



MESTRADO EM AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM MINERAÇÃO

MARCELO GARCIA SUNDSTRON

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS CINZAS DA COMBUSTÃO DE
CARVÃO MINERAL GERADAS NA REGIÃO DO BAIXO JACUÍ- RS**

CANOAS, 2012

MARCELO GARCIA SUNDSTRON

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS CINZAS DA COMBUSTÃO DE
CARVÃO MINERAL GERADAS NA REGIÃO DO BAIXO JACUÍ– RS**

Dissertação de mestrado apresentada para a banca examinadora do curso de mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais em Mineração do Centro Universitário La Salle – UNILASALLE, como exigência parcial para obtenção do grau de Mestre em Avaliação de Impactos Ambientais em Mineração.

Orientador: Prof. Dr. Sydney Sabedot

Canoas, 2012

MARCELO GARCIA SUNDSTRON

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS CINZAS DA COMBUSTÃO DE
CARVÃO MINERAL GERADAS NA REGIÃO DO BAIXO JACUÍ – RS**

Dissertação de mestrado aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no curso de Avaliação de Impactos Ambientais em Mineração pelo Centro Universitário La Salle-Unilasalle.

Aprovado pela banca examinadora em 27 de julho de 2012.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rubens Müller Kaustzmann
Unilasalle

Prof. Dr. Gerson Luis Miltzarek
UFRGS

Prof. Dr. Cristiane Oliveira Rodrigues
Unilasalle

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S958c Sundstron, Marcelo Garcia

Caracterização e avaliação das cinzas da combustão de carvão mineral geradas na região do baixo Jacuí - RS [manuscrito] / Marcelo Garcia Sundstron. – 2012.

121 f.: il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado em Avaliação de impactos ambientais em mineração) – Centro Universitário La Salle, Canoas, 2012.

“Orientação: Prof. Dr. Sydney Sabedot.”

1. Meio ambiente. 2. Carvão mineral. 3. Impactos ambientais.

Bibliotecária responsável: Melissa Rodrigues Martins - CRB 10/1380

Aos familiares, colegas e colaboradores anônimos
que propiciaram que esta pesquisa fosse
concretizada.

AGRADECIMENTO

Agradecimentos às empresas, Central de Matérias Primas do Polo Petroquímico do Rio Grande do Sul BRASKEM, Unidade Guaíba CMPC Celulose Riograndense e Unidade Térmica Charqueadas TRACTEBEL Energia, que gentilmente permitiram o acesso as suas áreas industriais, cedendo amostras além de toda a colaboração necessária para sua coleta, especialmente a empresa COPELMI Mineração, que contribuiu diretamente com a cessão de colaboradores, e participando ativamente do projeto, em parceria com a UNILASALLE.

Referencia também deve se feita a todos os colaboradores, alunos de iniciação científica, colegas de mestrado participantes em varias das etapas, especialmente a meu orientador responsável direto pela concretização do estudo.

RESUMO

Grande volume excedente de cinzas da queima do carvão mineral não é aproveitado no Rio Grande do Sul e Brasil, causando impactos ambientais e problemas legais para seus geradores por sua deposição sistemática. Busca-se auxiliar a potencializar o uso das cinzas, principalmente as pesadas, através de informações e dados específicos das usinas geradoras da região carbonífera gaúcha, seguindo a tendência de várias pesquisas em nível nacional e mundial que vêm caracterizando as cinzas e elencando suas potencialidades para aproveitamento industrial, buscando ampliar a sustentabilidade do setor. O carvão gerador e as cinzas volantes e pesadas dos maiores consumidores regionais foram amostrados e caracterizados para o estudo localizado, além de realizada uma ampla pesquisa bibliográfica e entrevistas de campo nas empresas usuárias, elencando as alternativas tecnológicas de aplicações históricas e atuais para o material. Associando fatores decomposição do carvão, condições de combustão, sistema de controle de emissões das empresas, métodos de disposição utilizados, aliados à caracterização química, física e mineralógica dos materiais e ao estudo das tecnologias atuais viáveis mais praticadas, avaliaram-se as distinções entre as cinzas amostradas, buscando dentro de suas propriedades suas melhores aplicações de aproveitamento econômico-ambiental eficaz como insumo para a indústria da construção civil, principalmente, indústrias cimenteiras. As avaliações dos resultados mostram claramente o potencial da cinza pesada após processo simples de caracterização e processamento, onde se reduzem as diferenças entre sua qualidade e seus contaminantes, atingindo características similares às das cinzas leves, amplamente consumidas.

Palavras-chave: Cinzas, Carvão, Resíduo, Reutilização, Sustentabilidade, Meio Ambiente.

ABSTRACT

Large excess volume of ash from burning coal is not used in the Rio Grande do Sul and Brazil, resulting in environmental impacts and legal problems for their generators because of its systematic deposition. We seek to help enhance the use of ash, especially the heavy, through information and specific data of the power generating plants located in Gaúcho's coal region, following the trend of many researches in the national and international level, that have characterized the ashes and enumerating its potential for industrial utilization, seeking to expand the sustainability of the sector. The generator coal and the fly and heavy ashes of the largest regional consumers were sampled and characterized to the localized study, besides having conducted an extensive bibliographic review and field interviews in the user companies, listing the technological alternatives historical and current of application of the material. Associating factors such as coal decomposition, combustion conditions, companies' emission control system, disposal methods used, along with chemical, physical and mineralogical characterization of the materials and the study of current technologies more viable practiced, the distinctions between the ashes sampled were evaluated seeking within its properties the ideal applications of economic and environmental use effective as inputs for the construction industry, mainly cement industries. The evaluations of the results clearly show the potential of heavy ash after simple process of characterization and processing, where the differences in its quality and the contaminants are reduced, achieving characteristics similar to those of fly ash, widely consumed.

Keywords: Ash, coal, residue, environment, reutilization, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pátio de estocagem de carvão mineral da TRACTEBEL.....	40
Figura 2 - Pátio de armazenagem de carvão mineral da BRASKEM	42
Figura 3 - Amostragem de cinza pesada.....	46
Figura 4 - Fluxograma da amostragem e operações iniciais e preparação.....	49
Figura 5 - Fluxograma das atividades de caracterização física.....	50
Figura 6 - Fluxograma das atividades de caracterização química.....	53
Figura 7 - Fluxograma das atividades de caracterização mineralógica.....	56
Figura 8 a 15 - Curvas granulometricas amostras de cinzas	58
Figura 16 a 23 - Reflectâncias amostras de cinzas leves e pesadas	61
Figura 24 - Dados do teste de moabilidade TRAC-PES-AM2	65
Figura 2 - Relação materiais inorgânicos, incombusto e volátil das cinzas.. ..	68
Figura 26 - Concetrações de SiO_2	74
Figura 27 - Concetração de Al_2O_3	75
Figura 28 - Diagrama de concentração SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3	75
Figura 29 - Difrátograma carvão alimento CMPC-PROD-AM2.....	81
Figura 30 - Difrátograma cinzas pesadas CMPC-PES-AM2	81
Figura 31 - Difrátograma cinzas leves CMPC-FLY-AM2	82
Figura 32 a 37 - Fotomicrografia de cinzas pesadas.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de resíduos para aplicação em construção de rodovias	25
Tabela 2 - Diferentes usos para as cinzas pozolânicas	26
Tabela 3 - Cronograma de visitas e amostragens.....	46
Tabela 4 - Distribuição granulométrica de produto, cinzas leves e pesadas CMPC..	59
Tabela 5 – Distribuição granulométrica produto, cinzas leves e pesadas TRACTEBEL.....	60
Tabela 6 - Distribuição granulométrica de produto, cinzas leves e pesadas BRASKEM	61
Tabela 7 - Parâmetros colorimétricos das cinzas leves e pesadas	63
Tabela 8 - Massa específica aparente (g/cm ³) cinzas pesadas e leves.....	64
Tabela 9 - Análises elementares..	67
Tabela 10 - Análise incombustos faixas de distribuição granulométrica AM4....	69
Tabela 11 - Óxidos elementos maiores	72
Tabela 12 - Óxidos elemento menores	77
Tabela 13 - Análise de lixiviados cinzas pesadas TRAC-PES-AM2.....	78
Tabela 14 - Análise de solubilizados cinzas pesadas TRAC-PES-AM2.....	79
Tabela 15 - Valores de pH das suspensão das cinzas.....	80
Tabela 16 - Classificação mineralógica visual cinzas pesadas AM4.....	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	16
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1	Questão das cinzas.....	17
3.2	Quebra de Paradigma para o desenvolvimento sustentável.....	18
3.3	Usos das cinzas.....	19
3.4	Principais aplicações de cinzas na atualidade.....	27
3.4.1	<i>Construção civil.....</i>	<i>27</i>
3.4.1.1	Cimento Portland Pozolânico.....	27
3.4.1.2	Artefatos para construção civil.....	29
3.4.1.3	Pré-moldados de concreto.....	31
3.4.1.4	Concreto celular.....	32
3.4.1.5	Concreto asfáltico.....	32
3.4.1.6	Aterros estruturais melhorados com aglomerado.....	32
3.4.1.7	Bases e sub-bases de pavimentos.....	32
3.4.2	<i>Remediação de solos contaminados.....</i>	<i>34</i>
3.4.3	<i>Obtenção de zeólitas.....</i>	<i>35</i>
3.4.4	Material cerâmicos e vitrocerâmicos.....	36
3.5	Carvão mineral fornecido pela COPELMI Mineração.....	38
3.6	Características das caldeiras e queima nas empresas amostradas.....	39
3.6.1	<i>Unidade Térmica de Charqueadas TRACTEBEL Energia -(UTCH).....</i>	<i>39</i>
3.6.2	<i>Central de matérias-primas da BRASKEN do Polo Petroquímico do RS.....</i>	<i>41</i>
3.6.3	<i>Unidade Guaíba da CMPC Celulose Riograndense.....</i>	<i>42</i>
4	EXPERIMENTAL.....	45
4.1	Materiais e reagentes.....	45
4.2	Amostragem e preparação de amostras.....	45
4.3	Caracterização física.....	50
4.3.1	<i>Análise granulométrica.....</i>	<i>50</i>
4.3.2	<i>Colorimetria.....</i>	<i>51</i>
4.3.3	<i>Massa específica.....</i>	<i>51</i>
4.3.4	<i>Índice de Trabalho de Bond.....</i>	<i>51</i>
4.4	Caracterização química.....	52

4.4.1	Análise elementar.....	53
4.4.2	Determinação de óxidos maiores, menores e elementos traços.....	54
4.4.3	Caracterização de resíduos, ensaios de lixiviação e solubilização.....	54
4.4.4	Potência hidrogeniônico (pH).....	55
4.5	Caracterização Mineralógica.....	55
4.5.1	Difratrometria.....	56
4.5.2	Morfologia.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1	Caracterização física.....	57
5.1.1	Análise granulométrica.....	57
5.1.2	Colorimetria.....	61
5.1.3	Massa específica.....	64
5.1.4	Índice de trabalho de Bond.....	65
5.2	Caracterização química.....	65
5.2.1	Análise elementar.....	65
5.2.2	Determinação de óxidos maiores, menores e elementos traços.....	71
5.2.3	Caracterização de resíduos, ensaios de lixiviação e solubilização.....	77
5.2.4	Potência hidrogeniônico (pH).....	80
5.3	Caracterização mineralógica.....	80
5.3.1	Difratrometria.....	80
5.3.2	Morfologia.....	82
5.4	Considerações finais.....	86
6	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	90
	APÊNDICE 1 - Portfólio carvão COPELMI.....	94
	APÊNDICE 2 - Classificação de resíduos.....	95
	APÊNDICE 3 - Análise Mineralógica.....	103

1 INTRODUÇÃO

No contexto energético mundial, o carvão mineral é visto como de importância capital. As previsões constantes em diversos relatórios, elaborados por instituições, grupos e organizações internacionais, preocupados com a produção de energia, são unânimes no sentido de que nas próximas duas décadas haverá um aumento no consumo de carvão fóssil, sendo apontado como a mais eminente alternativa para o petróleo, pois apresenta maiores possibilidades para produzir resultados positivos em curto prazo.

A abundância de reservas no Brasil e o desenvolvimento de tecnologias de extração, beneficiamento e combustão mais eficientes, conjugados à necessidade de expansão dos sistemas elétricos e restrições ao uso de outras fontes, indicam que o carvão continuará sendo, também no país, uma das principais fontes de geração de energia elétrica. Os principais depósitos estão situados no Paraná, em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, distribuindo-se em oito grandes jazidas, sete das quais no Rio Grande do Sul e uma em Santa Catarina, além de várias outras de menor porte. Assim em torno de 88% deste recurso localiza-se no Rio Grande do Sul (GOMES *et al.*, 1998).

A extração e o beneficiamento do carvão mineral promovem consideráveis impactos socioambientais que podem afetar os recursos hídricos, a atmosfera, o solo e o relevo das áreas circunvizinhas, assim como a combustão do carvão em indústrias e termelétricas igualmente podem causar graves impactos ambientais. Dentre os principais podem ser citados estão as emissões de material particulado e de gases poluentes na atmosfera sem meios efetivos de abatimento, bem como na produção de toneladas de cinzas de carvão no processo de geração de energia elétrica e vapor que devem ser dispostas ou utilizadas posteriormente.

Segundo Stamm (2003), grande parte dos resíduos sólidos gerados em uma usina termoeletrica a carvão é constituída pelas cinzas pesadas eliminadas no processo de combustão. Com o arraste hidráulico de cinzas, prática comum entre as usinas brasileiras, este resíduo sólido passa a compor um efluente líquido, que pode ocasionar graves consequências ambientais.

Conforme Kalkreuth *et al.* (2008), na geração de eletricidade as usinas termoeletricas do Brasil produzem cinzas na ordem de três (03) milhões de toneladas/ano, compostas de 65 até 85% de cinzas volantes e 15 até 30% de cinzas pesadas. A maior parte das cinzas pesadas é depositada em aterros (*landfills*) e/ou lagoas de decantação, sendo que apenas um pequeno montante é aproveitado no uso industrial, como na produção do cimento pozolânico e uso em pavimentações. O depósito desse material pode ocasionar problemas ambientais pelo enriquecimento de substâncias tóxicas presentes nas cinzas, tais como metais pesados e compostos policíclicos aromáticos.

No arraste hidráulico de cinzas existem dois fatores determinantes no potencial poluidor dos sistemas hídricos: o pH alcalino presente na sua composição e a solubilização de seus elementos quando em contato com a água de arraste. Devido ao fato de possuírem grandes extensões em suas bacias de decantação, existe a lixiviação de seus elementos, inclusive os metais pesados, que contaminam o solo e subsolo podendo atingir o lençol freático, estendendo seus efeitos sobre os animais e plantas que, se considerados os efeitos cumulativos dos metais pesados, podem vir a se tornar graves. O teor de compostos solúveis em cinza pode variar desde traços até vários pontos percentuais conforme região de origem.

As características físicas, químicas e mineralógicas das cinzas de combustão de carvão dependem de uma variedade de fatores, incluindo: a composição do carvão de origem, as condições de combustão, o tipo e a eficiência do sistema de controle de emissões e os métodos de disposição utilizados (ADRIANO *et al.*, 1980).

Portanto, é difícil generalizar acerca da composição e características das cinzas, ou sobre o seu comportamento no ambiente. Estudos localizados tendem a ser mais produtivos como estimuladores de viabilização do insumo, visto que melhor avaliam as características do resíduo frente a variações possíveis de carvões minerais diferentes, por motivo de origem do material, processos de blendagem, teores caloríficos ou qualquer outra propriedade do produto.

