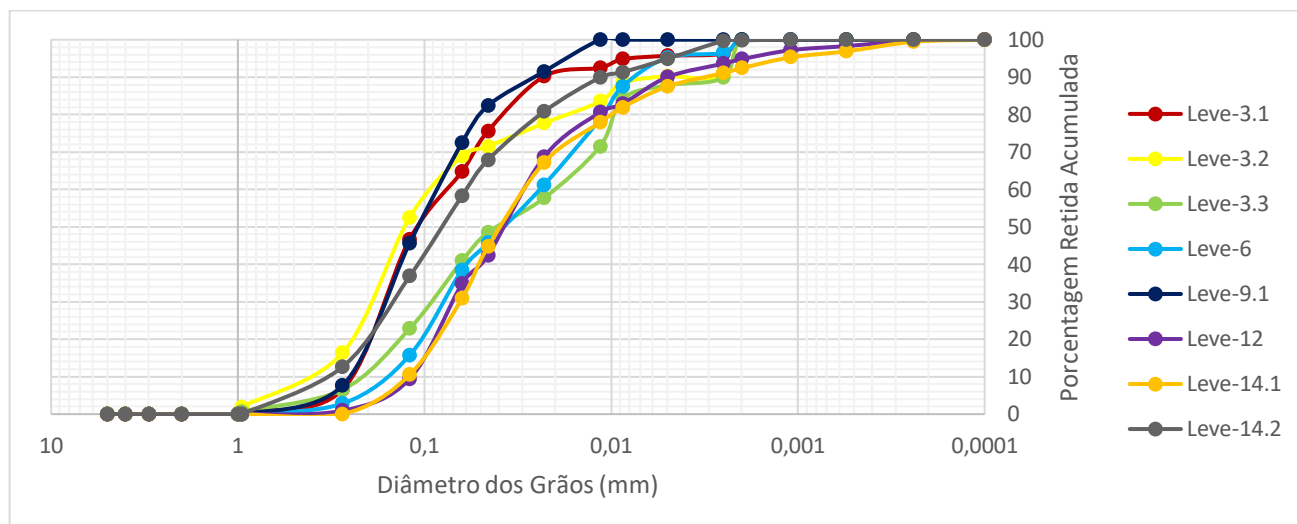
Tabela 10 - Massas específicas das cinzas leves dos artigos selecionados

Cinza	Valor (g/cm³)
Leve-1	2,2
Leve-6	2,05
Leve-7	1,92
Leve-9.1	2,209
Leve-9.2	2,165
Leve-10.1	1,98
Leve-10.2	1,95
Leve-10.3	1,97
Leve-10.4	2,18
Leve-10.5	2,55
Leve-15	2,09
Leve-16	2,1
Leve-17	2,13

Fonte: Autoria Própria (2017)

Em seguida, foi confeccionado um gráfico contendo as curvas granulométricas de todas as cinzas que tinham, em seus respectivos artigos, os dados necessários para tal.

Gráfico 3 - Curvas Granulométricas das cinzas leves dos artigos selecionados



Fonte: Autoria Própria (2017)

Além destes artigos, outros três também possuíam dados característicos acerca da distribuição granulométrica de suas cinzas, porém, eram dados mais simples, que não possibilitavam a realização do traçado de suas curvas granulométricas.

Tabela 11 - Dados granulométricos do artigo "Leve-1"

Diâmetro (mm)	Valores (%)
	Leve-1
2 - 63	-
0,063 - 2	10,5
0,002 - 0,063	81,3
< 0,002	8,2

Fonte: Autoria Própria (2017)

Tabela 12 - Dados granulométricos do artigo "Leve-5"

	% de grãos com diâmetro maior que (mm):		
	0,01	0,045	0,09
Leve-5.1	60	20	6
Leve-5.2	74	45	20
Leve-5.3	71	25	5
Leve-5.4	62	6	0
Leve-5.5	48	0	0

Fonte: Autoria Própria (2017)

Tabela 13 - Dados granulométricos do artigo "Leve-10"

	% Passante por 0,075 mm:
Leve-10.1	72,2
Leve-10.2	76,7
Leve-10.3	61,6
Leve-10.4	92,5
Leve-10.5	73,4

Fonte: Autoria Própria (2017)

4.2.2 Propriedades Químicas – Cinzas Volantes

Estas propriedades químicas se referem à quais elementos químicos fazem parte das composições das cinzas e em quais proporções. Estas informações, como já citado, são conseguidas através da Fluorescência de Raios-X.

De todas as informações retiradas dos artigos focados em cinzas leves, estas foram as mais presentes, estando em 15 artigos, somando os dois enfoques distintos da pesquisa (cinzas leves e cinzas pesadas).

Tabela 14 - Composição química das cinzas leves dos artigos selecionados

Cinzas \ Óxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cl	SrO	P ₂ O ₅	Rb ₂ O	ZrO ₂	ThO ₂	Outros
Leve-2	51,43	30,93	2,29	0,77	6,75	1,74	-	-	1,08	-	-	-	3,08
Leve-3.1	57,49	17,72	10,48	0,59	6,96	0,52	-	-	0,02	-	-	-	3,52
Leve-3.2	53,49	21,28	6,2	1,21	7,61	0,56	-	-	0,03	-	-	-	4,24
Leve-3.3	58,32	18,08	6,85	1,16	8,71	0,57	-	-	0,02	-	-	-	4,23
Leve-4	42,3	23,2	14,7	2,1	2,8	1	-	-	0,5	-	-	-	2,6
Leve-5.1	41,4	26,2	16	0,5	6,1	-	-	-	-	-	-	-	1,2
Leve-5.2	38,5	23	18,4	0,3	6,4	-	-	-	-	-	-	-	1,1
Leve-5.3	41,3	24,9	17,2	0,3	6,5	-	-	-	-	-	-	-	1,5
Leve-5.4	40,7	25,7	16,1	0,2	5,8	-	-	-	-	-	-	-	1,3
Leve-5.5	40,8	26,3	15,3	0,3	5,8	-	-	-	-	-	-	-	1,3
Leve-6	69	21,5	6,5	0,95	0,65	-	-	-	-	-	-	-	1,8
Leve-7	65,92	18,71	7,54	2,88	3,02	1,35	-	-	0,05	-	-	-	0,54
Leve-8	70,79	14,65	5,9	2,35	2,65	2,195	-	-	-	-	-	-	0,889
Leve-9.1	50,05	32,42	7,58	-	5,6	-	-	-	-	-	-	-	3,76
Leve-9.2	57,5	21,3	5,71	2,21	4,51	0,77	-	-	0,56	-	-	-	2,66
Leve-11.1	58,26	21,91	5,83	1,02	0,35	1,59	-	-	0,2	-	-	-	0,671
Leve-11.2	47,89	27,42	3,53	1,28	0,69	2,01	-	-	0,43	-	-	-	0,722

(Continuação)

Cinzas \ Óxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cl	SrO	P ₂ O ₅	Rb ₂ O	ZrO ₂	ThO ₂	Outros
Leve-11.3	53,65	21,93	4,97	1,71	1,82	1,49	-	-	0,85	-	-	-	1,364
Leve-12	68,43	14,78	7,91	2,51	3,8	1,16	-	0,05	0,07	0,05	0,1	-	0,99
Leve-13	64,1	22,9	2,2	2	1,4	1,4	-	-	0,1	-	-	-	1
Leve-14.1	47,79	27,11	9,94	2,15	5,44	-	0,006	-	-	-	-	-	3,68
Leve-14.2	41,98	18,51	9,67	1,91	15,2	-	0,023	-	-	-	-	-	6,06
Leve-15	57,55	25,16	6,5	3,65	2,1	-	-	-	-	-	-	-	3,35
Leve-16	65,3	25,5	4,25	-	1,2	-	-	-	-	-	-	-	2,22
Leve-17	58,55	28,2	3,44	1,26	2,23	-	-	-	-	-	-	-	0,97

Fonte: Aatoria Própria (2017)

4.2.3 Índice de Desempenho Pozolânico e Atividade Pozolânica com Cal

Apesar de ser uma propriedade muito importante na caracterização das cinzas, pois, como material pozolânico, é necessário saber o quão bem essas cinzas podem trabalhar na substituição do cimento, poucos artigos selecionados realizaram os ensaios para obtenção desta característica, apenas quatro.