Supõe-se que as cinzas geradas em cada empresa tenham características próprias e, por isso apresentem também propriedades diferentes como matéria-prima para outros processos.

Pode-se elencar uma série de utilizações para o resíduo largamente utilizada em diversas épocas e em partes do mundo, além da utilização hoje consolidada na composição do cimento Portland, como:

- aditivos em cimento e cerâmicas, fabricação de blocos e tijolos (CALARGE *et al.*, 2000; CHIES *et al.*, 2003);
- ladrilhos e refratários (SILVA *et al.*, 1999);
- pavimentação e preenchimento de cava de mina de carvão (QUERALT *et al.*, 1997; VASSILEV *et al.*, 2001; HALL e LÍVINGSTON, 2002);
- extração de metais, como: Al, Si, Fe, Ge, Ga, V e Ni (RAYZMAN, 1997);
- extração de carbono não queimado (HAMLEY, 2001);
- adsorventes para gases de combustão (TSUCHIAI, 1995);

- produtos cerâmicos especiais (OZDEMIR *et al.*, 2001);
- painéis anti-incêndio (VILCHES, 2002);
- condicionamento de solos (MARTINS, 2001);
- controle de erosão (TISHMACK, 2001);
- solos artificiais (REYNOLDS, 1999).

Os estudos apresentados nesta dissertação foram realizados sobre amostras coletadas de cinzas leves e principalmente cinzas pesadas, provenientes de carvão mineral originário da região do Baixo Jacuí, no Rio Grande do Sul, queimado por grandes consumidores da região. Usinas que utilizam o insumo para geração de energia para seus processos e/ou venda direta para outros. Desenvolvidos na busca de auxiliar na obtenção de opções para a utilização do resíduo gerado por este processo, que possui grande valia comercial e de fortes impactos ambientais.

Os resultados obtidos mostram claramente a possibilidade de transformação da qualidade da cinza pesada, tornando-a competitiva com a cinza leve, única opção, hoje, das indústrias cimenteiras como insumo ao cimento.

A seguir, são apresentadas a descrição dos estudos, seus resultados e a indicação dos principais usos possíveis para o resíduo de cinza pesada para a indústria de construção civil, como opção para um rápido e eficaz aproveitamento econômico dos grandes depósitos de cinzas pesadas consolidados no estado.

2 OBJETIVOS

Esforços para mitigar os impactos ambientais decorrentes da disposição de cinzas geradas na combustão de carvão no meio ambiente e incentivar a aplicação em processos de maior valor agregado vêm ocorrendo no sentido de encontrar potencialidades para a sua utilização em outros processos industriais.

Como objetivo principal pretende-se identificar as possíveis aplicações para as cinzas de combustão do carvão, especialmente para as cinzas pesadas, buscando-se alternativas viáveis para a melhor utilização do resíduo mineral e contribuir para o desenvolvimento sustentável da região produtora, reduzindo ou eliminando ao máximo seu potencial poluidor.

Como metas específicas e estratégicas, citam-se:

- Gerar interesse econômico para recuperar ambientalmente as áreas impactadas nos atuais locais de armazenamento das cinzas pesadas, com a possibilidade de seu reaproveitamento como matéria prima bruta em outros processos;
- Geração de renda e empregos no aproveitamento dos resíduos, garantindo a continuidade de utilização socioeconômica do insumo;
- Atender às políticas ambientais da empresa, do estado e do país, bem como às legislações pertinentes, quanto à utilização e destinação de resíduos de natureza industrial;
- Avaliar o desempenho do processo de queima do carvão nas três empresas, central termoelétrica da cidade de Charqueadas (UTCH), unidades industriais como CMPC S/A e BRASKEM S/A, para potencializar o melhor uso da matéria-prima;
- Potencializar o aumento da interação entre as mineradoras, indústrias e termoelétricas consumidoras, entidades de pesquisa científica e os prováveis consumidores das cinzas através das informações obtidas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Questão das cinzas de carvão

Segundo Rohde *et al.* (2006), a produção de resíduos da queima de carvão fóssil é uma consequência inevitável da utilização deste recurso natural não renovável como combustível. Do total de carvão queimado no Brasil, apenas 30% das cinzas são comercializadas. Daí a importância do desenvolvimento de pesquisas, produtos e técnicas que busquem o aproveitamento destes resíduos. Ainda de acordo com os autores, a cinza é qualitativamente e quantitativamente diferente da matéria-prima que a originou, ou seja, o carvão mineral.

A empresa Copelmi Mineração Ltda. atua no ramo de mineração de carvão mineral há mais de 126 anos sendo hoje reconhecida a maior empresa de capital privado brasileiro de mineração de carvão mineral, possuindo mais de dois bilhões de toneladas de recurso geológico legal de área explorável em todo o estado do Rio Grande do Sul, conforme Anuário Mineral Brasileiro, 2010.

Como maior produtora privada de carvão mineral do Brasil, fornece diferentes produtos para seus clientes através das suas frentes de lavra e beneficiamento de carvão das minas do Recreio, Butiá Leste e Cerro. As duas primeiras no município de Butiá e a última no município de Cachoeira do Sul, considerada jazida carbonífera do Baixo Jacuí, ambas no estado do Rio Grande do Sul, produzem cerca de 120.000 t/mês de carvão beneficiado. A empresa vende sua matéria-prima para diversos consumidores, dentre os quais as empresas geradoras de energia como a Tractebel Energia S/A, em sua central termoelétrica da cidade de Charqueadas (UTCH), ou empresas que utilizarão o combustível para geração de vapor em suas unidades industriais como CMPC S/A e Braskem S/A. Cada empresa consome cerca de 20.000 t/mês de carvão beneficiado com características e qualidades diferenciadas.

Por força de contrato, as três empresas acima citadas, que fazem parte do escopo deste estudo por serem alguns dos maiores consumidores do carvão em volume do local, remetem as cinzas não aproveitadas para a disposição na empresa Copelmi Mineração Ltda.

A Tractebel remete em torno de 11.000 t/mês de cinzas, a CMPC 6.000 t/mês e a Braskem 7.000 t/mês. Juntas, totalizam 24.000 t/mês de cinzas que são utilizadas

na recomposição e recuperação de áreas mineradas, sendo depositadas nos pátios da unidade do Recreio, à espera de destinação.

Atualmente, a empresa Copelmi conhece pouco sobre as características físicas, químicas e mineralógicas deste material, bem como as possíveis utilizações técnicas viáveis para o resíduo, tendo por consequência um acúmulo do material em seus pátios devido à baixa demanda.

3.2 Quebra de paradigma para o desenvolvimento sustentável

No Brasil, e principalmente no Rio Grande do Sul, existe uma série de barreiras para a utilização das cinzas como matéria-prima, especialmente as pesadas, conforme segue:

- inexistência de um diálogo entre o setor carbonífero, mineradoras de carvão, usinas termoelétricas, indústrias com entidades de pesquisa e órgão de controle ambiental gerando falta de políticas, legislação e subsídios favoráveis que venham a incentivar o consumo desses resíduos, com potencial consumo das cinzas;
- vários estudos são feitos de forma isolada e faltam estudos econômicos confiáveis locais demonstrando a viabilidade econômica para o uso das cinzas como produto em outros processos como elemento de redução de custo;
- as usinas não estão preparadas e, de certa forma, estão desinteressadas em investir neste campo de estudo, e até mesmo para um adequado fornecimento de cinzas, classificando-as simplesmente como resíduo descartável.

O carvão é um insumo energético e econômico importante, mas classificado como um problema ambiental de difícil solução e atingido pela política de baixo incentivo ao setor energético. Isso repercute no desestímulo à pesquisa em temas como as cinzas de carvão mineral, posicionando o país na contramão das tendências mundiais em compatibilizar todas as vertentes, ambiental-econômica-social, buscando o melhor aproveitamento de resíduos-insumos na busca da sustentabilidade.

“A proteção ambiental é um dos maiores desafios que a sociedade enfrenta na atualidade. Os elementos centrais desta preocupação são as reduções no consumo energético e de matérias-primas e a produção de resíduos” (VILCHES, 2002).

3.3 Uso de cinzas

Registros da utilização de cinzas sejam elas naturais ou artificiais, na substituição de argilas em produtos cerâmicos de obras antigas, como as pirâmides de Shensi, na região do Tibet, ou a famosa muralha da China, mescladas por suas propriedades pozolânicas com cal. Também a registros na antiga Índia e Israel, assim como no Egito do uso de argamassas envolvendo cales, gesso e materiais com propriedades pozolânicas muitos séculos antes de Cristo. Vestígios de antigas obras dos povos Gregos e Romanos utilizavam intensamente as misturas de pozolanas em grandes construções como a Grande Cloaca de Roma, por volta dos anos 600 a.C., da via Ápia, o Panteão Romano (270 a.C.), o Coliseu (80 d.C.) e a Basílica de Constantino, dadas as qualidades de resistência que apresentavam à ação continuada da água doce e salgada. Segundo Sestini, apud Ruiz, A. L. (2008), o material do porto de Civitavecchia, construído há quase vinte séculos, aparece, atualmente, com uma resistência à compressão de 3,5 a 4,9 MPa, o que demonstra a resistência deste produto às agressões químicas da água do mar (CHIES *et al.*, 2003).

Empregados desde idos tempos até o princípio do século XIX, quando Luiz Vicat, em 1823 inventou o cimento Portland artificial, as cinzas vulcânicas e alguns outros materiais produzidos artificialmente tiveram o importante papel no desenvolvimento da engenharia, principalmente civil, pois toda a classe de construções era realizada com cales hidráulica e cimentos artificiais, o que permitiu um prodigioso desenvolvimento da construção civil nas obras públicas. No início do século passado, paralelamente ao reinício do aproveitamento de pozolanas naturais em misturas com aglomerantes tipo cal e cimento Portland, surgiam nos Estados Unidos da América e na Europa, devido, principalmente, à proliferação de usinas termoeletricas à carvão, subprodutos industriais com propriedades pozolânicas - cinzas de fundo e cinzas volantes - provenientes do carvão mineral, que começavam a ser utilizado como combustível, para gerar vapor em termoeletricas e outras unidades industriais. Estes novos materiais, à semelhança das pozolanas artificiais e naturais, mostraram muita afinidade com aglomerantes tipo cal (CHIES *et al.* 2003).

A busca de um produto novo, de menor custo, bem como a preocupação com os efeitos da disposição das cinzas levaram várias instituições de pesquisa a estudarem a sua utilização como material de construção. A primeira utilização da cinza volante como agente cimentante, no concreto, ocorreu em 1936 nos Estados Unidos da América, na construção de alguns quilômetros de parede de retenção, ao redor do lago Michigan e, em 1938, iniciou-se o seu aproveitamento, como substituto do cimento na pavimentação. O primeiro uso registrado de cinzas volantes de carvão, em concreto-massa, foi em obras de reparo de canais de desvio temporário, junto a usinas hidroelétricas, através da injeção de pasta de cimento com cinza sobre agregados acomodados em formas. O uso de cinza volante em construções de concreto e massa convencionais, nos Estados Unidos da América, foi iniciado pelo Federal Bureau of Reclamation com a construção das barragens de Hungry Horse e Canyon Ferry, em Montana, no período de 1948 a 1953. As cinzas procedentes de Chicago apresentaram excelentes resultados quando utilizadas em teores que variaram entre 24 a 32% das massas do concreto (CHIES *et al.* 2003).

Experiências utilizando cinzas de carvão, assim como nos Estados Unidos da América, foram registradas, também, em todo o mundo, principalmente na Europa, tanto ocidental como oriental. Nos países da antiga cortina de ferro, principalmente na União Soviética, as cinzas, tanto de fundo, como volantes, passaram, a partir da década de sessenta, a serem consideradas como materiais de construção, com qualidades insuperáveis, sendo recomendadas na fabricação de cimento Portland pozolânico, para a

construção de agregados, artefatos para a construção civil, blocos de fundação, agregados leves, concretos leves, etc.(CHIES *et al.*, 2003).

Na Europa, assim como nos Estados Unidos da América, se difundiu muito, a partir dos anos sessenta, o uso de resíduos industriais, principalmente, cinzas de carvão, estabilizadas com aglomerantes em bases, sub-bases e reforços do subleito em pavimentos. Em países como a Inglaterra, França, Suécia, Rússia e outros, o uso de cinzas de carvão em bases e sub-bases de pavimentos faz parte das alternativas convencionais (CHIES *et al.*, 2003).

Grandes quantidades de cinzas volantes e cinzas de fundo da combustão do carvão mineral têm sido usadas, também, em muitos países europeus, na forma natural, em aterros estruturais. Na Inglaterra, estes aterros são encontrados em auto estradas, barragens, aeroportos e em outras aplicações de massa onde bases estáveis são requeridas. Nos Estados Unidos da América é comum o emprego de cinzas de carvão em diques, barragens e aterros em geral (CHIES *et al.*, 2003).

Segundo Rohdeet *al.*(2006), os processos de utilização termoelétrica do carvão originam vários resíduos, denominadas cinzas que são classificados em:

- escórias: são as maiores partículas que ficam no fundo da fornalha, onde, devido ao seu peso, não são arrastadas por meio hidráulico;
- cinzas de fundo ou cinzas pesadas: são partículas que se alojam no fundo da fornalha e são transportadas por arraste hidráulico até a bacia de decantação;
- cinzas volantes ou cinzas leves: constituídas de partículas extremamente finas (<0,15 mm) arrastadas pelos próprios gases de combustão produzidos nas fornalhas.

Importantes contribuições nas últimas décadas vêm sendo dadas, na área de utilização de resíduos de carvão, para a construção de estradas e habitações, também por países como África do Sul, Austrália, Índia e Japão, onde o uso das cinzas volantes estabilizadas com solos e cal é apreciável.

Alguns países asiáticos, por sua vez, são grandes consumidores de resíduos da combustão de carvão. A China, por exemplo, é o maior produtor e consumidor de carvão energético do planeta e, também, o maior gerador de cinzas. Poucas informações, no entanto, a respeito chegam ao Brasil. Quanto ao aproveitamento das cinzas de carvão para a fabricação de artefatos para a construção civil, como tijolos, blocos, lajotas, etc., já é apreciável, principalmente nos países do leste europeu e nos Estados Unidos da América.

O uso de cinzas volantes para produção de blocos para alvenaria, segundo Slonaker, apud Andrade (1991), parece ter se iniciado por volta dos anos quarenta, pois encontrou material bibliográfico, daquela época, referindo-se a tijolos de cinza volante que apresentavam fissuras.

Em 1967, reuniram-se nos Estados Unidos alguns estudiosos de vários países para reunir e apresentar o que estava sendo desenvolvido em termos da utilização das cinzas do carvão a época. Vários temas foram tratados como, por exemplo, especificações, problemas de mercado, utilização de cinza volante no concreto, na construção de estradas, em blocos de concreto, em tijolos, como agregado leve, na agricultura e

experiências realizadas em países como França, Alemanha, Polônia, entre outros (CHIES *et al.*, 2003).

Em 1986, foi construído um aterro experimental com cerca de 200 metros de comprimento e quatro metros de altura, utilizando escórias da termoeletrica de São Jerônimo, no Rio Grande do Sul. A fiscalização sobre as atividades de construção do trecho confirmou as expectativas da boa estabilidade do aterro formado, devido às características da cinza (ROHDE *et al.*, 2006).

Shafer apud Andrade (1991) estudou oito cinzas volantes e oito cinzas de fundo diferentes, buscando minorar os custos e melhorar as propriedades destes tijolos. Analisou os teores utilizados, principalmente do silicato de sódio, que foi o componente mais caro da mistura e concluiu que um pequeno acréscimo, no teor de cinzas leves, melhora a qualidade dos tijolos se que uma redução no silicato de sódio para 2,5%, diminui o custo, sem prejudicar o resultado final.

Capp e Spenser apud Andrade (1991) publicaram um sumário sobre as utilizações que vêm sendo dadas às cinzas volantes. No que tange aos tijolos, além daquelas já comentadas, aparecem, também, misturas de argila com cinza volante, cinza grossa com cinza volante e areia com cinza volante. O primeiro tipo buscava melhorar a plasticidade de certas argilas; o segundo, incrementar a resistência dos tijolos antes da queima; e o último, produzir um bloco não queimado, onde a cinza volante deveria possuir teor de cal para possibilitar pozolanicidade. Os resultados foram satisfatórios, à exceção do terceiro tipo que apresentou resistência mais baixa.

Beretka e Brown apud Andrade (1991) investigaram as várias utilizações da cinza volante fazendo estudos sobre seu uso no cimento, no concreto, como agregados sintéticos, na produção de material leve com incorporação de ar, em estradas e pavimentos e na produção de tijolos e blocos. Segundo estes autores, tijolos de argila misturados com cinza volante ou de fundo já eram conhecidos, desde há duzentos anos e são produzidos comercialmente na Grã-Bretanha, USA e França. Na Austrália produzem-se tijolos de cinza volante e cimento em Queensland. No estudo destes autores testes de resistência foram realizados em duas séries de amostras. A primeira era representada por corpos de prova produzidos com doze cinzas volantes diferentes, misturadas com 50% de argila. Na segunda, quantidades crescentes de dois tipos de cinzas volantes (uma de boa e outra de má qualidade) eram adicionadas à argila. Os corpos de prova eram queimados em forno. Os resultados demonstraram que apenas três, das doze cinzas experimentadas, conduziam a resultados mais favoráveis que o tijolo cerâmico de controle e que as quantidades crescentes de cinza de boa qualidade, levavam a um aumento da resistência mecânica, enquanto que maiores teores da cinza de má qualidade causavam um decréscimo da mesma.

O Central Building Research Institute of India apud Andrade (1991) tem estudado a produção de materiais mais baratos, utilizando solos de diferentes origens misturados com cinza volante. O alto custo da queima dos tijolos vem sendo minimizado com a utilização de resíduos, como por exemplo, a casca de arroz, como combustível.

Manz apud Andrade (1991) relatou um trabalho que foi realizado em 1960 para a Otter Tail Power Company Fergus Falls Minnesota, e que foi reativado e enfocado nos produtos da Great Plains Gasification Plant in Beulah, North Dakota. O estudo utilizou amostras com teores baseados nos produtos do Coal Research Bureau da West Virginia University, já referidos, e descobriu que para as cinzas testadas, os melhores resultados de resistência eram obtidos quando o silicato de sódio era eliminado. Foi encontrada uma mistura ótima formada de 55% de cinza leve e 45% de cinza de fundo, queimada em forno. Num segundo passo, foi testada uma cinza volante rica de óxido de cálcio, eliminando a queima dos tijolos. Eles foram simplesmente prensados e secos a 100°C. Suas próprias reações pozolânicas foram responsáveis pelo endurecimento. Os resultados dos

dois tipos respeitaram as exigências da ASTM quanto a resistência e absorção. A resistência do grupo submetido à queima ficou bem acima do outro. Porém, a economia conseguida foi bastante atraente para a utilização do produto não queimado. A absorção não variou. Painéis de tijolos de ambos os tipos haviam sido destruídos e deixados expostos ao meio ambiente por cerca de dezesseis anos. Acima deste período, eles apresentaram pequena deterioração.

Day apud Andrade (1991) realizou ensaios moldando cilindros de cinza volante ou de misturas de cinzas volantes e de fundo adicionando, separadamente, hidróxido de sódio, carbonato de sódio, silicato de sódio (que são materiais ligantes) e água pura. Os resultados de resistência, em sua maioria, atenderam às exigências da ASTM para o tipo SW. Já no ensaio de absorção em água fervente - 5h, alguns caíram para a faixa de NW. As absorções iniciais foram muito altas. Análises físico-químicas foram realizadas demonstrando as transformações ocorridas durante a queima na estrutura do material. Os valores elevados de absorção foram explicados como devido à alta porosidade apresentada pelo produto depois de queimado.

Baradan apud Andrade (1991) executou ensaios com amostras de cinza volante mistura de diferentes teores de cimento Portland, cal virgem e cinza de fundo. Os espécimes eram curados a 60°C e 100% de umidade relativa, por três horas e então, ficavam aguardando ensaios. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e flexão foram bons, mas os de absorção foram elevados e surgiram algumas eflorescências.

Além de tijolos de cinza queimados, muitos estudos foram realizados desde o final do século passado principalmente nos países europeus, da antiga Cortina de Ferro, voltados à fabricação de tijolos e blocos conhecidos na literatura mundial como sílico-calcários autoclavados. Trata-se de artefatos enrijecidos pela reação do silício da areia quartzosa ou da cinza de carvão com o cálcio da cal, após tratamento hidrotérmico. Apesar das ideias iniciais e patentes terem sido originadas na Inglaterra e Alemanha, foi na Rússia, posteriormente União Soviética, que começaram as produções em massa.

No início, os produtos autoclavados, constituídos de areia e cal, restringiam-se a tijolos e blocos sem função estrutural. A partir da década de trinta, na União Soviética, e quarenta, na Europa Ocidental, desenvolveram-se processos que permitiram a fabricação de elementos com altas resistências, próprias para a alvenaria estrutural, que estava despontando. Outras matérias-primas passaram também a ser adotadas, com excelentes resultados, como cinzas de carvão, escórias, etc.

Manz apud Andrade (1991), a partir de um levantamento realizado entre os anos de 1989 e 1994, quantificou a produção e utilização mundial de cinza de carvão.

Conforme se depreende as cinzas de carvão, tanto volantes como de fundo, estão firmemente estabelecidas, principalmente na Europa e América do Norte, como um sub produto comercialmente viável. De uma maneira geral,

os grupos industriais que utilizavam as cinzas enquadram-se nas categorias:

- construção: é o setor que mais utiliza resíduos da combustão do carvão, tanto em misturas com aglomerantes, na produção de concreto de cimento, cimentos Portland pozolânicos, argamassas, bases estabilizadas de pavimentos, concretos asfálticos, como na forma natural (sem aglomerantes) em aterros, camadas de pavimentos, diques, barragens;
- fabricação: destacam-se neste setor os grupos industriais voltados à fabricação de artefatos para a construção civil, nos ramos de fabricação de artefatos de cimento, concreto celular, sílico-calcários, cerâmicos, sinterizados, agregados leves, concretos leves, plásticos;
- estabilização de resíduos: uso em crescimento onde resíduos tóxicos têm sido imobilizados, pela estabilização e solidificação usando cinzas com água e produtos aglomerantes.

Existe uma preferência das indústrias cimenteiras pelas cinzas leves, enquanto as cinzas pesadas vêm sendo empregada somente na recuperação de áreas degradadas próximas à usina do Complexo Jorge Lacerda.

Diversas pesquisas em termos nacionais foram desenvolvidas com vistas à implementação do uso das cinzas de carvão geradas nacionalmente por vários setores, instituições e pesquisadores.

Em 1966, o Departamento de Exploração Mineral analisou a utilização de cinza volante de Charqueadas para utilização como lama de perfuração e concluiu pela não aplicabilidade.

A Escola Nacional de Química testou as cinzas volantes de Charqueadas para obtenção de sulfato de alumínio e concluiu pela não aplicabilidade.

Em 1968, a SESPLAN-RJ experimentou o uso de cinzas volantes também de Charqueadas para o uso como dispersante em inseticidas e elementos integrantes de rebocos de casas. Definindo como desfavoravelmente contra o seu uso, mas indicada sem contra indicação para reboco de casas de pau-a-pique.

Segundo a SESPLAN-RJ, o DNER testou o material como carga para substância betuminosa com parecer favorável.

Na década de 1980, o DAER-RS desenvolveu técnicas construtivas apropriadas para aterros em São Jerônimo e Charqueadas, na estrada para a ponte de ligação entre São Jerônimo e General Câmara com o uso de escória e cinzas pesadas.

Em 1970, IPR-RJ, DER-SC e COPPE-RJ desenvolveram pesquisas conjuntas sobre estabilização de solos com a utilização de cinzas volantes e cal hidratada.

Na UCS, em 1987, desenvolveram-se estudos para o uso de cinzas de carvão fóssil para formação de blocos maciços de concreto celular obtendo ótimos resultados com materiais de baixa massa específica e boa resistência, mas com dados não repassados ao setor produtivo.

Na década de 90, a empresa Dagoberto F. Barcello S.A, em Caçapava do Sul, produziu cales hidráulicos com utilização de cinzas, gerando diversas dissertações de mestrado, na UFRGS. Estudos voltados ao aperfeiçoamento de tijolos maciços em prensas manuais a partir de cal pozolânica (cinza volante de Candiota + cal hidratada + areia de dunas) foram desenvolvidos na FURG, obtendo o tijolo com características físico-químicas compatíveis para vedação de casas, além da construção de trechos experimentais com mistura de areia-cinza-cal revestidos de blocos intertravados de concreto.

As empresas CRM e Shigarali estudaram com bons resultados para o uso de argilito superior com cinzas volantes em indústria cerâmica.

Rohde *et al.* (2006) desenvolvem um dos mais completos trabalhos de pesquisa nacional sobre a caracterização de cinzas de carvão, além de ampla discussão sobre todos os estudos realizados pela própria instituição e outras, com uma abordagem abrangente sobre o tema de utilização de cinzas leves e pesadas brasileiras e toda sua importância. No estudo, avaliam as várias possibilidades para utilização do resíduo em diversos processos muito testados pela própria instituição, a citar-se:

- Projeto Cicasol;
- Projeto Constructil;
- Pavimentos flexíveis, do Engº Murilo Lopes de Souza de 1966, adaptado em 1999 por contrato entre a CIENTEC e Prefeitura de Charqueadas para três trechos experimentais da Rua Castro Alves;
- Projeto Cincal de 1992 a 1996 com apoio da FAPERGS;
- Projeto Cipecal 1995 – Cinza pesada com cal hidratada para manufatura de artefatos de cimento para construção civil;
- Casa de DEMHAB, na vila tecnológica;
- Aterros estruturais em cavas de mina;
- Aterro de 200 metros junto ao Arroio da Porteira;
- Rodovia de acesso à ponte entre as cidades de São Jerônimo e General Câmara;
- Copesul/DEPGO estudos do comportamento de bacias para implementação de núcleos industriais, CIENTEC;
- Construção de Bacias de Sedimentação da usina Presidente Médici, em Candiota;
- Concreplast – construção de dormentes ferroviários para a RFFSA;
- Redução do uso de argila na fabricação de tijolos pela CIENTEC, em parceria com o DEMEB/DEPGEO;
- Dessulfurização de Gases do DEPROC;
- Projeto Zeotec de “Remoção de Fe, Zn, Cu, Pb das águas residuárias usando zeólitas do tipo chabozita, produzidas das cinzas de carvão fóssil sul-brasileiro”; “Modificação da microestrutura cristalina das Cinzas de carvão com solução alcalinas”; “Zeolitização das cinzas obtidas da combustão do carvão de Candiota, RS.

Conforme Rhode *et al.*(2006), apesar das muitas aplicações criadas para os resíduos da combustão de carvão, o aproveitamento no mundo, em média, atinge cerca de 25-30% do total gerado, variando em cada continente. Cincotto (1988) relata o trabalho desenvolvido pelo Comitê de Pesquisas em Materiais Residuais e Subprodutos para Construção de Rodovias, da Organization for Economical Cooperation and Development (OECD), que propõe classes de resíduos em função de sua afinidade como material de construção (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação de resíduos para aplicação em construção de rodovias

CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Escória de alto forno	Escória de fosfato	Refugos de ouro
Cinza volante	Escória de cobre	Refugos de cobre
Enxofre	Finos de fabricação de cimento	Refugos de chumbo e zinco
Escória de refino	Resíduos de pedreiras	Moinha de coque
Cinza de caldeira e de grelha	Refugos de minas	Areia de fundição
Escória de níquel	Resíduo de ardósia	Resíduos de refratário e cerâmica
Resíduos de demolição	Refugos de feldspato	Resina
Rejeitos de mina de carvão	Pneus e borracha	Lignina
Resíduos de xisto betuminoso	Escórias de zinco e de chumbo	Resíduos de minas de potássio
Refugos de taconita	Cinza mista	Cinzas de pirita
Areia de tratamento de argila	Resíduos de incineração	Resíduos de vidro
Refugos de minérios de ferro		Resíduos de plástico
Resíduo de pirólise		

Fonte: OECD (In: Cincotto, 1988)

A tabela 1 mostra uma relação genérica de resíduos e subprodutos para aplicações gerais e como cimentantes na construção. Os materiais foram colocados por ordem de valor para a construção de rodovias em cada classe:

- classe1: materiais com potencial de aplicação máxima. Possuem as melhores propriedades tanto na sua ocorrência natural, na forma processada ou combinada, ou quando já registrado um desempenho satisfatório;
- classe 2: materiais que requerem um processamento mais extensivo e/ou quando as suas propriedades não são tão adequadas quanto às da classe 1

- classe 3: materiais que se mostram menos promissores dos que os materiais da classe 1 e 2, recomendados somente para casos isolados;
- classe 4: mostram-se muito pouco promissores como material para construção civil.

Como relatado no histórico da utilização de cinzas, diversas linhas de pesquisa têm sido alvo de estudo ao longo dos últimos anos, e porque não dizer milênios, visando à viabilização técnica da utilização da cinza de carvão como uma matéria-prima para processos de transformação, dentro da indústria da construção civil e área ambiental, entre outras.

“Cincotto aponta utilizações identificadas em diferentes bibliografias para as cinzas leves e pesadas (tabela 2). Dessas, no Brasil, o principal mercado está na fabricação de cimento Portland pozolânico” (Depoi, 2010).

Tabela 2 - Diferentes usos para as cinzas pozolânicas

Resíduo	Características	Produtos elaborados	Vantagens
Cinza pesada	Subproduto da combustão do carvão Partículas com tamanho de 0,08 a 20mm Forma angular Muito porosa	Cimento Agregado leve Sub-base de solo estabilizado Telha	Economia de energia Aumento da capacidade de produção para um gasto de capital relativamente mais baixo
Cinza leve	Subproduto da combustão de carvão Menores partículas carregadas pelos gases da combustão para as chaminés Composição: SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_3 Em menor quantidade: CaO , MgO e Na_2O	Cimento Concreto Agregado leve Sub-base de solo estabilizado Filler de asfalto Tijolo	Economia de energia Aumento da capacidade de produção para um gasto de capital relativamente mais baixo Textura fina Baixa massa específica Facilidade de combinação com a cal livre (propriedade pozolânica) Presença de partículas esféricas Alta capacidade de absorção de água

Fonte: OECD (in: Cincotto, 1988).

Notícias como as publicadas em 26/04/2011 pelo blog eletrônico Br101-Sul (“Aterro de cinzas é iniciado em viaduto de Tubarão”), informando o início de mais uma das etapas de execução da cabeceira sul de acesso ao viaduto central da cidade de Tubarão, utilizando cinzas de carvão provenientes das bacias de

decantação da unidade termoeleétrica de Jorge Lacerda junto aos blocos EPS como primeira camada base, devido a sua grande capacidade de compactação, além de levantar questões como custo de logística devido a sua baixa densidade.