Tabela 15 - Índice de desempenho pozolânico das cinzas leves dos artigos selecionados

	Índice de Desempenho Pozolânico		
	Resistência aos 28 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias com 25% de Cinzas (MPa)	IDP (%)
Leve-6	-	-	61,90%
Leve-7	73,3	84,2	114,87%
Leve-14.1	61,16	62,07	101,49%
Leve-14.2	61,16	58,83	96,19%
Leve-15	23,1	22,4	96,97%

Fonte: Aatoria Própria (2017)

Com relação à atividade pozolânica com cal aos 7 dias, apenas um dos artigos selecionados apresentou essa ramificação da caracterização das cinzas. O artigo “Leve-6” obteve um valor de 5,8938 MPa para tal característica.

4.3 Resultados – Cinzas Pesadas

Neste tópico, estão expostos os dados, acerca das cinzas pesadas, ou de fundo, retirados dos artigos selecionados.

4.3.1 Propriedades Físicas – Cinzas Pesadas

A massa específica foi um dado achado em 13 artigos focados em cinzas pesadas. Diferentemente do que ocorreu com as cinzas leves, de todos os artigos selecionados sobre cinzas leves, nenhum apresentava estudos complementares relacionados com cinzas pesadas.

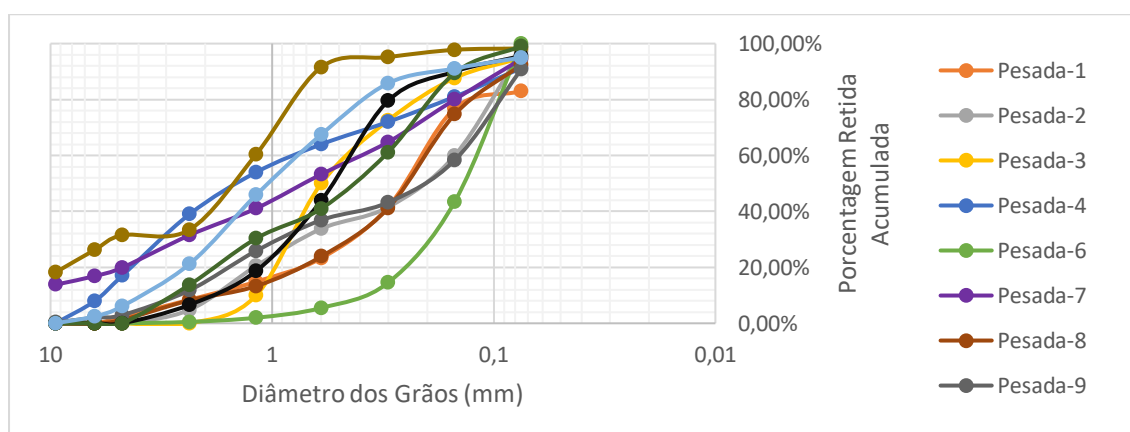
Tabela 16 - Massas específicas das cinzas pesadas dos artigos selecionados

Cinza	Valor (g/cm³)
Pesada-1	1,67
Pesada-2	2,19
Pesada-3	2,18
Pesada-4	2,208
Pesada-5.1	1,86
Pesada-5.2	1,98
Pesada-5.3	1,91
Pesada-5.4	2,03
Pesada-5.5	1,89
Pesada-5.6	1,99
Pesada-5.7	2,09
Pesada-5.8	2,12
Pesada-6	1,813
Pesada-8	1,674
Pesada-9	1,54
Pesada-10	2,39
Pesada-11.1	1,87
Pesada-11.2	1,77
Pesada-12	2,445
Pesada-14.1	2,15
Pesada-14.2	3,25
Pesada-14.3	3,09
Pesada-15	1,93

Fonte: Autoria Própria (2017)

Com relação aos dados granulométricos, eles estavam presentes em 12 dos 15 artigos selecionados com foco em cinzas pesadas. Com os dados disponíveis e com o auxílio do *software Excel*, foram traçadas as curvas granulométricas das cinzas.

Gráfico 4 - Curvas granulométricas das cinzas pesadas dos artigos selecionados



Fonte: Autoria Própria (2017)

Percebe-se no Gráfico 4, no eixo “Diâmetro dos grãos (mm)”, que os estudos granulométricos realizados nos artigos selecionados focaram, com relação ao diâmetro das partículas, no intervalo 0,1-10 mm, aproximadamente. Isso mostra que, apesar das cinzas de fundo também poderem ser utilizadas como agregado graúdo, a maioria dos estudos realizados com este material possuem o intuito de utilizá-lo como agregado miúdo.

4.3.2 Propriedades Químicas – Cinzas Pesadas

Dos artigos sobre cinzas pesadas, 12 apresentaram dados acerca da composição química das suas cinzas, dados esses, como citado anteriormente, conseguidos através da fluorescência de raios-X.

Tabela 17 - Composição química das cinzas pesadas dos artigos selecionados

Cinzas	Óxidos (%)												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cl	SrO	P ₂ O ₅	Rb ₂ O	ZrO ₂	ThO ₂	Outros
Pesada-1	50,46	28,35	10,69	3,81	2,07	1,57	-	0,03	0,09	-	0,18	-	0,47
Pesada-2	60,7	18,3	6,56	2,12	3,25	0,95	-	-	-	-	-	-	2,99
Pesada-4	52,1	18,34	11,99	1,57	6,61	0,87	-	-	-	-	-	-	8

(Continuação)

Cinzas \ Óxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cl	SrO	P ₂ O ₅	Rb ₂ O	ZrO ₂	ThO ₂	Outros
Pesada-5.1	55,35	5,39	2,25	7,67	16,57	-	-	-	-	-	-	-	2,88
Pesada-5.2	53,78	5,66	2,17	7,19	19,78	-	-	-	-	-	-	-	3,23
Pesada-5.3	52,12	6,03	2,18	7,54	22,99	-	-	-	-	-	-	-	3,52
Pesada-5.4	49,77	6,11	2,23	6,78	23,68	-	-	-	-	-	-	-	3,63
Pesada-5.5	41,57	5,68	2,21	6,49	22,17	-	-	-	-	-	-	-	3,36
Pesada-5.6	42,24	6,01	2,35	7,13	25,12	-	-	-	-	-	-	-	3,37
Pesada-5.7	45,29	6,53	2,55	7,07	26,15	-	-	-	-	-	-	-	3,99
Pesada-5.8	46,23	6,01	2,11	6,13	27,12	-	-	-	-	-	-	-	3,42
Pesada-7	68,9	18,67	6,5	1,52	1,61	1,33	-	-	-	-	-	-	0,77
Pesada-8	56	26,7	5,8	2,6	0,9	1,3	-	-	-	-	-	-	0,9
Pesada-9	61,8	17,8	6,97	2	3,19	0,88			0,2				3,08
Pesada-10	54,5	15,4	11,16	-	4,69	-	-	-	-	-	-	-	0
Pesada-12	47,9	25,94	4,76	0,67	2,48	0,86	-	-	-	-	-	-	2,48
Pesada-13	54,8	28,5	8,49	0,45	4,2	2,71	-	-	0,28	-	-	-	0,43
Pesada-14.1	50,3	16,43	7,72	2,14	15,27	1,03	-	-	-	-	-	-	3,07
Pesada-14.2	53,21	18,33	7,86	2,18	12,83	1	-	-	-	-	-	-	1,53
Pesada-14.3	53,64	18,44	7,63	2,17	12,75	0,98	-	-	-	-	-	-	1,53
Pesada-15	57,76	21,58	8,56	1,08	1,58	-	-	-	-	-	-	-	1,35

Fonte: Autoria Própria (2017)

4.3.3 Material Pulverulento e Massa Unitária das Cinzas Pesadas

Apenas dois artigos apresentaram dados sobre a massa unitária da cinza pesada, pois este não é um dado tão necessário para os estudos realizados nos artigos quanto a massa específica ou a granulometria, por exemplo.