O jornal eletrônico GSMFans, de 11/05/2011, noticia que “Cinzas do carvão viram concreto ecológico”. Na universidade de Louisiana Tech, criou-se um polímero inorgânico, ou geopolímero, a partir das cinzas de combustão, substituindo o concreto convencional que é responsável entre 5 e 8% de todo o CO₂ do planeta, que além de reduzir as emissões em 90% do ciclo do concreto, o novo material é mais durável e resistente para os efeitos da corrosão e altas temperaturas (até 1300°C).

Conforme reportagem publicada por Daniele Jordan, Ambientebrasil (2010), “Uma das aplicações das cinzas de carvão é a fabricação de tijolos ecológicos”. A alternativa barateia o custo da construção civil. O geólogo e responsável pelo Departamento de Meio Ambiente da Fundação de Ciência e Tecnologia, CIENTEC, OlegZwonok, ressalta que o carvão é considerado uma boa alternativa para uso energético. “*O tijolo ecológico não precisa de rejunte, uma economia a mais, sem contar a redução do tempo de construção*”, destacou.

3.4 Principais aplicações de cinzas na atualidade

A seguir, citam-se as principais aplicações de cinzas que são consolidadas, prática comum em nível mundial.

3.4.1 Construção civil

Entre as possíveis e desejáveis soluções para a questão do resíduo industrial de cinzas de carvão, encontra-se ampla possibilidade de sua valorização como matéria-prima no processo produtivo da construção civil.

3.4.1.1 Cimento Portland pozolânico

É a maior e a mais importante de todas as utilizações largamente conhecida e utilizada para as cinzas volantes geradas na combustão de carvão. Todas as indústrias cimenteiras brasileiras e mundiais utilizam em larga escala quantidades de

cinzas volantes geradas nos grandes consumidores de carvão. O negócio tem tamanho vulto que as próprias empresas administram e custeiam estes complexos sistemas dentro das próprias instalações dos geradores, na busca de manter a exclusividade no resíduo e pagando pelo insumo valores cada vez mais inflacionados devido à tendência de aumento do custo das matérias-primas naturais envolvidas na fabricação do cimento.

O Brasil já ocupa lugar de destaque sobre utilização dos materiais pozolânicos oriundos das cinzas da combustão do carvão. Enquanto que em níveis mundiais se utilizam cerca de 5 a 8% de cinzas na massa de cimento final, a indústria brasileira possui conhecimento para usos das cinzas com valores em torno de 25% da massa.

Conforme é informado no *site* da empresa de Cimento Pozosul, a propriedade fundamental de um material pozolânico é a sua capacidade de combinar com a cal livre do cimento (hidróxido de cálcio). O cimento Portland ao ser hidratado, libera hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), muito sensível a ataques químicos.

Conforme NBR 5736, que fixa condições exigíveis de qualidade para Cimento Portland Pozolânico, determina-se como exigência química a Perda ao Fogo de 4,5% sobre a massa, uma atividade do material pozolânico utilizado como adição de no mínimo 75% aos 28 dias de idade. O teor de material pozolânico deve ser determinado mediante ensaio de resíduo insolúvel, levando em conta a insolubilidade e solubilidade parcial do clínquer e do material pozolânico usado, respectivamente.

Algumas indústrias cimenteiras, empresas de produção de concreto asfáltico, pré-moldados de concreto e concreto celular, já fazem uso de cinzas pesadas dentro das suas formulações regularmente, e vêem ampliando estas quantidades em seus produtos, principalmente em épocas de baixa disponibilidade de oferta das cinzas leves, crescente ao longo do tempo.

A empresa Cimbagé, do grupo Votoram, possui em sua unidade de Nova Santa Rita uma unidade de processamento e secagem de cinzas pesadas. Esta empresa processa mensalmente cinzas pesadas obtidas de bacias de deposição das empresas consumidoras de carvão da região. O produto obtido é utilizado como aditivo complementar na formulação do cimento fabricada pela sua unidade.

De um modo geral, as cinzas pesadas possuem granulometria mais grossa em relação à cinza volante, o que naturalmente leva a um decréscimo da atividade

pozolânica, mas ainda atendendo às especificações de normas para serem consideradas como pozolanas.

A utilização de escórias de cinzas resultantes de queimas em grelhas, como é o caso da unidade da empresa Cimento Supremo, localizada na cidade de Pomerode, na região serrana do estado de Santa Catarina. Esta unidade tem instalado um sistema de britagem, seleção e secagem de escória obtida junto às empresas produtoras de materiais cerâmicos da região. No caso específico da empresa Cimentos Supremo, sua unidade de secagem se encontra dentro da empresa Cecrisa, uma parceria vantajosa para as duas empresas. A empresa consumidora de carvão e geradora de escórias tem a liberação do ônus do resíduo e sua manipulação.

3.4.1.2 Artefatos de construção civil

Vários estudos e testes foram e continuam sendo realizados na última década com o intuito de inserção ou potencialização do uso de cinzas em artefatos de cimento para construção civil, como tijolos, blocos intertravados e normais para calçamento e blocos de alvenaria.

O projeto CIPECAL, desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo e cal hidratada, estudo de autoria da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC), sob coordenação de Chies *et al.* (2003), executou um amplo e completo estudo de avaliação da utilização de cinzas de fundo de lagoas em elementos de construção, tijolos estabilizados com cal hidratado a partir de cinzas de carvão. Utilizando cinzas das lagoas de decantação com procedência da BRASKEN (antiga COPESUL), CMPC Celulose Guaíba (antiga Aracruz), além das centrais termoelétricas da cidade de Candiota, Charqueadas, localizadas no RS e Jorge Lacerda, em SC.

Com o objetivo de avaliar a possibilidade de fabricar tijolos e blocos prensados, destacam-se algumas importantes avaliações:

Para todas as cinzas, houve um crescimento da resistência à compressão simples como aumento do tempo de cura para todas as umidades. Este crescimento é mais acentuado nas cinzas de fundo de lagoa devido, provavelmente, a presença de cinzas volantes incorporadas. As cinzas volantes presentes, além de apresentarem uma maior atividade pozolânica, alteram favoravelmente à textura,

contribuindo, dessa forma, para uma melhor estabilização, tanto química como mecânica, respectivamente.

A média dos aumentos percentuais de resistência para as cinzas, levando em consideração as diferentes umidades de moldagem, podem ser consideradas como sendo da mesma ordem de grandeza, para os períodos de cura entre 7 e 14 dias e 14 a 28 dias. Esses valores, no entanto, variam muito de uma cinza para outra, revelando comportamentos heterogêneos entre as cinzas de diferentes procedências.

De uma forma geral, observa-se um crescimento não muito significativo das resistências à compressão simples, com o aumento da umidade de moldagem de 15 para 25%, principalmente para os períodos de cura de 14 e 28 dias, para sete dias de cura, os resultados são um pouco aleatórios.

Comparando os resultados obtidos com as especificações vigentes para tijolos cerâmicos convencionais de barro - NBR 7170 (1983), onde são definidas as categorias, A (1,5MPa), B (2,5MPa) e C (4,0MPa), constata-se que apenas os tijolos fabricados com as cinzas de fundo da Copesul e Tubarão atendem, após 28 dias de cura, as exigências estabelecidas para tijolos de categoria C. As cinzas restantes atendem as exigências estabelecidas pelas especificações da ABNT, para o mesmo período de cura, para tijolos de categoria B.

Para 14 dias de cura, as resistências à compressão simples dos tijolos fabricados com cinzas da Copesul, Tubarão e Riocell também atendem as especificações para tijolos de categoria B.

No que se refere às especificações para tijolos de solo-cimento, a NBR 8492 (1984) especifica que a média dos valores de resistência à compressão não deve ser menor que 2,0 MPa, nem valores individuais inferiores a 1,7MPa, com idade mínima média de sete dias. Estes valores são atingidos por todas as cinzas de fundo aos 28 dias de cura e também, com exceção de Candiota, aos 14 dias.

Empresas, como o grupo Votorantim, já implementaram projetos de utilização de cinzas pesadas de bacia, incorporando-as nos denominados *blocos intertravados* como ocorrem na unidade de Capivari de Baixo, em SC, que produz os blocos para alvenaria Blocolit e pisos para calçadas Pisolit.

A unidade foi comprada junto a um projeto em parceria com empresas alemã e a empresa CSN, posteriormente adquirida pelo Grupo Votorantim, concebida inicialmente por projeto para trabalhar com cinzas pesadas, hoje atuando com

cinzas leves da unidade térmica de Jorge Lacerda, devido à disponibilidade e economicidade. Os estudos confirmaram a viabilidade do material, apesar das maiores dificuldades técnicas e custos de produção envolvidos, devido a oscilações de características de qualidade material.

3.4.1.3 Pré-moldados de concreto

Na década de sessenta, inicia-se no Brasil o uso sistemático de cinzas volantes como pozolana em estruturas de concreto, com a sua introdução nas misturas utilizadas na construção da usina de Jupia, então, CELUSA, adotando-se, posteriormente, nas construções das grandes represas brasileiras (ZWONOK *et al.*, 1996).

Rocha *et al.* (1999) apud Chies(2003), estudaram diferentes lotes de cinza, oriundos do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, e observaram que as características pozolânicas de algumas amostras de cinza pesada não diferenciavam das amostras de cinza volante daquele mesmo complexo. Alguns cuidados devem ser tomados quando da utilização da cinza pesada, pois as características deste material são bastante variáveis, dependendo de fatores, como tipo de carvão, beneficiamento e moagem do carvão, tipo de caldeira, extração e manuseio das cinzas.

Quanto a concretos confeccionados com parte da areia substituída por cinza pesada, Kreutz *et al.*(2001) apud Rhode (2006) concluíram:

- o consumo de água, para o mesmo abatimento, é maior em relação ao concreto de referência, sendo que quanto maior o teor de substituição, maior a quantidade de água;
- a perda de abatimento no decorrer do tempo foi menor para concretos com maiores teores de substituição;
- as resistências à compressão dos concretos com incorporação de cinza pesada foram similares e até maiores em relação aos concretos de referência;
- o consumo de cimento por metro cúbico é menor para a mesma resistência à compressão;
- a absorção de água por capilaridade foi menor para os concretos contendo cinza pesada, do que para os concretos de referência.

Pelos resultados demonstrados na pesquisa, conclui-se que a cinza pesada possui grande potencial como matéria-prima para a produção de concretos. Isto é devido ao benéfico aumento na resistência à compressão dos concretos produzidos com este material.

3.4.1.4 Concreto celular

Empresas consolidadas de produção de concreto celular estão distribuídas pelo mundo todo. Uma das maiores, a Wehranh, apresentou recentemente um projeto de instalação de sua primeira unidade na América Latina, na cidade de Butiá, RS. Localizando-se junto à região carbonífera conhecida como Baixo Jacuí, buscando estar junto ao insumo básico para sua produção.

O concreto celular devido as suas características de menor densidade e facilidade de manuseio e corte, tem grandes benefícios sobre o seu concorrente tradicional. Sua formulação pode conter de 5 a 10% de cinzas leves ou pesadas.

3.4.1.5 Concreto asfáltico

As cinzas pesadas têm grande potencial para sua utilização nas empresas de produção de concreto asfáltico, sendo que diversas empresas vêm utilizando e ampliando as quantidades em seus produtos devidos as suas características pozolânicas. Utilizado entre os anos 60 e 70 em larga escala, testes aplicados à cinza de fundo mostram que a fração desta atende aos requisitos para sua aplicabilidade (CALARGE *et al.*, 2000; CHIES *et al.*, 2003). Fatores limitantes à utilização devem-se a questões qualitativas, como distribuição granulométrica, umidade total e concentração de materiais incombustos.

3.4.1.6 Aterros estruturais melhorados com aglomerado

A construção de aterros, como o realizado junto ao Arroio da Porteira, com 200 metros de extensão, barragens e ou bacias de sedimentação, como o realizado junto à usina Presidente Médici, em Candiota, com uso de cinzas pesadas como elemento de reforço, sendo 60% cinzas adicionadas a 40% de cimento, são exemplos de utilização do material para aterros estruturantes com uso de aglomerados.

3.4.1.7 Bases e sub-bases de pavimentos

Segundo Santos (2008), para que todas as etapas da rodovia estejam integradas com o meio ambiente é necessário que se faça o Licenciamento Ambiental junto aos órgãos competentes, sendo que todas as ações

modificadoras do meio ambiente associadas às obras rodoviárias devem ser licenciadas.

De acordo com Rohde *et al.* (2006), os aterros construídos nos acessos e nos encontros da ponte sobre o rio Jacuí, ligando os municípios de São Jerônimo e General Câmara, no Rio Grande do Sul, com 4 km e absorvendo 500.000 m³ de cinzas pesadas, constituem-se uma das maiores obras existentes nacionalmente realizadas com estes materiais.

A participação da CIENTEC com relação aos resíduos da combustão do carvão, nas últimas duas décadas, se concentrou basicamente na sua caracterização, sob os mais diversos aspectos, e no desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento como tijolos e telhas. Como resultado do conhecimento obtido por mais de uma década em pesquisas com o carvão, a CIENTEC detém tecnologias necessárias para obter o aproveitamento racional e econômico das cinzas em áreas como construção civil, artefatos de cimento, aterros e sub-base de pavimentos.

Os principais métodos de ensaio mencionados na especificação de serviço DNER-ES282/97, para construção de aterros para estradas são:

- DNER-ME 129/94(Compactação Utilizando Amostras não Trabalhadas): este método de ensaio foi regulamentado em 05/04/1994, com a finalidade de determinar uma correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo.
- DNER-ME 049/94 (Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas): este método de ensaio foi regulamentado em 05/04/1994, com a finalidade de determinar o suporte do material utilizando amostras não trabalhadas correspondente à umidade ótima e massa específica aparente seca.
- DNER-ME 082/94(Determinação do Limite de Plasticidade): este método de ensaio foi regulamentado em 25/04/1994, com a finalidade de apresentar o procedimento para a determinação do limite de plasticidade de solos e também descrever a aparelhagem, execução e condições para obtenção dos resultados.
- DNER-ME 041/94 (Preparação das Amostras para Caracterização): este método de ensaio foi regulamentado em 25/04/1994, com a finalidade de apresentar o procedimento para a análise granulométrica de solos por peneiramento.

Os aterros podem ser executados com diversos tipos de materiais, areia, argila e rocha que é considerada pelo DNER como material de 3ª categoria por sua remoção ser, em grande parte, através de explosivos e, entre outros, a cinza pesada.

A cinza pesada proveniente do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda foi avaliada conforme as normas técnicas do DNER para uso em aterros de rodovias. Os resultados dos ensaios regulamentados indicaram o uso desse tipo de cinza para tal finalidade, adequando-se às normas.

Com o ensaio de compactação, de acordo com a DNER-ME 129/94, a cinza pesada obteve 47% de umidade ótima e peso de 0,946 g/dm³. Esse resultado de umidade ótima representa um valor alto para aterros, porém não interfere na execução dos aterros, pois a cinza pesada é extraída da bacia de decantação com umidade semelhante ao resultado, necessitando de uma preparação desse material com a finalidade de controlar a umidade desejada.