Tabela 18 - Massa unitária das cinzas pesadas dos artigos selecionados

Cinza	Valor (g/cm³)
Pesada-6	0,741
Pesada-12	1,27

Fonte: Autoria Própria (2017)

Por fim, apenas um artigo teve a preocupação de apresentar um estudo acerca do material pulverulento da cinza pesada, e este foi o artigo “Leve-6”. O valor encontrado para esta característica neste artigo foi igual à 23,7%.

4.4 Comparação entre as Cinzas

Este tópico está organizado em três etapas, sendo duas expositivas e uma explicativa: “Comparação entre as Cinzas Leves”, “Comparação entre as Cinzas Pesadas” e “Discussão dos Resultados”.

4.4.1 Comparação entre as Cinzas Leves

Como visto anteriormente, as características incluídas no estudo comparativo entre as cinzas leves do Pecém e as cinzas leves estudadas nos artigos selecionados são: massa específica, granulometria, composição química, índice de desempenho pozolânico e atividade pozolânica com cal aos 7 dias.

Primeiramente, a comparação entre as massas específicas das cinzas do pecém e dos artigos foram feitas através da variação percentual entre essas propriedades, tendo as características da cinza do pecém como valor de referência. A tabela 19 expõe esses valores comparativos.

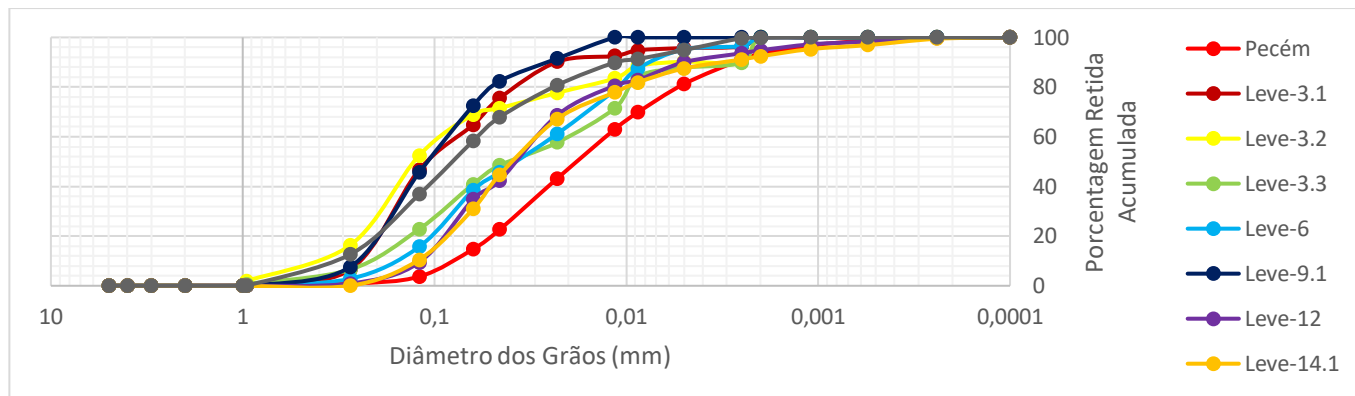
Tabela 19 - Tabela comparativa das massas específicas

Cinza	Valor (g/cm³)	Variação Percentual
Pecém	2,23	-
Leve-1	2,2	-1,35%
Leve-6	2,05	-8,07%
Leve-7	1,92	-13,90%
Leve-9.1	2,209	-0,94%
Leve-9.2	2,165	-2,91%
Leve-10.1	1,98	-11,21%
Leve-10.2	1,95	-12,56%
Leve-10.3	1,97	-11,66%
Leve-10.4	2,18	-2,24%
Leve-10.5	2,55	14,35%
Leve-15	2,09	-6,28%
Leve-16	2,1	-5,83%
Leve-17	2,13	-4,48%

Fonte: Autoria Própria (2017)

Com relação à comparação granulométrica, juntou-se os Gráfico 1 e 3 para obter uma melhor visão comparativa entre as curvas granulométricas de cada cinza. Além disso, também foi feita a comparação, através da variância percentual, entre os dados das cinzas apresentados nas tabelas 11, 12 e 13 e as cinzas leves do Pecém.

Gráfico 5 - Curvas granulométricas para comparação das cinzas leves



Fonte: Autoria Própria (2017)

Tabela 20 - Comparação granulométrica com a cinza do artigo "Leve-1"

Diâmetro (mm)	Valores (%)		Variação Percentual
	Pecém	Leve-1	
2 – 63	-	-	-
0,063 – 2	15,65	10,5	32,91%
0,002 - 0,063	77,97	81,3	-4,27%
< 0,002	6,38	8,2	-28,53%

Fonte: Autoria Própria (2017)

Tabela 21 - Comparação granulométrica com as cinzas do artigo "Leve-5"

	% de grãos com diâmetro maior que (mm):					
	0,01	Variação Percentual	0,045	Variação Percentual	0,09	Variação Percentual
Pecém	66,53	-	26,49	-	9,81	-
Leve-5.1	60	-9,82%	20	-24,50%	6	-39%
Leve-5.2	74	11,23%	45	69,88%	20	104%
Leve-5.3	71	6,72%	25	-5,62%	5	-49%
Leve-5.4	62	-6,81%	6	-77,35%	0	-100%
Leve-5.5	48	-27,85%	0	-100,00%	0	-100%

Fonte: Autoria Própria (2017)

Tabela 22 - Comparação granulométrica com as cinzas do artigo "Leve-10"

	% Passante por 0,075 mm:	Variação Percentual
Pecém	87,44	-
Leve-10.1	72,2	-17,43%
Leve-10.2	76,7	-12,28%
Leve-10.3	61,6	-29,55%
Leve-10.4	92,5	5,79%
Leve-10.5	73,4	-16,06%

Fonte: Autoria Própria (2017)

Para realizar a análise comparativa das composições químicas das cinzas, separou-se os componentes químicos relevantes em grupos, como citado na Metodologia deste trabalho. Em seguida realizou-se o método de variação percentual, com os dados provenientes da termelétrica do Pecém como referência.