De acordo com Rohde *et al.* (2006), não existe classificação geotécnica específica para as cinzas de carvão fóssil em geral, e a classificação visando uso em pavimentação deve ser realizada pelo método de classificação denominado Highway Research Board (HBR). Santos (2008), para a execução de aterros em rodovias, o material empregado precisa se enquadrar com os critérios mínimos tolerados na especificação de serviço do Departamento Nacional de Estradas de Rodagens (DNER-ES282/97), que estabelece a sistemática adotada para a execução dos segmentos da plataforma em aterros mediante o depósito de materiais sobre o terreno natural.

A cinza pesada foi caracterizada como um material da classe A2-4, uma classificação entre bom a excelente. A especificação do DNER-ES282/97, determina que o Índice de Suporte Califórnia (ISC) seja $\geq 2\%$, portanto, a cinza pesada atende a esse parâmetro, pois com a realização do ensaio obteve um valor de 15,4%.

Conclui-se que a cinza pesada avaliada torna-se indicada para construção de aterros de rodovias, atendendo as normas do DNER, além de apresentar uma economia estimada na análise preliminar de custos de 14%, para os aterros especificados. Minimizando os impactos ambientais, evitando a construção de novas bacias de decantação, com diminuição de risco de ocorrência de processos de percolação e lixiviação das cinzas pelas águas pluviais que poderiam poluir o lençol freático e, principalmente, redução na exploração de jazidas de argila e areia da região.

3.4.2 Remediação de solos contaminados

Segundo O'Kane (2002) apud Rhode (2006), materiais como os solos da própria região, resíduos já oxidados ou outro resíduos não geradores de DAM, tais como o material de capeamento dos depósitos ou a cinza, são os materiais com uso potencial para cobertura de depósitos reativos incluindo os próprios resíduos não reativos da mineração. Estes podem ser superficialmente agrupados nas seguintes categorias:

Solo de Cobertura: material frequentemente rico em materiais orgânicos e nutrientes, sendo, portanto, adequado para a camada superficial de um sistema de cobertura.

Material bem graduado: esse material é adequado para o uso em sistema de cobertura que tem por objetivo armazenar e liberar água. Pode, também, atuar como uma camada de proteção em sistemas de cobertura formados por barreiras hidráulicas ou barreiras capilares.

Material argiloso/siltoso: esse material pode ser utilizado para a construção de uma barreira hidráulica de baixa permeabilidade.

Material granular: esse material pode proteger a camada de cobertura contra a erosão, principalmente nos casos de superfície inclinadas.

Segundo Depoi *et al.* (2010), para o uso de 10,8 µg/g, 6,0 µg/g e 0,6 µg/g. O Hg, único elemento que não foi detectado em todas as amostras analisadas, foi também encontrado em concentrações mais altas nas amostras de Figueira (até 3,16 µg/g). Nos lixiviados das amostras provenientes de Figueira também foram encontradas concentrações mais altas de Pb, As, U, Mo, Cd e Hg. Além disso, constatou-se que diversos elementos (As, Cd, Zn, Pb, Se e Be) são lixiviados com água na faixa de 70 a 100%. A partir da análise multivariada, foi concluído que o carvão e as cinzas de carvão do PR são diferentes daqueles de SC e RS, quanto à concentração de elementos-traço e minoritários. Quanto aos elementos majoritários, o carvão e as cinzas provenientes de Charqueadas e São Jerônimo são similares, enquanto que os de Candiota, Figueira e Capivari de Baixo não têm similaridades com os demais. Em virtude das cinzas de carvão, principalmente, as de Figueira, conter altos teores de alguns elementos tóxicos (tais como As, Hg, Pb e Cd) e estes serem facilmente lixiviados pela água, deve-se ter um rigoroso critério para a sua deposição e/ou utilização. Soares *et al.* (2006) relataram que o uso isolado de cinza, a exemplo do que ocorreu com o carbonato, acelerava a taxa de oxidação do sulfetos, ao mesmo tempo em que neutralizava parcialmente a drenagem ácida de materiais estéreis de mineração. Corroborando, pelo resultado de suas análises, os efeitos do carbonato e cinza conjuntamente para abatimento de drenagem.

3.4.3 Obtenção de Zeólitas

Diversos estudos vêm demonstrando que as cinzas do carvão são constituídas, em sua maior quantidade, por óxidos de silício e de alumínio, possuindo ferro, metais alcalinos e alcalino-terrosos em quantidades menores. Alguns estudos mostram que tal composição permite sua conversão em zeólitas através de um tratamento hidrotérmico alcalino (QUEROL *et al.*, 1997; RYU *et al.*, 2006), e que cinzas volantes são um material heterogêneo complexo, constituído por ambas as fases, amorfa e cristalina, e cujo pH varia de 4,5 a 12, dependendo das características geoquímicas do carvão precursor (EL-MOGAZI *et al.*, 1998; PAGE *et al.*, 1990; MATTIGOD *et al.*, 1990).

Segundo Fungaro *et al.* (2004), a zeólita sintetizada a partir de cinzas de carvão foi empregada no tratamento da drenagem ácida de mina gerada na Usina de Figueira, apresentando eficiência de redução de íons metálicos na faixa de 70 a 90%. A qualidade final do efluente permitiria o descarte em corpos d'água, segundo a legislação vigente.

As zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão foram adicionadas a amostras de solo da Usina Termoelétrica de Figueira contaminadas com zinco proveniente das cinzas de carvão por deposição atmosférica. A lixiviação foi reduzida em mais de 80% usando um mínimo de 10% de aditivo. O material é uma alternativa no processo de remediação *in situ* de solos contaminados (FUNGARO, 2004).

No tratamento de efluente de galvanoplastia, a zeólita de cinza leve foi usada para descontaminar o efluente de um processo de zincagem de uma indústria de galvanoplastia. A quantidade do íon metálico e o pH no efluente, após o tratamento, estavam dentro dos limites permitidos pela legislação para descarte no meio ambiente (FUNGARO, 2004).

O tratamento foi igualmente eficaz com o uso de zeólita de cinza pesada da base da chaminé (FUNGARO, 2002).

Tratamento de efluente contaminado com corante, uma eficiência de retenção $\geq 88\%$ do azul de metileno em solução aquosa, foi obtida em processo de adsorção com zeólita de cinzas de carvão. A remoção não apresentou interferência do pH inicial e a solução aquosa após o tratamento exibiu coloração permitida em um efluente para descarte. O processo foi avaliado visando à utilização da zeólita de cinzas de carvão no tratamento de efluentes da indústria têxtil (FUNGARO, 2004).

A Companhia Carbonífera do Cambuí Ltda. será responsável pela implantação do processo de produção da zeólita na Usina de Figueira, no Paraná. A primeira etapa consiste nos estudos sobre a ampliação de escala do processo de zeolitização de cinzas de carvão, cuja proposta foi encaminhada para aprovação da Eletrobrás. Com a intenção de seguir uma tendência mundial de melhoria da ecoeficiência, ou seja, a obtenção de resultados econômicos em paralelo à obtenção de ganhos ambientais. O custo da implantação de produção de zeólita de cinzas de carvão foi estimado em R\$ 24.939,52/t de zeólita produzida. Considerando R\$ 28,00/kg o preço da comercialização da zeólita, um retorno do investimento de implantação (*break-even*) a partir da produção de 43 toneladas de zeólita.

A comercialização das zeólitas como adsorvente de baixo custo tem abrangência nas áreas industrial, doméstica, saúde e um mercado potencial de grande volume na área da agricultura como fertilizante de liberação lenta.

3.4.4 Materiais cerâmicos e vitrocerâmicos

A possibilidade de utilização de cinzas pesadas de carvão mineral na fabricação de materiais cerâmicos é uma alternativa atraente para minimizar problemas de meio ambiente. A aplicação de cinzas em cerâmicas para utilização

em lareiras e churrasqueiras com aproveitamento de suas propriedades isolantes térmicas é conhecida e pratica corrente produtiva de algumas empresas especializadas. Como a empresa Kachelofen, localizada no município de Bagé, interior do estado do Rio Grande do Sul, produtora de estufas de cerâmica vitrificada artesanais; com aditivação de cinzas pesadas secas e processadas obtém um produto de superior qualidade térmica.

As cinzas pesadas cujas características foram comparadas em diversos trabalhos de pesquisa com massas cerâmicas naturais ou de produção industrial, confirmam que os materiais apresentam composições químicas semelhantes, quer em termos de teores de sílica e alumina, quer em termos de óxidos fundentes.

Conforme Kniess *et al.* (2004) apud Rhode (2006), em relação às propriedades de absorção de água e densidade aparente, pode-se constatar que a adição deste resíduo em até 15% não oferece variações significativas. O efeito da incorporação deste resíduo nas propriedades mecânicas dos materiais estudados pode ser explicado em relação às fases cristalinas presentes. O material de composição CP15, ou seja, com 15% de cinzas pesadas, foi o que apresentou melhores resultados em relação a esta propriedade.

Por ser formada majoritariamente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), a cinza, naturalmente, apresenta características favoráveis para ser utilizada como matéria-prima na produção de vidros e vitrocerâmicos.

Conforme Kniess *et al.* (2004) apud Rhode (2006), os resultados obtidos a partir do sistema $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ usando carbonato de lítio como aditivo permitem demonstrar a possibilidade de reciclar a cinza pesada, transformando-as em materiais vítreos e vitrocerâmicos. O vitrocerâmico obtido, caracterizado por difração de raios-x (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentou a fase cristalina alumino-silicato, silicato de lítio e coeficiente de expansão térmico linear negativo e com composição de 85% de cinza pesada nos materiais.

A matéria-prima cinza pesada de carvão mineral constitui uma atraente fonte de SiO_2 cristalização de Al_2 e Al_2O_3 para a obtenção de materiais vítreos. O uso de aditivos adequados a cinza pesada baixa a viscosidade do fundido e direciona para a obtenção das fases vitrocerâmicas desejadas. Os tratamentos térmicos aplicados no vidro temperado para a obtenção do material vitrocerâmico foram adequados para a formação da fase cristalina alumino-silicato de lítio. A partir da investigação e desenvolvimento deste trabalho demonstrou-se a possibilidade de reciclar o resíduo de cinza pesada, transformando-o em materiais vítreos e vitrocerâmicos, que através de suas características e propriedades tecnológicas podem ser utilizados na indústria vidreira. Além disso, comprovou-se a possibilidade de agregar até 85% de cinza pesada na composição dos materiais.

3.5 Carvão mineral fornecido pela COPELMI Mineração

A composição do carvão da empresa COPELMI Mineração localizada na região do baixo Jacuí, enviado como matéria-prima para os clientes varia dependendo da exigência quanto aos parâmetros poder calorífico, teor de cinzas, distribuição granulométrica e teor de enxofre. Para atender a demanda destes, a Copelmi Mineração realizam processos de blendagem de seus produtos beneficiados, misturas controlada de produtos, oriundos das diferentes frentes de lavra e beneficiamento, compondo o produto final. As propriedades das cinzas estão muito relacionadas às características dos carvões que lhe dão origens, processos de beneficiamento, distribuições granulométricas utilizadas e blendagens.

Os carvões se diferenciam por características, poder calorífico, concentrações de enxofre, material volátil, umidade e diferentes distribuições granulométricas fornecidas, conforme dados fornecidos no Apêndice 01, de modo que os diferentes materiais obtidos das minas têm características próprias, pois cada jazida de carvão tem um histórico diferente de formação. Pode-se dizer que os carvões minerais da área que abrange a região considerada como Baixo Jacuí, entre Charqueadas e Minas do Leão, são carvões classificados como sub-betuminosos.

O produto fornecido à termoeletrônica de Charqueadas (UTCH), pertencente a grupo Tractebel, possui um poder calorífico de 3100kcal/t, oriundo de material bruto de mina (ROM) da área da Mina de Butiá, chamada de B3/B4, de menor concentração de material carbonoso, assim como relavagem de rejeitos de materiais mais nobres. A composição final do produto é montada em um processo de blendagem realizada na unidade de beneficiamento do Recreio, compondo-se também com os materiais beneficiados na unidade de Cachoeira do Sul, chamada de Cerro. A composição é sempre preparada para atender as especificações de qualidade do produto que são regidas por um contrato de fornecimento, baseados em poder calorífico estabelecem que as cinzas devam ficar em torno de 54%, ligado diretamente ao poder calorífico e *ranking* do material de origem, concentração de enxofre permitido, umidade total e distribuição granulométrica.

Conforme dados da empresa, busca-se beneficiar camadas médias que possuam os mais baixos teores de enxofre devido à forte restrição a este componente conforme limites estabelecidos de emissões pelo órgão ambiental, altamente restritivo. Este material possui também com uma umidade máxima de

16%, com distribuição granulométrica de material ≤ 50 mm e com teor de material considerado fino (≤ 3 mm) na faixa de 20%.

A empresa CMPC Celulose Riograndense (antiga Aracruz), possui uma especificação do seu produto, também por força de contrato, mantida dentro dos padrões mostrados no Apêndice 01. Carvão com poder calorífico de 5200kcal/t oriundo do material minerado nas áreas de lavra de Butiá e Arroio dos Ratos, a partir de materiais de maior concentração de material carbonoso, beneficiado diretamente na planta do Recreio, no município de Butiá, buscando sempre compor com camadas que geram menores teores de enxofre dentro do produto, atingindo um máximo de 1%, com distribuição granulométrica ≤ 50 mm, admitindo finos em até 13% (menor que 200#).

3.6 Características das caldeiras e queima nas empresas amostradas

As empresas Unidade Térmica Charqueadas TRACTEBEL Energia, Central de Matérias Primas do Polo Petroquímico RS BRASKEM, Unidade Guaíba CMPC Celulose Riograndense são equipadas com caldeiras compostas por câmaras de combustão a seco e tiragem artificial das cinzas, com queima de carvão pulverizado por leito de arraste. Apesar disso, possuem condições de queima distintas, detalhes de construção de equipamentos, armazenagem e processamento que necessitam ser estudados em cada unidade fabril para, a partir de suas características técnicas, determinar-se, para cada uma, informações relevantes para o estudo das propriedades das cinzas geradas, além de uma determinação precisa do método, local e equipamentos necessários para realização da amostragem representativa.

3.6.1 Unidade Térmica de Charqueadas da TRACTEBEL Energia- (UTCH)

A seguir, são apresentadas algumas características da unidade térmica charqueadas:

- Combustível: CE 3100 kcal/t, CV54% de cinzas, 1% de S, ≤ 50 mm c/finos.
- Segundo combustível: óleo diesel.
- Queima: 28.000 – 37.000 t/mês.
- Capacidade de combustão: 2.000 t/dia.
- Geração de energia: 75.000 kWh.

A unidade possui uma área de armazenamento (Figura 01) junto à termoeletrica com capacidade de 8.000 toneladas de carvão em área coberta, administrada pela empresa fornecedora do produto. Completa seu sistema de abastecimento um conjunto de oito silos de 225 toneladas de capacidade, com transporte de material sendo realizado por sistema de correias. Dois moinhos do tipo de martelos com capacidade de 12 t/h, pulverizam o material em torno de 70% passante em tela de peneira de 200 *mesh* (0,075 mm) que alimenta cada caldeira. Cada uma das quatro caldeiras possui capacidade de queima de 500 t/h de carvão mineral, e possibilidade de utilizar concomitantemente óleo diesel como segundo combustível.

Figura 1 - Pátio de estocagem de carvão mineral da TRACTEBEL



Fonte: Fotografia produzida pelo autor.

As cinzas leves são arrastadas pelos gases de combustão da caldeira, para seu ponto de extração, enquanto os materiais de maiores dimensões, cinzas pesadas, pela gravidade vão para o fundo da caldeira, um sistema de selo de água de onde são retiradas por um sistema de purgas, automaticamente.