Tabela 23 - Comparação entre as composições químicas das cinzas leves

Cinzas	Óxidos (%)	Grupo I	Grupo II	Variação Percentual - Grupo I	Variação Percentual - Grupo II
		$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$		
Pecém		80,19	12,18	-	-
Leve-2		84,65	7,52	5,56%	-38,26%
Leve-3.1		85,69	7,55	6,86%	-38,01%
Leve-3.2		80,97	8,82	0,97%	-27,59%
Leve-3.3		83,25	9,87	3,82%	-18,97%
Leve-4		80,2	4,9	0,01%	-59,77%
Leve-5.1		83,6	6,6	4,25%	-45,81%
Leve-5.2		79,9	6,7	-0,36%	-44,99%
Leve-5.3		83,4	6,8	4,00%	-44,17%
Leve-5.4		82,5	6	2,88%	-50,74%
Leve-5.5		82,4	6,1	2,76%	-49,92%
Leve-6		97	1,6	20,96%	-86,86%
Leve-7		92,17	5,9	14,94%	-51,56%
Leve-8		91,34	5	13,90%	-58,95%
Leve-9.1		90,05	5,6	12,30%	-54,02%
Leve-9.2		84,51	6,72	5,39%	-44,83%
Leve-11.1		86	1,37	7,25%	-88,75%
Leve-11.2		78,84	1,97	-1,68%	-83,83%
Leve-11.3		80,55	3,53	0,45%	-71,02%
Leve-12		91,12	6,31	13,63%	-48,19%
Leve-13		89,2	3,4	11,24%	-72,09%
Leve-14.1		84,84	7,59	5,80%	-37,68%

(Continuação)

Cinzas \ Óxidos (%)	Grupo I	Grupo II	Variação Percentual - Grupo I	Variação Percentual - Grupo II
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	K ₂ O + CaO		
Leve-14.2	70,16	17,11	-12,51%	40,48%
Leve-15	89,21	5,75	11,25%	-52,79%
Leve-16	95,05	1,2	18,53%	-90,15%
Leve-17	90,19	3,49	12,47%	-71,35%

Fonte: Aatoria Própria (2017)

O mesmo processo de variação percentual também foi utilizado para comparar os índices de desempenho pozolânico das cinzas. Tal comparação encontra-se exposta na Tabela 24.

Tabela 24 - Comparação entre os índices de desempenho pozolânico das cinzas leves

	Índice de Desempenho Pozolânico (%)	Variação Percentual
Pecém	104,21	-
Leve-6	61,9	-40,60%
Leve-7	114,87	10,23%
Leve-14.1	101,49	-2,61%
Leve-14.2	96,19	-7,70%
Leve-15	96,97	-6,95%

Fonte: Aatoria Própria (2017)

Por fim, como visto anteriormente, apenas a cinza “Leve-06” foi caracterizada com relação à atividade pozolânica com cal aos 7 dias, apresentando um valor de 5,8938 MPa. A cinza leve proveniente da termelétrica do Pecém obteve um valor de 6,83 MPa para o mesmo ensaio. Portanto, a diferença percentual entre as cinzas é igual à -13,71%.

4.4.2 Comparação entre as Cinzas Pesadas

As características analisadas nas cinzas pesadas provenientes do Pecém e selecionadas dos artigos foram: massa específica, granulometria, composição química, massa unitária e material pulverulento. As comparações foram feitas seguindo os moldes apresentados no tópico 4.4.1, através da variação percentual, com os dados das cinzas do Pecém como

referência, e, no caso da granulometria, com a junção dos gráficos 2 e 4, para uma melhor visualização das curvas.

É importante frisar que as comparações das cinzas pesadas foram feitas com a parte miúda das cinzas do Pecém. Isso se deve ao fato de que todas as cinzas de fundo dos artigos selecionados apresentarem estudos com diâmetro de grãos entre 0,1-10 mm, descartando assim, a parte graúda das cinzas do Pecém.

Além disso, no caso da comparação entre as granulometrias, a curva granulométrica do Gráfico 2 foi adaptada. Essa adaptação foi para que a curva do Pecém ficasse exposta apenas no intervalo 0,1-10 mm de diâmetro. Por fim, também foi adicionado ao gráfico de comparação granulométrica as curvas utilizável e ótima para agregados miúdos, retiradas da NBR 7211:2005, para facilitar na comparação.

Tabela 25 - Tabela comparativa entre as massas específicas das cinzas pesadas

Cinza	Valor (g/cm³)	Varição Percentual
Pecém - Miúdo	1,97	-
Pesada-1	1,67	-15,23%
Pesada-2	2,19	11,17%
Pesada-3	2,18	10,66%
Pesada-4	2,208	12,08%
Pesada-5.1	1,86	-5,58%
Pesada-5.2	1,98	0,51%
Pesada-5.3	1,91	-3,05%
Pesada-5.4	2,03	3,05%
Pesada-5.5	1,89	-4,06%
Pesada-5.6	1,99	1,02%
Pesada-5.7	2,09	6,09%
Pesada-5.8	2,12	7,61%
Pesada-6	1,813	-7,97%
Pesada-8	1,674	-15,03%
Pesada-9	1,54	-21,83%
Pesada-10	2,39	21,32%
Pesada-11.1	1,87	-5,08%
Pesada-11.2	1,77	-10,15%
Pesada-12	2,445	24,11%
Pesada-14.1	2,15	9,14%
Pesada-14.2	3,25	64,97%
Pesada-14.3	3,09	56,85%
Pesada-15	1,93	-2,03%

Fonte: Autoria Própria (2017)

Gráfico 6 - Curvas granulométricas para comparação das cinzas pesadas

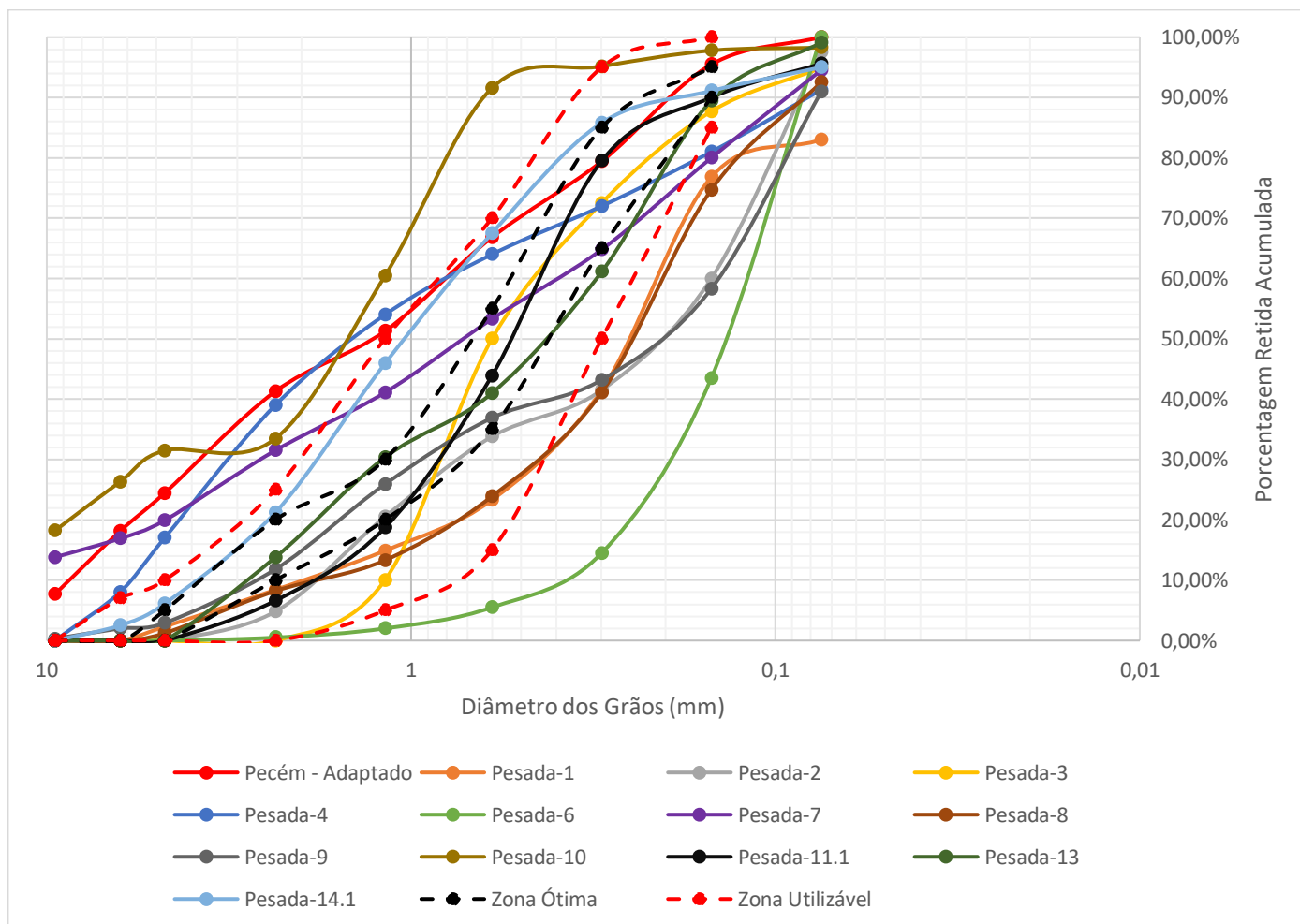


Tabela 26 - Comparação entre as composições químicas das cinzas pesadas

Cinzas	Óxidos (%)	Grupo I	Grupo II	Variação Percentual - Grupo I	Variação Percentual - Grupo II
		SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	K ₂ O + CaO		
Pecém - Miúdo		75,96	11,37	-	-
Pesada-1		89,5	5,88	17,83%	-48,28%
Pesada-2		85,56	5,37	12,64%	-52,77%
Pesada-4		82,43	8,18	8,52%	-28,06%
Pesada-5.1		62,99	24,24	-17,07%	113,19%
Pesada-5.2		61,61	26,97	-18,89%	137,20%
Pesada-5.3		60,33	30,53	-20,58%	168,51%
Pesada-5.4		58,11	30,46	-23,50%	167,90%
Pesada-5.5		49,46	28,66	-34,89%	152,07%
Pesada-5.6		50,6	32,25	-33,39%	183,64%
Pesada-5.7		54,37	33,22	-28,42%	192,17%
Pesada-5.8		54,35	33,25	-28,45%	192,44%
Pesada-7		94,07	3,13	23,84%	-72,47%

(Continuação)

Cinzas \ Óxidos (%)	Grupo I	Grupo II	Variação Percentual - Grupo I	Variação Percentual - Grupo II
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	K ₂ O + CaO		
Pesada-8	88,5	3,5	16,51%	-69,22%
Pesada-9	86,57	5,19	13,97%	-54,35%
Pesada-10	81,06	4,69	6,71%	-58,75%
Pesada-12	78,6	3,15	3,48%	-72,30%
Pesada-13	91,79	4,65	20,84%	-59,10%
Pesada-14.1	74,45	17,41	-1,99%	53,12%
Pesada-14.2	79,4	15,01	4,53%	32,01%
Pesada-14.3	79,71	14,92	4,94%	31,22%
Pesada-15	87,9	2,66	15,72%	-76,61%

Fonte: Autoria Própria (2017)

Com relação à massa unitária, como citado anteriormente, apenas dois artigos selecionados apresentaram este estudo. O artigo “Pesada-6”, apresentou este ensaio com a cinza pesada *in natura* e solta, apresentando um valor de 0,741 g/cm³ que, comparada com o valor correspondente da cinza do Pecém, apresentado na tabela 9, obteve uma variação percentual igual à 1,93%. Já o artigo “Pesada-12” apresentou um valor de 1,27 g/cm³, bem maior do que o usual. Assim, obteve uma variação percentual igual à 74,69%.

Por fim, o único artigo selecionado que apresentou dados acerca de material pulverulento foi o artigo “Leve-6”, com um valor para esta característica igual à 23,7%. Comparado com a cinza pesada miúda proveniente da termelétrica do Pecém, com um valor de 12,47, a variação percentual foi igual à 90,06.

4.4.3 Discussão dos Resultados

4.4.3.1 Discussão – Cinzas Leves

Primeiramente, com relação à massa específica, a Tabela 27 apresenta as cinzas que se encaixaram na margem de erro de $\pm 10\%$ fixada.

Tabela 27 - Cinzas leves com massa específica aprovada no critério estabelecido

Massa Específica		
Cinza	Valor (g/cm³)	Varição Percentual
Pecém	2,23	-
Leve-1	2,2	-1,35%
Leve-6	2,05	-8,07%
Leve-9.1	2,209	-0,94%
Leve-9.2	2,165	-2,91%
Leve-10.4	2,18	-2,24%
Leve-15	2,09	-6,28%
Leve-16	2,1	-5,83%
Leve-17	2,13	-4,48%

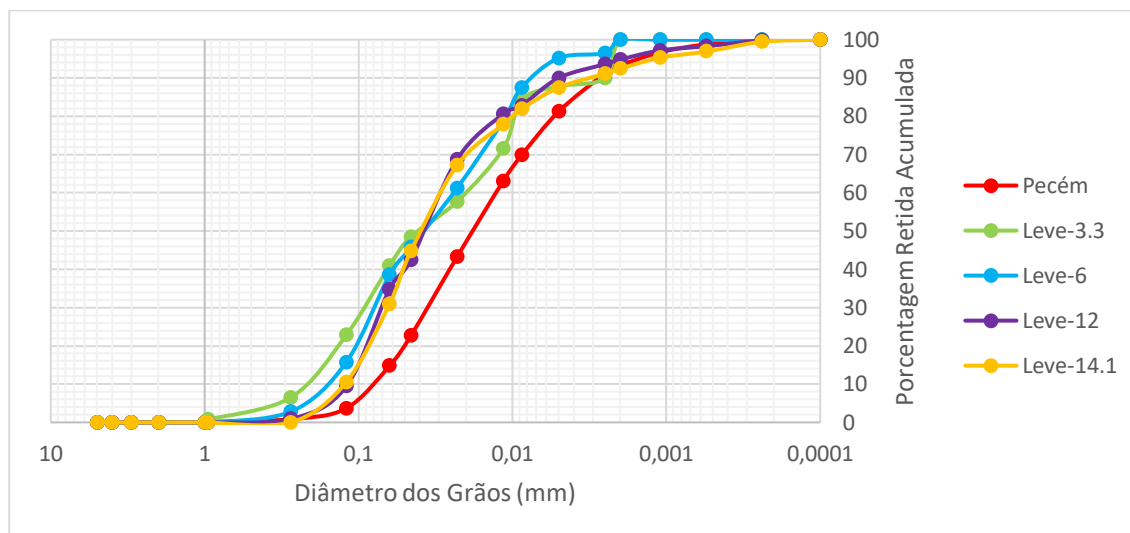
Fonte: Autoria Própria (2017)

Massa específica é a massa da unidade de volume excluindo-se os vazios entre grãos e os permeáveis, ou seja, a massa de uma unidade de volume dos grãos do agregado. Assim, a massa específica é especialmente importante em estudos de substituição em volume de materiais, como é o caso de alguns dos artigos selecionados.

Entretanto, por este mesmo motivo, em alguns casos, a massa específica pode ser considerada irrelevante. Porém, como o intuito deste trabalho é encontrar cinzas com propriedades semelhantes às da cinza proveniente do Pecém, foram descartadas, no caso desta propriedade, as cinzas que estiveram fora da margem de erro estabelecida.

Com relação à granulometria, observando o Gráfico 5, pode-se perceber que a curva granulométrica da cinza leve do Pecém mostra uma cinza mais fina do que as demais. Além disso, percebe-se que nenhuma das outras cinzas é muito semelhante a cinza do Pecém, porém algumas se aproximam. O gráfico 7 mostra as curvas granulométricas da cinza do Pecém e das cinzas que mais se aproximaram dela.