O sistema de abatimento de cinzas leves é composto por um sistema de filtro de mangas, recentemente instalado na empresa em substituição ao precipitador eletrostático, com uma redução significativa de particulados. Após os gases passam por um sistema dessulfurizador, único instalado no país, composto por aspersores

de solução saturada de cal que abatem dos gases de combustão partículas ainda existente na corrente. Os sistemas ainda estavam em fase de implementação e testes a época das amostragens. Abatidas, as cinzas do filtro manga são transportadas por via pneumática até os silos de cinza leve, para serem carregadas via caminhão, para seus consumidores.

A cinza pesadas são retiradas através de um sistema de duas correias que recebe a descarga da purga de fundo das caldeiras, e descarregadas em quatro tanques de decantação de alvenaria para redução de umidade, e posteriormente carregadas diretamente em caminhões, e encaminhadas a sua destinação final.

3.6.2 Central de matérias-primas da BRASKEN do Polo Petroquímico do RS

A seguir, são apresentadas algumas características desta unidade:

- Combustível: CE 4700 kcal/t, CV35% de cinzas, 0,8% de S, ≤ 50 mm c/finos.
- Segundo combustível: óleo diesel.
- Queima: 20.000 – 35.000 t/mês.
- Capacidade de combustão: 2.000 t/dia.
- Caldeira de auxiliar na geração de vapor: 280 t/h vapor.

A central de matérias-primas do Polo Petroquímico do Sul, da empresa BRASKEM, consome em torno de 25.000 t/mês de um produto especificado como CE 4700, possuindo uma poder calorífico de 4700 kcal/t, correspondente a uma especificação de cinzas de 35% para o *ranking* dos carvões da região do Baixo Jacuí.

Possui, em sua estrutura de armazenamento, um pátio a céu aberto junto ao chamado porto de Dinorá, localizado à margem do rio Caí, com capacidade de estocagem de 15.000 toneladas de carvão mineral e estrutura coberta para duas pilhas vivas de 500 toneladas. Alimentadores a um sistema de correias com 2 km de extensão alimentam individualmente o sistema de armazenagem junto à planta industrial de oito silos de produto, quatro por caldeira, com capacidade individual de 500 toneladas.

Dos silos, o carvão é conduzido por correias transportadoras para os moinhos, tipo rolos cônicos, com capacidade de alimentação de 28 t/h, gerando material pulverizado para alimentação da caldeira a uma especificação de 75% do material passante na tela de saída de 200 *mesh* (0,075 mm).

As duas caldeiras possuem capacidade de 280 t/h vapor a 113kgf/cm² de pressão e 525°C na saída do super aquecedor. Projetadas para trabalhar com vários tipos de combustíveis, como carvão mineral CE4700, óleo do tipo 1 (4A) ou 2 (resíduo de processo), gás de baixa pressão e muito baixa pressão, foram adaptadas também para trabalhar com borra oleosa. Cada um com uma conformação, capacidade e número de queimadores específicos. No caso do combustível carvão mineral fornecido, são 16 queimadores por caldeira com capacidade cada de até 6.700 kg/h da alimentação por sistema pneumático. A Figura 2 mostra o pátio de armazenagem a BRASKEM.

Figura 2 - Pátio de armazenagem de carvão mineral da BRASKEM



Fonte: Fotografia produzida pelo autor.

As cinzas leves, compostas por partículas finas, são arrastadas pelos gases de combustão à pressão interna da caldeira de 115 bars, para seu ponto de extração, enquanto os materiais de maiores dimensões, cinzas de fundo e escória, são atraídos pela gravidade para o fundo da caldeira, onde existe um selo térmico de água de onde são retiradas por um sistema de purgas, automaticamente. A relação de proporcionalidade entre cinzas leves e pesadas, segundo dados fornecidos pela empresa, um histórico de 60 a 70% de cinzas leves, sendo o restante composto por cinzas pesadas.

O sistema de abatimento de cinzas leves é composto por um sistema de precipitador eletrostático onde as cinzas são abatidas em uma calha transportadora

do onde são succionar pelo silo de armazenagem mantido sob baixa pressão de vácuo, de onde são carregadas via caminhão tanque.

As cinzas pesadas são retiradas através de um sistema de válvulas de fundo que realizam purgas para dentro de um sistema de tubulações que carregam via hidráulica até dois tanques intermediários de alvenaria para sedimentação. Posterior quando o tanque esta saturado, programa-se através de um processo de diluição, são transportadas para a área as duas grandes bacias de sedimentação onde aguardam a retirada para sua disposição final.

3.6.3 Unidade Guaíba da CMPC Celulose Riograndense

A seguir, são apresentadas algumas características desta unidade:

- Combustível: CE 5200 kcal/t, CV30% de cinzas, 1% de S, ≤ 50 mm c/finos.
- Segundo combustível: óleo diesel.
- Queima: 19.000 a 24.000 t/mês.
- Capacidade de combustão: 1.100t/dia.

O sistema, originariamente desenvolvido para queima de material com poder calorífico de 4700 kcal/t, posteriormente adaptado, é composto por uma alimentação por caminhão em duas moegas, com transporte direto por correias ao sistema de estocagem em um silo de capacidade de 5.000 toneladas. O silo tem construção toro-piramidal invertida, em alvenaria fechado, com acesso de carregamento pelo topo e descarregamento através de duas fendas laterais inferiores, uma de cada lado do prédio. Dois alimentadores do tipo gaveta, instalados sobre um sistema de carro sobre trilhos programável, pode varrer toda a extensão inferior (base do silo) retirando o material de uma área específica programada ao longo de toda a pilha. Este sistema permite realizar amostragens e blendagens do material, em caso de oscilações de qualidade, principalmente de umidade. Como a construção de silo é fechada, não permitindo a liberação da umidade durante toda sua estocagem, podem existir problemas de manipulação do material.

O produto é alimentado à silagem intermediária pulmão dos moinhos por sistema de correias, que podem trabalhar concomitantemente ou não, sendo que cada uma das duas caldeiras pode ser atendida por um ou dois moinhos de pista e rolo. O material pulverizado é passante de 150mesh(0,1 mm), como limitador padrão de saída do carvão para a queima e uma retirada de material não moído

concentrado, normalmente composto material sulfuroso. O material moído com distribuição granulometria até 0,1mm é conduzido e injetado diretamente por sistema pressurizado no bico injetor da caldeira, por sistema pressurizado. Cada moinho possui a capacidade de 250 t/dia.

A temperatura de queima, que é uma função da temperatura da própria fornalha, da temperatura do ar de arraste pré-aquecido e da umidade do carvão oscila entre 850 a 900 °C na zona de queima, permitindo a combustão completa do material carbonoso no combustível, que apresenta valores de incombustos na cinza de fundo na faixa de 3 a 8%, devido às oscilações do processo.

As cinzas volantes, compostas por partículas muito leves, são arrastadas pelos gases de combustão à pressão interna da caldeira de 115 bars, para seu ponto de extração, enquanto os materiais de maiores dimensões, cinzas de fundo e escória, são atraídos pela gravidade para o fundo da caldeira, onde existe um selo térmico de água de onde são retiradas por um sistema de purgas, automaticamente. A relação de cinzas leves e cinzas pesadas apresentam segundo dados fornecidos pela empresa, um histórico de 60 a 70% de cinza leve, sendo o restante composto por cinza pesada.

O sistema de abatimento de cinzas leves é composto por um sistema de precipitador eletrostático. Abatidas, as cinzas caem em uma calha transportadora pneumática para serem carregadas para os silos de armazenagem, de onde saem, via caminhão, para seus consumidores.

As cinzas pesadas são retiradas através de um sistema de correia, atualmente descarregadas em uma pilha junto à saída da unidade para posterior transporte para a área de armazenagem. Antigamente, o sistema de transporte das cinzas pesadas era composto por um sistema de arraste hídrico que as depositava em uma bacia de sedimentação, através de uma série de canais distribuídos na planta, atualmente fora de operação.

4 EXPERIMENTAL

4.1 Materiais e reagentes

Os materiais amostrados para avaliação utilizados neste estudo foram às cinzas leves e pesadas geradas a partir da combustão de carvão mineral nas empresas TRACTEBEL, CMPC e BRASKEM, além de amostras do próprio carvão originalmente alimentadas as caldeiras para combustão. O carvão foi extraído pela empresa COPELMI Mineração Ltda., na denominada região do Baixo Jacuí, RS.

As amostragens foram realizadas pela equipe de pesquisa com o apoio de colaboradores das próprias empresas, com auxílio de pás, baldes, tambores, sacos plásticos e etiquetas para identificação correta do material para ser enviado para posterior partição das amostras e envio aos laboratórios.

Os equipamentos empregados na operação de preparação de amostras, realizada no laboratório da Mina do Recreio, são britadores de mandíbulas, moinhos de martelos, moinhos de bolas, quarteadores tipo rifle e estufas para secagem da amostra antes da moagem. Após a preparação, as amostras foram acondicionadas em potes plásticos e enviadas aos laboratórios participantes do estudo.

As amostras brutas foram catalogadas e arquivadas junto à litoteca da empresa COPELMI Mineração para outras avaliações.

4.2 Amostragem e preparação de amostra

A amostragem em cada empresa foi realizada em quatro etapas com a finalidade de uma melhor representatividade das diversas situações de processo e qualidades dos resíduos focos das análises, conforme pode ser verificado no cronograma na Tabela 3.

Tabela 3 - Cronograma de visitas e amostragens

CONTATOS	TRACTEBEL	CMPC	BRASKEM
Contatos Empresa Geradoras	mar/10	mar/10	abr/10
1ª Coleta de Amostras	mai/10	mai/10	mai/10
2ª Coleta de Amostras	set/10	set/10	set/10
Avaliações 1ª e 2ª Amostragens		out/10	
3ª Coleta de Amostras	jan/11	fev/11	jan/11
4ª Coleta de Amostras	jul/11	jun/11	jun/11
Avaliações gerais		ago/11	

Fonte: Produzido pelo autor.

Neste contexto, seis diferentes materiais foram coletados, totalizando 24 amostras. A Figura 3 mostra a etapa de amostragem de cinza pesada.

Figura 3 - Amostragem de cinza pesada



Fonte: Fotografia produzida pelo autor.

Uma perfeita avaliação e caracterização de cinzas somente poderão ser conduzidas considerando-se questões como: origem e qualidade do carvão mineral adquirido, tipo de processo de queima, se existe participação de outro combustível ou não, quais os sistemas de abatimento de sólidos e enxofre utilizados, assim como as formas de armazenagem, tratamento logístico e disposição do resíduo. Todos os fatores devem ser considerados individualmente, pois as diversas utilizações pressupõem diferenciações em suas propriedades finais, adaptando se melhor às características exigidas pelos produtos. Portanto, tratar o resíduo como um produto único constitui-se um erro, pois a diversidade de fatores que compõe suas

propriedades finais é complexa, exigindo uma análise mais criteriosa caso a caso, analisando e consolidando informações e características concretas e mais próximas da realidade do processo possível.

A amostragem consistiu do carvão que estava sendo pulverizado para a queima e das cinzas leves e pesadas oriundas do processo da queima.

Os pontos escolhidos para amostragem foram determinados pela equipe do projeto e com aceite das empresas, após as visitas de reconhecimento realizadas as empresas para verificação das peculiaridades de cada processo, sempre buscando a menor contaminação por interferentes externos possíveis ao material, obtendo assim o resíduo mais puro do processo de combustão.

A de se destacar que a tomada de decisão do melhor ponto para coleta levou além da busca pelo material mais *in natura* do processo, também de questões de segurança, alguns locais representavam áreas de perigo devido a características do processo de combustão, altas temperaturas das amostras imediatamente após sua purga, detalhes de construção que tornavam pontos inacessíveis.

Na empresa TRACTEBEL, unidade térmica de Charqueadas os pontos foram determinados como sendo:

- cedida pela COPELMI, amostra composta do amostrador automático da área abastecimento, da campanha de transferência ao silo de carvão da caldeira na noite anterior;
- cinza leve coletada de escotilha de visita do silo de cinza leve por funcionário de empresa encarregada da área;
- a cinza pesada foi amostrada diretamente da correia de extração de cinzas pesadas da caldeira em funcionamento.

Na empresa BRASKEM os pontos de coletas foram determinados sendo:

- cedida pela COPELMI, amostra composta do amostrador automático da área armazenagem, da ultima campanha de abastecimento ao silo de carvão da caldeira em funcionamento;
- cinza leve coletada na calha transportadora de cinza leve antes da entrada no silo de armazenamento da caldeira em funcionamento;
- a cinza pesada foi amostrada diretamente da escotilha junto à válvula de purga de fundo da caldeira em funcionamento.

Na empresa CMPC Celulose os pontos de coletas foram determinados como sendo:

- para o carvão a correia de abastecimento abaixo do silo de carvão que estava sendo enviado ao moinho, antes da coleta das cinzas leves e pesadas;
- a cinza leve retirada da alimentação dos caminhões que estavam sendo carregado diretamente no silo de cinzas leves;
- a cinza pesada foi amostrada diretamente da pilha de descarga da correia de retirada da purgas de fundo da caldeira.

O carvão mineral enviado para cada empresa foi avaliado em suas propriedades e características básicas; o mesmo foi realizado com as cinzas geradas. Em cada coleta de cinzas uma amostra de carvão que estava sendo utilizado no momento da queima foi coletada para análise.

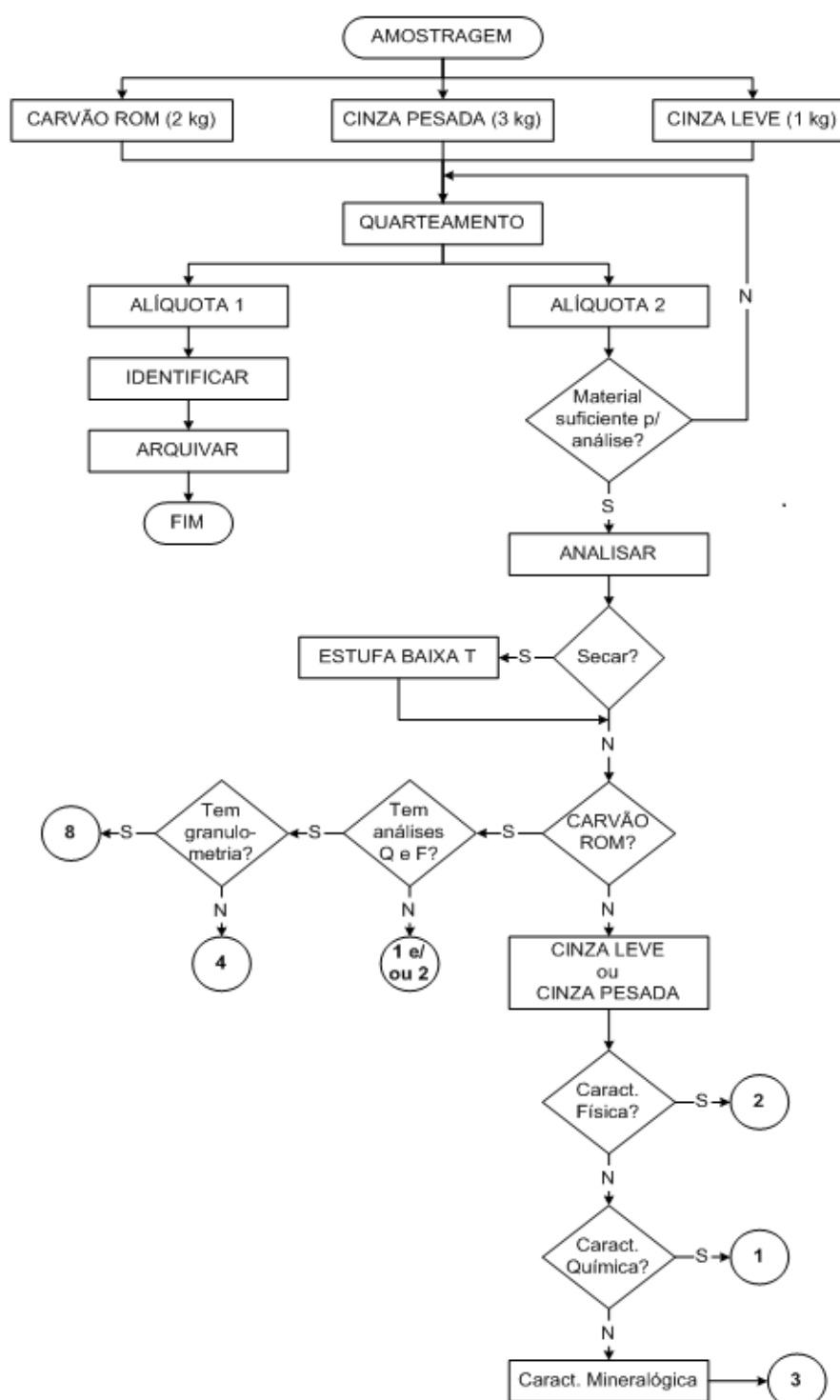
As amostras coletadas nas usinas foram inicialmente encaminhadas ao laboratório da empresa COPELMI Mineração Ltda., onde passaram por um processo de identificação e preparação para serem enviadas aos laboratórios para as diversas análises.