Gráfico 7 - Curvas granulométricas que mais se aproximam da cinza proveniente do Pecém



Fonte: Autoria Própria (2017)

As comparações granulométricas apresentadas nas tabelas 20, 21 e 22 mostraram que, fora as cinzas dos artigos selecionados mostradas no gráfico 7, a única cinza com granulometria dentro da margem de erro fixada foi a “Leve-10.4”.

As composições químicas das cinzas apresentaram vários valores dentro da margem de erro, porém todos esses valores foram do “Grupo I”, estabelecido como sendo o conjunto dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Tabela 28 - Cinzas leves com composição química aprovada pelo critério estabelecido

Cinzas	Óxidos (%)	Grupo I	Variação Percentual - Grupo I
		$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	
Pecém		80,19	-
Leve-2		84,65	5,56%
Leve-3.1		85,69	6,86%
Leve-3.2		80,97	0,97%
Leve-3.3		83,25	3,82%
Leve-4		80,2	0,01%
Leve-5.1		83,6	4,25%
Leve-5.2		79,9	-0,36%
Leve-5.3		83,4	4,00%
Leve-5.4		82,5	2,88%
Leve-5.5		82,4	2,76%
Leve-9.2		84,51	5,39%
Leve-11.1		86	7,25%

(Continuação)

Cinzas	Óxidos (%)	Grupo I	Variação Percentual - Grupo I
		SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	
Leve-11.2		78,84	-1,68%
Leve-11.3		80,55	0,45%
Leve-14.1		84,84	5,80%

Fonte: Aatoria Própria (2017)

O fato das variações percentuais encontradas na comparação dos componentes químicos do “Grupo II”, K_2O e CaO , serem valores fora da margem estabelecida indicaria que as cinzas do Pecém não poderiam ser usadas em substituição de nenhuma cinza dos artigos selecionados. Porém, os componentes do “Grupo II”, como citado anteriormente, são óxidos com alta reatividade com água, podendo conferir propriedades cimentícias para a cinza. Assim, caso a variação percentual for negativa nesta propriedade, isso indicaria que a cinza leve do Pecém é mais reativa com água do que a cinza do artigo selecionado, o que traria mais vantagens ao estudo e, se tal variação for positiva, mostrando um cenário contrário, há medidas que podem ser tomadas para remediar isso, como, por exemplo, a adição de pó de cal na mistura com a cinza. Logo, decidiu-se levar em consideração apenas a comparação do “Grupo I” de componentes químicos. O mesmo foi feito com as cinzas pesadas.

O índice de desempenho pozolânico, de maneira simplificada, mostra o quão efetivo foi certo material pozolânico na sua substituição do cimento. Assim, quanto maior for esse índice, maior a qualidade da cinza como material pozolânico. A tabela 29 mostra as cinzas que se encaixaram nos critérios de comparação. Percebe-se que a cinza “Leve-7” ficou fora da margem de erro por 0,23%. Nesta propriedade em questão, esse valor foi considerado irrelevante.

Tabela 29 - Índices de desempenho pozolânico que se encaixaram na margem de erro

	Índice de Desempenho Pozolânico (%)	Variação Percentual
Pecém	104,21	-
Leve-7	114,87	10,23%
Leve-14.1	101,49	-2,61%
Leve-14.2	96,19	-7,70%
Leve-15	96,97	-6,95%

Fonte: Aatoria Própria (2017)

A norma de materiais pozolânicos (ABNT NBR 12563:2015) apresenta alguns requisitos para a classificação dos materiais deste tipo e fixa um valor mínimo de 6 MPa para o ensaio de atividade pozolânica com cal aos 7 dias. Com esta informação, percebe-se que a cinza “Leve-6”, cinza essa do único artigo que realizou este ensaio, com um valor de 5,8938 MPa, não atinge o valor mínimo necessário por norma. Além disso, o valor da variação percentual calculado foi igual à -13,71%, o que também descarta esta propriedade desta cinza.

Finalmente, após analisar todas as tabelas de comparação, chegou-se à conclusão que oito cinzas são semelhantes o suficiente às cinzas leves do Pecém, para que estas tenham a possibilidade de serem usadas nos estudos dos artigos. A tabela 30 expõe estas cinzas.

Tabela 30 - Cinzas com propriedades semelhantes às cinzas leves do Pecém

Artigos com cinzas semelhantes às cinzas do Pecém
Leve-2
Leve-3.3
Leve-4
Leve-9.2
Leve-11.1
Leve-11.2
Leve-11.3
Leve-14.1

Fonte: Autoria Própria (2017)

4.4.3.2 Discussão – Cinzas Pesadas

A análise neste tópico segue o apresentado no tópico 4.4.3.1. Começando com a massa específica, foi feita a verificação, nas tabelas de comparação, da cinzas com relação à margem de erro fixada neste estudo, igual à $\pm 10\%$. A tabela 31 mostra as cinzas cujas massas específicas se encaixam no critério estipulado.

Tabela 31 - Cinzas pesadas com massa específica aprovada pelo critério estabelecido

Cinza	Valor (g/cm³)	Varição Percentual
Pecém - Miúdo	1,97	-
Pesada-5.1	1,86	-5,58%
Pesada-5.2	1,98	0,51%
Pesada-5.3	1,91	-3,05%

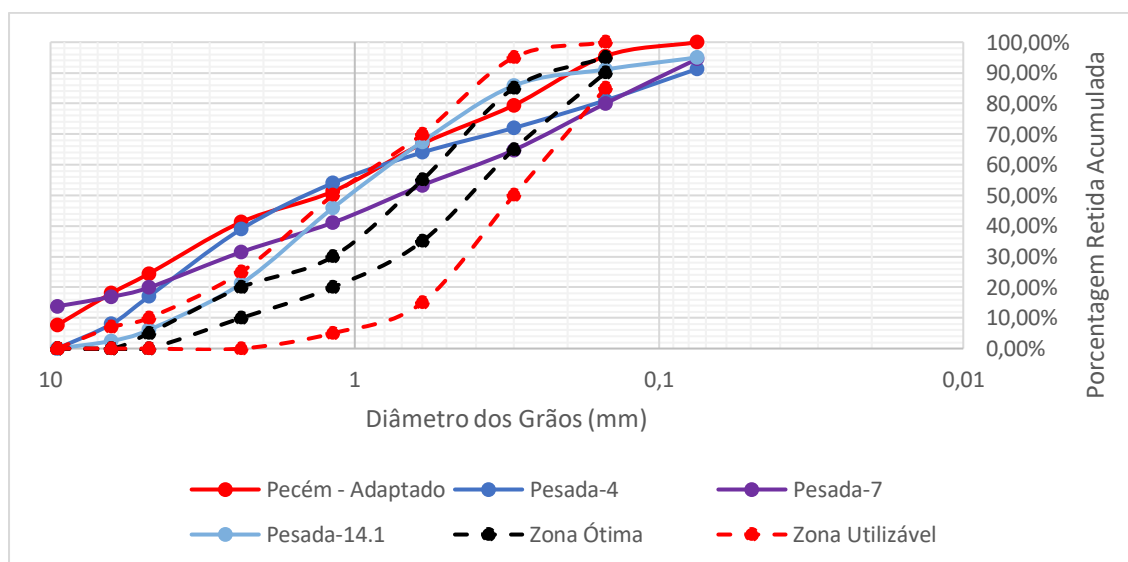
(Continuação)

Cinza	Valor (g/cm ³)	Varição Percentual
Pesada-5.4	2,03	3,05%
Pesada-5.5	1,89	-4,06%
Pesada-5.6	1,99	1,02%
Pesada-5.7	2,09	6,09%
Pesada-5.8	2,12	7,61%
Pesada-6	1,813	-7,97%
Pesada-11.1	1,87	-5,08%
Pesada-14.1	2,15	9,14%
Pesada-15	1,93	-2,03%

Fonte: Autoria Própria (2017)

Com relação à análise comparativa da granulometria das cinzas, o gráfico 6 mostra que as curvas granulométricas de todas as cinzas são bem distintas. Este fato muitas vezes está relacionado com a origem das cinzas e seus modos de queima. Com o auxílio das zonas ótima e utilizável, retiradas da norma, como citado anteriormente, pode-se selecionar as curvas com maior semelhança granulométrica com as cinzas pesadas do Pecém.