O protocolo, baseado na NBR 8292/83, consiste em uma série de etapas de redução de massa e distribuição granulométrica da amostra, desde a sua obtenção pela amostragem até a fração de massa que seria analisada, de modo a garantir um erro máximo de $\pm 1,5\%$, em 95% dos casos.

Como nomenclatura para as amostra foi determinada uma sequência de três abreviaturas separadas por hífen, com o significado como segue: abreviação do nome da empresa coletada, sendo BRAS utilizado para amostras da BRASKEM, CMPC para a empresa CMPC (antiga Aracruz Celulose) e TRAC para a empresa Tractebel; FLY e PES para cinzas leves e pesadas, respectivamente; abreviação de amostras AM seguida da numeração de 1 a 4, para determinação das amostras relativa à sua sequência de amostragem. Como exemplo, BRAS-FLY-AM2 significa: amostra 2 de cinza leve da empresa BRASKEM.

As Figuras 4 e 5 mostram o fluxograma da preparação e as operações iniciais com as amostras e o fluxograma da caracterização física, respectivamente.

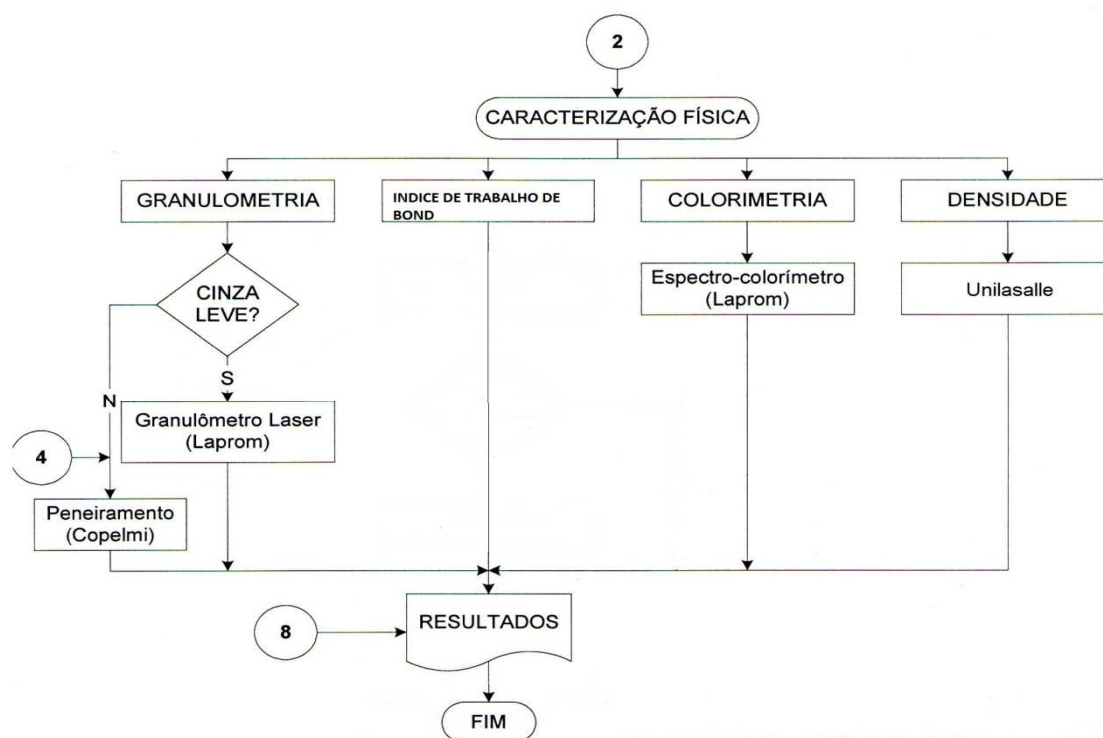
Figura 4 - Fluxograma da amostragem e operações iniciais de preparação



Fonte: Produzido pelo autor.

4.3 Caracterização física

Figura 5 - Fluxograma das atividades de caracterização física



Fonte: Produzido pelo autor.

4.3.1 Análise granulométrica

Os ensaios de caracterização granulométrica das análises primárias foram realizados no laboratório da empresa COPELMI Mineração Ltda., através de equipamentos para determinação da distribuição granulométrica por peneira vibratória com telas da série Tyler conforme a NBR 8629/84 – Determinação da Distribuição Granulométrica, utilizada pela empresa em seus processos normativos.

Para as cinzas leves, os ensaios também foram conduzidos em um granulômetro à difração laser, da marca Cilas, disponível no Laboratório de Processamento Mineral (Laprom), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(UFRGS), que determina a distribuição granulométrica de amostras com partículas inferiores a 500 micra, em 50 frações distintas, dotado de uma maior acuracidade, além da geração da respectiva curva de distribuição granulométrica.

Os ensaios específicos de caracterização de distribuição granulométrica das cinzas pesadas foram realizados conforme procedimentos indicados na NBR 7181/84.

4.3.2 Colorimetria

Neste estudo, introduziu-se o parâmetro de colorimetria para se investigar eventual correlação entre presença (ou teor) de material incombusto na cinza e sua cor; ou presença de substâncias químicas como sílica, ferro, etc. na cinza e sua cor. Outra questão, considerando os objetivos da pesquisa, com a definição dos parâmetros colorimétricos pode-se identificar algum potencial das cinzas como matéria-prima para misturas com outras substâncias, nas quais a cor seja fator decisivo.

A cor da matéria-prima é um parâmetro físico importante para muitas aplicações industriais. Neste estudo avaliaram-se os parâmetros colorimétricos das cinzas, através da confecção de pastilhas prensadas, levadas a um espectrocolorímetro, equipamento que mede os parâmetros alvura, *yellowess*, L^* , a^* e b^* . Para a pulverização das amostras, foram adotados os procedimentos na norma TAPPI T 534 pm-92. As análises foram realizadas no Laprom, em um equipamento da marca Minolta.

4.3.3 Massa específica

Os ensaios de massa específica foram realizados no Unilasalle, utilizando a metodologia retirada da NT – Departamento de Estradas de Rodagem(DNER), Norma Rodoviária, método de ensaio DNER-ME093/94.

4.3.4 Índice de Trabalho de Bond

Também conhecido como teste de moabilidade, o Índice de Trabalho de Bond (*work index - Wi*) é uma metodologia utilizada para o dimensionamento de moinhos,

que experimentalmente é utilizado para prever o consumo de energia na cominuição, obtendo estimativas muito reais, os valores variam entre 5 e 25 kWh/t. De acordo com Bond, a energia consumida na cominuição de uma alimentação com A80 (abertura de peneira na qual passam 80% da alimentação, em μm) e cominuída até P80 (abertura de peneira na qual passam 80% do produto, em μm) é igual à diferença entre a energia necessária para reduzir um material de tamanho teoricamente infinito até A80 e a energia necessária para reduzir o mesmo material de tamanho infinito até P80. Bond expressou essa relação como:

$$W = 10 Wi \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{A80}} \right)$$

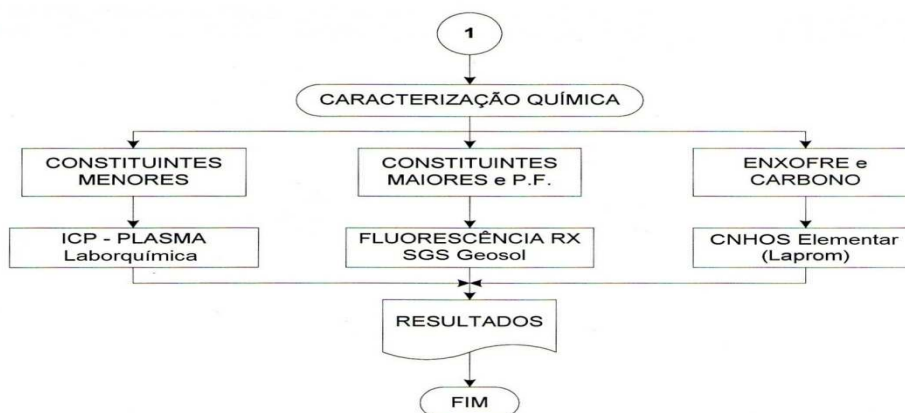
Sendo W a quantidade específica de trabalho consumida em kWh/t e Wi o índice de trabalho, constante específica do material que expressa a resistência do material à britagem e à moagem.

O teste de moabilidade em cinza pesada, para o cálculo do Índice de Trabalho de Bond (Wi), foi realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ, segundo a Norma Técnica NBR 11376 ABNT.

4.4 Caracterização química

A seguir a Figura 6 revela o fluxograma da caracterização química.

Figura 6 - Fluxograma das atividades de caracterização química



Fonte: Produzido pelo autor.

4.4.1 Análise elementar

As análises preliminares foram realizadas nos laboratórios da COPELMI Mineração, aproveitando a estrutura disponível da empresa para caracterizar as concentrações de material inorgânico das cinzas, do enxofre, materiais voláteis e umidade total. Todos os ensaios realizados seguiram as seguintes normas técnicas brasileiras:

- NBR 8289/83 – Determinação teor de material inorgânico (cinzas) e incombusto;
- NBR 8295/83 – Determinação do teor de enxofre;
- NBR 8290/83 – Determinação do teor de matérias voláteis;
- NBR 8293/83 – Determinação da umidade total.

Os equipamentos empregados para a realização dos ensaios foram: balança analítica, fornos tipo mufla, estufa para determinação de umidade, fornos tubulares para determinação do teor de enxofre, conforme listados os modelos do laboratório da Copelmi Mineração: Estufa: Fabricante FABBE – Modelo PATT 5194; Forno Mufla: Fabricante Lavoisier – Modelo 402D; Forno Tubular: Fabricante Lavoisier – Modelo Cilíndrico; Balança Analítica: Fabricante Mettler-Toledo – Modelo AB204.

4.4.2 Determinação de óxidos maiores, menores e elementos traços

Para moer as amostras foram utilizados almofariz e pistilo até atingir tamanho de partícula inferior a 200 *mesh*, pois este é o valor limite do equipamento. As amostras foram introduzidas com auxílio de uma espátula em cápsula de estanho e pesadas em balança analítica Marte - SHIMADZU AY220, na quantidade de 100mg aproximadamente por amostra e 100mg de óxido de tungstênio.

As análises de CHNS foram realizadas em um equipamento Elemental Analyzer Vario EL Cube CHNS, do Laboratório de Processamento Mineral (Laprom), da UFRGS, em uma parceria científica mantida entre esta IES e o Unilasalle.

A metodologia utilizada foi um analisador elementar, que opera na base da combustão dinâmica da amostra. A amostra é pesada em cápsula de estanho e introduzida no reator de combustão através de amostrador automático, conjuntamente com uma quantidade determinada de oxigênio. Após a combustão, os gases produzidos, N₂, CO₂, H₂O e SO₂, são transportados por corrente de Hélio através da superfície de cobre do interior do reator, separados por coluna de GC e finalmente detectados por condutividade térmica (TCD).

4.4.3 Caracterização de resíduos, ensaios de lixiviação e solubilização

A caracterização de resíduos conforme NBR 10004 hoje é uma ferramenta muito utilizada e aceita pelas empresas e órgãos ambientais como indicador determinante para projetar a utilização ou disposição final de resíduos.

A sistemática de classificação de resíduos sólidos está descrita na NBR 10.004 - Resíduos Sólidos – Classificação, que em sua segunda edição data de 31/05/2004. Conforme a legislação brasileira, um resíduo pode ser classificado como:

- Classe I – perigoso;
- Classe II – não inerte ou inerte.

Antes disso, em dezembro de 1995, a FEPAM emitiu orientações a respeito da sistemática de elaboração do laudo de classificação e fixou, principalmente, um fluxograma a ser seguido. Mais recentemente, foram estabelecidas as “Diretrizes para a Elaboração de Laudo Técnico de Classificação de Resíduos Sólidos Industriais”.

O processo de classificação do resíduo realiza uma completa avaliação da periculosidade do resíduo sólido, através de avaliações normalizadas de toxicidade, patogenicidade, reatividade, inflamabilidade e corrosividade, conforme estabelece a

NBR 10004. Os ensaios de lixiviação e ensaios de solubilização cinéticos ou estáticos são muito utilizados e considerados a melhor forma de predizer a capacidade de um material a formar drenagem ácida.

4.4.4 Potencial hidrogeniônico (pH)

Neste estudo a metodologia de referência para avaliar o comportamento das amostras em meio aquoso do livro de análises de solo, plantas e outros materiais, Boletim técnico nº 5, (2ª edição revisada e ampliada), do Departamento de Solos, da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

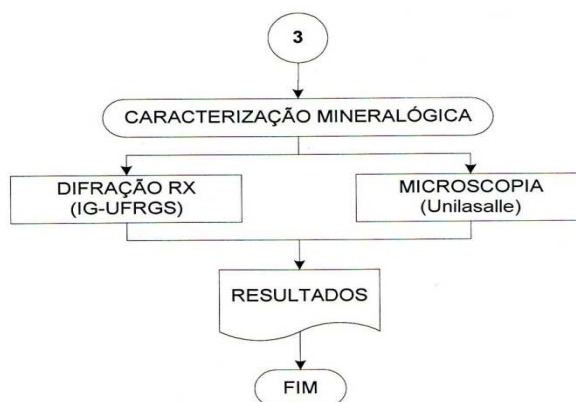
Os equipamentos utilizados foram um pHmetro Digimed DM-22, um eletrodo de vidro Digimed DM-22 modelo DME-MV1, soluções tampões 04, 07 e 10 Merck e uma balança analítica, do Laboratório de Química do Unilasalle.

Neste procedimento foi pesado em um béquer de 50 mL, 10 g de cinza leves e pesadas, em seguida, foram adicionados 10 mL de água destilada; na sequência, agitadas com um bastão de vidro e deixado de repouso por 30 minutos. Após houve nova agitação e medição do pH.