Gráfico 8 - Curvas granulométricas que mais se aproximam da cinza pesada proveniente do Pecém



Fonte: Autoria Própria (2017)

A análise das composições químicas das cinzas pesadas seguiu o mesmo modelo do que foi apresentado no tópico das cinzas leves, levando em consideração para a comparação

apenas os componentes químicos do chamado “Grupo I”. A tabela 32 apresenta as cinzas com semelhança aceitável.

Tabela 32 - Cinzas pesadas com composição química aprovada pelo critério estabelecido

Cinzas	Óxidos (%)	Variação Percentual - Grupo I
	Grupo I SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	
Pecém – Miúdo	75,96	-
Pesada-4	82,43	8,52%
Pesada-10	81,06	6,71%
Pesada-12	78,6	3,48%
Pesada-14.1	74,45	-1,99%
Pesada-14.2	79,4	4,53%
Pesada-14.3	79,71	4,94%

Fonte: Autoria Própria (2017)

Em termos de massa unitária, a única cinza que se assemelhou à cinza pesada do Pecém foi a “Pesada-6”. Por fim, com relação à característica material pulverulento, nenhuma cinza pesada foi semelhante às cinzas provenientes da termelétrica do Pecém.

Logo, após analisar todas as tabelas comparativas, chegou-se à conclusão que apenas uma cinza, entre todos os artigos selecionados com foco em cinzas pesadas, teve uma boa semelhança com as cinzas pesadas do Pecém. A cinza em questão foi a “Pesada-14.1”.

5 CONCLUSÕES

Primeiramente, um dos objetivos iniciais deste estudo era fazer uma caracterização das cinzas provenientes da termelétrica do Pecém, no Ceará. Com o auxílio dos laboratórios disponíveis na Universidade Federal do Ceará (UFC), foi possível obter diversos dados acerca tanto das cinzas pesadas quanto das cinzas leves do Pecém. Muitos dos artigos selecionados na revisão bibliográfica realizada não apresentaram uma caracterização tão ampla quanto à mostrada neste estudo, isso mostra que esta etapa foi feita de maneira adequada aos demais objetivos deste trabalho.

A revisão bibliográfica realizada conseguiu abranger 30 artigos no total, sendo 15 artigos com enfoque em cinzas leves e 15 artigos com enfoque em cinzas pesadas. Destes 30 artigos, entretanto, apenas 9 tipos de cinzas, como mostrado anteriormente, foram consideradas aceitáveis para os propósitos deste estudo. Porém, a organização dos dados desses artigos não, necessariamente, foi algo incapaz de gerar frutos. Vários estudos que, no momento foram considerados inadequados, podem se tornar um possível uso para as cinzas do Pecém, feitas as devidas modificações nessas cinzas. Um bom exemplo destas modificações já foi citado anteriormente e se trata da adição de pó de cal em uma mistura com as cinzas para modificar sua composição química. Portanto, com devidas manipulações, as cinzas do Pecém podem ser usadas nos artigos que, no momento, foram descartados. Isso pode fomentar trabalhos futuros.

As cinzas selecionadas como semelhantes às cinzas do Pecém são todas internacionais. África do Sul, Sérvia, Canadá, Romênia, Índia, Eslovênia e Taiwan são os países de origem das cinzas estabelecidas como semelhantes. Com relação à área de estudo em que essas cinzas foram aplicadas, foram realizados dois estudos característicos, uma aplicação em argamassa, uma aplicação em concreto, uma aplicação como material de subestrutura em estradas, e duas aplicações como material de barreira para aterros.

Após as comparações, verificou-se que as cinzas leves da termelétrica do Pecém são semelhantes às cinzas da termelétrica Matla, localizada em Mpumalanga, na África do Sul. Essa cinza proveniente da África foi objeto de estudo em uma caracterização, semelhante à que ocorreu neste trabalho. Portanto, com a semelhança verificada, percebe-se que existe a possibilidade das cinzas do Pecém serem eficazes nos estudos em que as cinzas leves provenientes de Matla forem aplicadas.

Além deste recém mostrado, outro estudo característico foi realizado em outro artigo, com cinzas provenientes da Sérvia. Este estudo afirmou que as propriedades caracterizadas são muito boas para aplicações na área da construção, como em concretos ou argamassas. Isso indica outros caminhos possíveis para a utilização das cinzas do Pecém.

A cinza “Leve-4” foi estudada com o objetivo de ser utilizada como material de barreira para aterros. Suas propriedades, tanto físicas quanto químicas, mostraram que ela seria eficiente para este propósito. Assim, percebe-se um possível novo uso para as cinzas leves provenientes do Pecém, na área de saneamento.

O artigo da cinza “Leve-9.2”, mostrou que suas cinzas, provenientes da Romênia, têm alguns usos estruturais e em estradas. Pode-se citar: produção de concretos, utilização como filler estrutural, material de base ou sub-base em estradas, filler mineral em pavimentos de asfalto, entre outros. A semelhança das cinzas leves do Pecém com este tipo de cinza amplia ainda mais o leque de possibilidades para seus usos.

As cinzas “Leve-11.1”, “Leve-11.2” e “Leve-11.3” foram retiradas do mesmo artigo e são provenientes da Índia. Elas foram estudadas para serem usadas como material de barreira, em sistemas *geoliner*, com o objetivo primário de evitar a saída de contaminantes dos aterros. Estas três cinzas são originadas de três diferentes termelétricas indianas e todas se mostraram semelhantes à cinza leve do Pecém.

A cinza “Leve-14.1” foi objeto de um estudo com o objetivo de checar a eficiência de concretos, com adição desta cinza, no que diz respeito à sua resistência na penetração de íons de cloreto. O fato de existirem, na Eslovênia, várias estruturas de concreto localizadas ao longo da costa do mar Adriático motivou este estudo, pois essas estruturas estariam mais propensas à penetração destes íons de cloreto. Foi comprovado que o concreto modificado com cinzas apresentou diversos benefícios, o que mostra um válido possível uso para as cinzas leves do Pecém.

Por fim, a única cinza pesada considerada semelhante às cinzas pesadas do Pecém, a “Pesada-14.1”, foi utilizada na confecção de argamassas, para verificar sua influência, principalmente, nas propriedades mecânicas e no tamanho dos poros desta argamassa. Os resultados apresentados não foram tão benéficos. Assim, as cinzas pesadas do Pecém possivelmente podem ser aplicadas no mesmo estudo, apresentando resultados semelhantes, provavelmente, mas isso não seria muito vantajoso. Isso mostra a dificuldade em encontrar usos eficazes para cinzas pesadas, ou contrário do que ocorre com as cinzas leves.

Concluindo, é evidente a necessidade de estudos prévios caso se tenha o objetivo de aplicar as cinzas do Pecém em algum destes casos selecionados, que possuem cinzas semelhantes. Porém, este estudo pode ser considerado um “guia” para estudos futuros utilizando cinzas do Pecém, mostrando situações em que essas cinzas podem ser aplicadas, tanto em estados naturais como modificadas com outras substâncias, apresentando prováveis bons resultados, principalmente no que diz respeito às cinzas volantes ou leves.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008.

ANDRADE, L. B.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement**. Waste Management, v. 27, p. 1190-1199, 2007.

ANDRADE, L. B.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete**. Construction and Building Materials, v. 23, p. 609-614, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7211**: Agregados para Concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

AYANDA, O. S.; FATOKI, O. S.; ADEKOLA, F. A.; XIMBA, A. J. **Characterization of fly Ash generated from Matla Power Station in Mpumalanga, South Africa**. E-Journal of Chemistry, v. 9 (4), p. 1788-1795, 2012.

BAI, Y.; DARCY, F.; BASHEER, P. A. M. **Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate**. Construction and Building Materials, v. 19, p. 691-697, 2005.

BAUER, L. A. Falcao. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BELTRÁN, M. G.; BARBUDO, A.; AGRELA, F.; JIMÉNEZ, J. R.; BRITO, J. **Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash**. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 699-707, 2016.

CARVALHO, H. D. S. **Análise da Retração por Secagem em Argamassas Autonivelantes Utilizando Adições Minerais Como Substitutos Parciais do Cimento Portland**. 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CHENG, A. **Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars**. *Materials and Design*, v. 36, p. 859-864, 2012.

CHIES, F.; SILVA, N. I.; ZWONOK, O. **Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão - CIPECAL**. In: *Coletânea Habitare - vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional*. Porto Alegre: Habitare, 2003.

FROENER, M. S. **Valorização de Cinza de Fundo por meio da Síntese de Ligantes Geopoliméricos: Otimização de Traços em Pasta e Avaliação dos Sistemas em Argamassas**. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GRUCHOT, A.; MADEJ, A.; KOS, K. **Usability of fly ash for filtration barriers**. *Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW, Land Reclam.* v. 46 (2), p. 115-123, 2014.

IBRAHIM, M. H. W.; HAMZAH, A. F.; JAMALUDDIN, N.; RAMADHANSYAH, P. J.; FADZIL, A. M. **Split Tensile Strength on Self-compacting Concrete Containing Coal Bottom Ash**. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 195, p. 2280-2289, 2015.

KAEFER, L. F. **A Evolução do Concreto Armado**. PEF 5707 – Concepção, Projeto e realização das estruturas: aspectos históricos. São Paulo, 1998.

KIM, H. K.; LEE, H. K. **Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete**. Construction and Building Materials, v. 25, p. 1115-1122, 2011.

KOU, S. -C.; POON, C. -S. **Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates**. Construction and Building Materials, v. 23, p. 2877-2886, 2009.

KREUZ, A. L. **Utilização de cinzas pesadas de termelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos**. Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KURAMA, H.; KAYA, M. **Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture**. Construction and Building Materials, v. 22, p. 1922-1928, 2008.

LACERDA, L. V. **Síntese e caracterização de zeólita tipo sodalita obtida a partir de cinzas volantes de carvão mineral utilizado na usina termoeletrica de Candiota-RS**. 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LIVI, C. N. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio**. 2013. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MASSAZZA, F. **Pozzolan Ciments**. Cement & Concrete Composites, v. 15, p. 185-214, 1993.

MEHTA, P. K. **Natural Pozzolan**. Supplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NHAN, C. T.; GRAYDON, J. W.; KIRK, D. W. **Utilizing coal fly ash as a landfill barrier material**. Waste Management, v. 16, n. 7, p. 587-595, 1996.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

ONER, A.; AKYUZ, S.; YILDIZ, R. **An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1165-1171, 2005.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. **Earth construction: lessons from the past for future eco-efficient construction**. Construction and Building Materials, v. 29, p. 512-519, 2012.

PANDIAN, N. S. **Fly ash characterization with reference to geotechnical Applications**. Indian Institute of Science, v. 84, p. 189-216, 2004.

PARK, S. B.; JANG, Y. I.; LEE, J.; LEE, B. J. **An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea**. Journal of Hazardous Materials, v. 166, p. 348-355, 2009.

PERIS MORA, E.; PAYÁ, J.; MONZÓ, J. **Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars.** Cement and concrete research, v. 23, p. 917-924, 1993.

PRISZKULNIK, S. **Pozolanas para aglomerantes de construção civil.** Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP, 1981.

PUTHIPAD, N.; OUCHI, M.; RATH, S.; ATTACHAIYAWUTH, A. **Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash.** Construction and Building Materials, v. 128, p. 349-360, 2016.

ROSALES, J.; CABRERA, M.; BELTRÁN, M. G.; LÓPEZ, M.; AGRELA, F. **Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars.** Journal of Cleaner Production, v. 154, p. 424-435, 2017.

ROTARU, A.; BOBOC, V. **Material used in substructure and road works: physical characteristics of Pozzolana fly ash from thermal power plant of Iasi, Romania.** WSEAS Transactions on Environment and Development, v. 6, n. 6, p. 427-436, 2010.

SALDANHA, R. B. **Misturas Cinza Volante e Cal de Carbureto: Comportamento da Resistência à Compressão Simples para Cura Acelerada.** 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SANI, M. S. H. M.; MUFTAH, F.; MUDA, Z. **The Properties of Special Concrete Using Washed Bottom Ash (WBA) as Partial Sand Replacement.** International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology, v. 1, n. 2, p. 65-76, 2010.

SHREYA, N.; VALENTIM, B.; PAUL, B.; GUEDES, A.; PINHO, S.; RIBEIRO, J.; WARD, C. R.; FLORES, D. **Multi-technique study of fly ash from the Bokaro and Jharia coalfields (Jharkhand state, India): A contribution to its use as a geoliner.** International Journal of Coal Geology, v. 152, p. 25-38, 2015.

SIDDIQUE, R. **Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash.** Construction and Building Materials, v. 47, p. 1444-1450, 2013.

SILVA, M. G. **Cimento Portland com adições minerais. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 1. ed. São Paulo: Geraldo Isaia, 2007. p. 761-793.

SILVA, S. A. **Estudo dos produtos da combustão do carvão mineral e da borra branca de alumínio para aplicação na construção civil.** 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

SIMČIČ, T.; PEJOVNIK, S.; SCHUTTER, G.; BOKAN, V. B. **Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles.** Construction and Building Materials, v. 93, p. 1216-1223, 2015.

SINGH, M.; SIDDIQUE, R. **Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete.** Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 620-630, 2016.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas.** 2a edição revisada e ampliada, v. 1, p. 113; v. 2, p. 468-505; Editora Edigar Blucher, 1989.

VARGAS, A. S.; SCHNEIDER, E. L.; SCHMITZ, G.; DE AQUIM, P. M. **Argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes álcali-ativadas contendo areia de fundição.** Cerâmica, v. 61, p. 317-322, 2015.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** 2 ed. Londres: Thomas Telford Publishing, 1997.

TEIXEIRA, J. M. C. **Utilização dos produtos da combustão do carvão mineral como aditivos na produção de argamassa para revestimento.** 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

TERZIC, A.; PAVLOVIC, L.; MILICIC, L. **Evaluation of Lignite Fly Ash for Utilization as Component in Construction Materials.** International Journal of Coal Preparation and Utilization, v. 33, p. 159-180, 2013.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. **Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante.** Revista Ibracon de estruturas e materiais, v. 4, n. 2, p. 247-276, 2011.

WARPECHOWSKI DA SILVA, N. I.; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMANN, J. E.; ZWONOK, O. **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico.** Cerâmica, v. 45, n. 296, 1999.

YU, Y.; YU, J.; GE, Y. **Water and chloride permeability research on ordinary cement mortar and concrete with compound admixture and fly ash.** Construction and Building Materials, v. 127, p.556-564, 2016.

ZHANG, B.; POON, C. S. **Use of Furnace Bottom Ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties.** Journal of Cleaner Production, v. 99, p. 94-100, 2015.