4.5 Caracterização mineralógica

A Figura 7 a seguir mostra o fluxograma da caracterização mineralógica.

Figura 7 - Fluxograma da caracterização mineralógica



Fonte: Produzido pelo autor.

4.5.1 Difratometria

As fases cristalinas presentes nas amostras foram caracterizadas por difração de raios x (XRD), com difratômetro de raios x, no Instituto de Geociências, da UFRGS, realizando análise qualitativa e quantitativa de fases predominantes.

4.5.2 Morfologia

A caracterização mineralógica permite a avaliação dos tipos de minerais e ou particulados, com a identificação das fases existentes que compõem a amostra, entre outras particularidades. O estudo foi realizado no Laboratório de Solos do Unilasalle, por observação e contagem em lupa binocular e com registro em fotomicrografias, com Lupa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização física

5.1.1 Análise Granulométrica

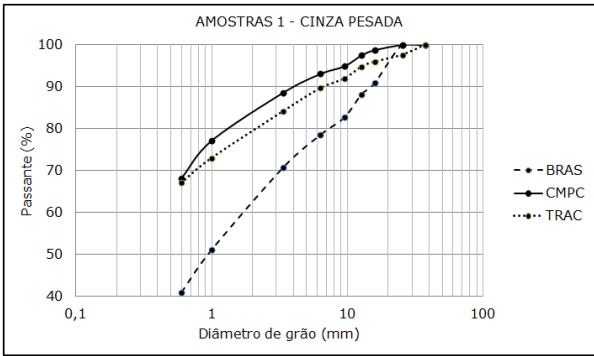
Conforme Ahmaruzzaman apud Andrade (1991), as cinzas leves consistem de partículas finas e poeira com predominância de formas esféricas sólidas ou ocas, principalmente, vítreas (material amorfo) *in natura* (denominadas cenosferas). A distribuição granulométrica das cinzas leves de carvão betuminoso é geralmente similar a de um siltito ($< 0,075$ mm), enquanto que as cinzas leves de carvão sub-betuminoso são das mesmas dimensões, mas ligeiramente mais grossas.

As Figuras 8 a 15 mostram as curvas granulométricas obtidas por peneiramento das cinzas pesadas e análise em granulômetro à difração laser das cinzas leves para as quatro amostras.

A avaliação das curvas de distribuição granulométrica apresenta uma diferenciação entre as frações de cinzas leves e pesadas. Em termos gerais pode-se dizer que as cinzas leves apresentaram nas suas amostras uma maior concentração de material com dimensões ≤ 150 μm , diferente das cinzas pesadas que apresentaram mais de 60% da sua massa de partículas com granulometria $\geq 0,6$ mm. Exceção pode ser visualizada nas amostras da coleta1 de cinzas pesadas da empresa Braskem (Figura 18), que apresenta menor percentual de material retido nas telas $\leq 0,6$ mm, em torno de 40%, possivelmente devido à alguma alteração no processo de britagem no processo de preparação do material para queima.

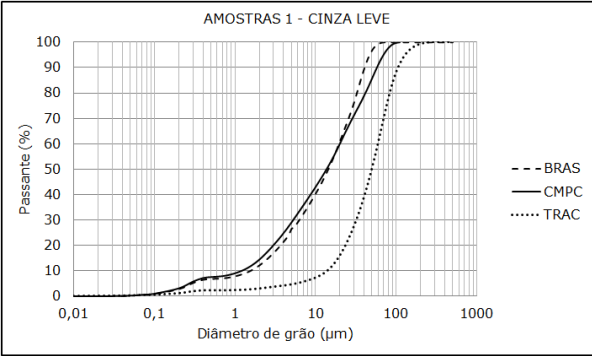
Conforme se verifica nas Tabelas 4, 5 e 6 da distribuição granulométrica das cinzas, cuja separação granulométrica foi realizada no laboratório da empresa COPELMI Mineração, o peneiramento da amostra da quarta série de cinzas pesadas, realizado a úmido, proporcionou a desagregação do material, permitindo a passagem em torno de 90% da fração granulométrica na tela 0,6 mm.

Figura 8 - Curvas gran. AM1-PES



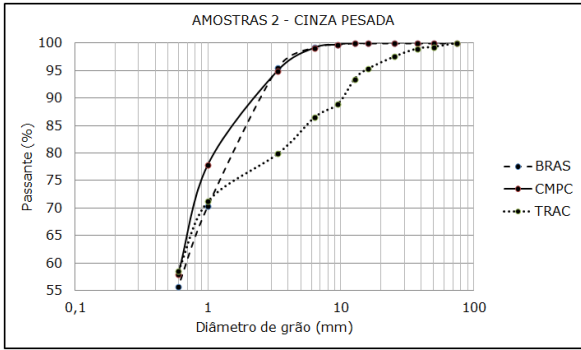
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 9 - Curvas gran. AM1-FLY



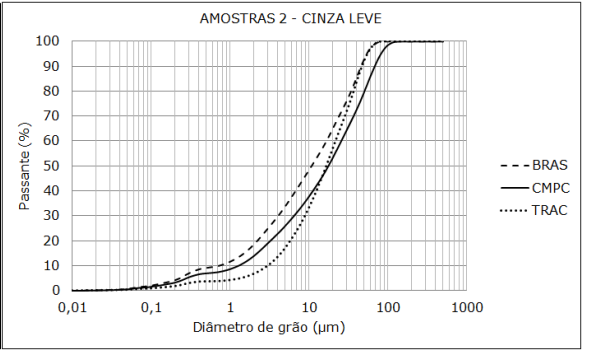
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 10 - Curvas gran. AM2-PES



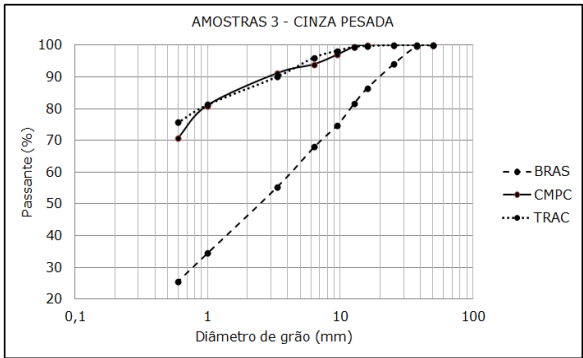
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 11 - Curvas gran. AM2-FLY



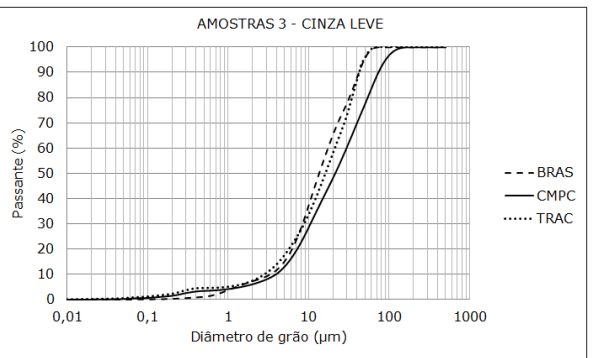
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 12 - Curvas gran. AM3-PES



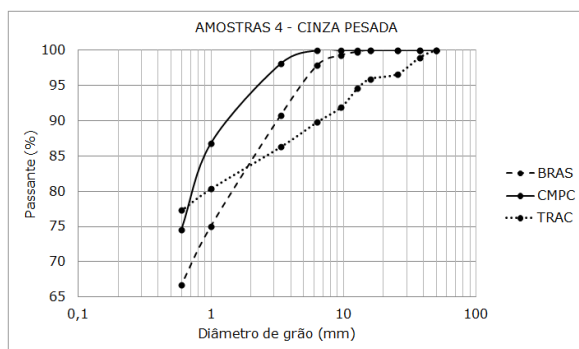
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 13 - Curvas gran. AM3-FLY



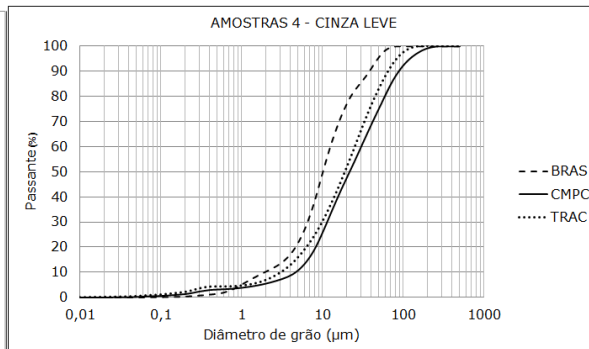
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 14 - Curvas gran. AM4-PES



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 15 - Curvas gran. AM4-FLY



Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4 - Distribuição granulométrica de produto, cinzas leves e pesadas CMPC

AM	CMPC-AM1			CMPC-AM2			CMPC-AM3			CMPC-AM4		
Retido Massa	(%)			(%)			(%)			(%)		
TELA (mm)	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY
50,0	1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37,5	4,9	-	-	-	-	-	1,79	-	-	-	-	-
25,4	8,2	-	-	10,5	-	-	16,4	-	-	16,4	-	-
15,9	15,3	1,2	-	15,6	-	-	26,4	-	-	39,9	-	-
12,7	9,4	1,2	-	7,6	-	-	9,4	0,61	-	7,9	-	-
9,5	18,9	2,6	-	12,2	0,33	-	10,6	2,43	-	17,7	-	-
6,4	15,0	1,8	-	11,8	0,57	-	8,9	3,04	-	8,3	-	-
3,4	13,4	4,6	-	16,1	4,17	-	10,7	2,84	-	5,3	1,9	-
1,0	11,4	11,5	-	15,3	17,0	-	10,5	10,1	-	-	-	-
0,6	0,25	8,9	-	3,2	19,8	-	1,91	10,3	-	-	-	-
<0,60	1,2	68,1	-	7,90	58,0	-	3,41	70,6	-	-	-	-
2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,01	4,5	-
1,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,39	1,3	-
1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,71	5,5	-
0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,43	8,7	-
0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	3,5	-
0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,12	6,8	-
0,3	-	-	5,4	-	-	1,5	-	-	-	0,24	29,9	-
0,2	-	-	5,9	-	-	4,0	-	-	5,6	0,12	22,5	5,6
<0,15	-	-	88,8	-	-	94,5	-	-	94,4	0,4	15,4	94,4

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 5 - Distribuição granulométrica de produto, cinzas leves e pesadas

TRACTEBEL

AM	TRAC-AM1			TRAC-AM2			TRAC-AM3			TRAC-AM4		
Retido Massa	(%)			(%)			(%)			(%)		
TELA (mm)	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY
50,0	-	0,0	-	-	0,7	-	-	-	-	-	-	-
37,5	-	0,0	-	-	0,3	-	-	-	-	-	1,0	-
25,4	-	2,4	-	-	1,5	-	-	-	-	-	2,4	-
15,9	-	1,6	-	-	2,2	-	0,2	0,3	-	-	0,7	-
12,7	2,9	1,2	-	2,1	1,8	-	2,1	0,3	-	2,9	1,4	-
9,5	16,2	2,8	-	23,9	4,6	-	15,4	1,3	-	12,4	2,7	-
6,4	17,2	2,2	-	16,2	2,4	-	15,1	2,1	-	17,6	2,0	-
3,4	20,0	5,5	-	26,3	6,6	-	17,4	6,0	-	20,0	3,6	-
1,0	29,8	11,1	-	24,8	8,6	-	31,7	8,8	-	-	-	-
0,6	7,2	5,8	-	3,6	12,6	-	7,8	5,6	-	-	-	-
<0,60	6,7	67,2	-	3,2	58,6	-	10,3	75,7	-	-	-	-
2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,6	2,9	-
1,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,1	1,0	-
1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,5	2,0	-
0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,9	3,0	-
0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	0,0	-
0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,8	3,4	-
0,3	-	-	10,6	-	-	-	-	-	0,5	2,4	11,0	-
0,2	-	-	14,6	-	-	1,5	-	-	4,1	0,7	17,9	2,0
<0,15	-	-	74,7	-	-	98,5	-	-	95,4	1,1	45,0	98,0

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 6 - Distribuição granulométrica de produto, cinzas leves e pesadas

BRASKEM

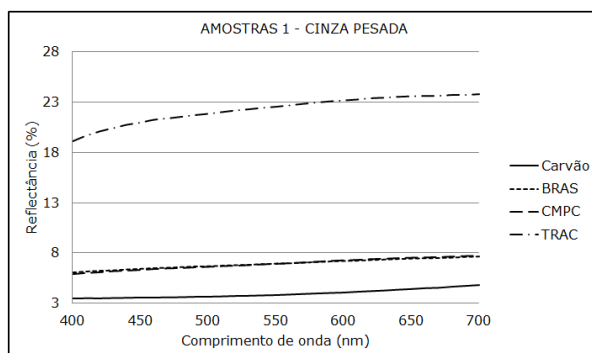
AM Retido	BRAS-AM1 (%)			BRAS-AM2 (%)			BRAS-AM3 (%)			BRAS-AM4 (%)		
TELA (mm)	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY	PROD	PES	FLY
50,0	2,9	-	-	-	-	-	7,4	0,0	-	-	-	-
37,5	4,5	-	-	1,5	-	-	22,0	0,4	-	7,4	-	-
25,4	11,7	-	-	6,1	-	-	14,1	5,4	-	16,0	-	-
15,9	16,2	9,1	-	8,6	-	-	9,6	7,8	-	21,6	-	-
12,7	9,4	2,7	-	4,4	-	-	3,7	4,8	-	8,8	0,3	-
9,5	11,0	5,5	-	9,0	0,3	-	5,5	6,8	-	8,8	0,5	-
6,4	9,9	4,1	-	10,3	0,5	-	4,9	6,9	-	7,7	1,4	-
3,4	16,9	7,9	-	21,7	3,8	-	10,0	12,6	-	11,3	7,1	-
1,0	13,0	19,6	-	26,8	25,2	-	11,3	20,9	-	-	-	-
0,6	1,9	10,1	-	5,0	14,6	-	2,8	8,9	-	-	-	-
<0,60	2,6	41,0	-	6,5	55,7	-	8,8	25,6	-	-	-	-
2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,6	8,8	-
1,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	2,3	-
1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2	4,6	-
0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,7	5,6	-
0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7	2,7	-
0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9	2,9	-
0,3	-	-	0,4	-	-	0,5	-	-	-	1,4	12,6	-
0,2	-	-	2,5	-	-	2,0	-	-	-	0,6	15,2	-
<0,15	-	-	97,1	-	-	97,5	-	-	100,0	0,9	36,1	100,0

Fonte: Produzido pelo autor.

5.1.2. Colorimetria

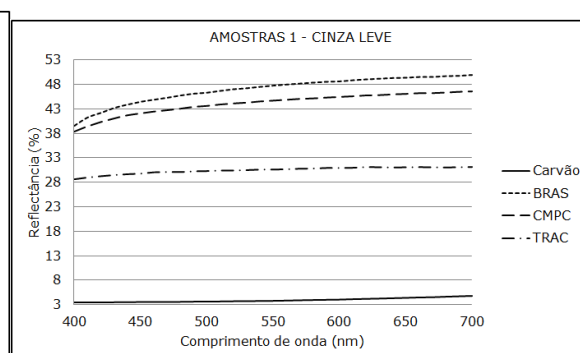
As Figuras 16 a 23 mostram as curvas de refletância das amostras de carvão, das cinzas leves e pesadas das quatro amostras.

Figura 16 - Refletâncias AM1-PES



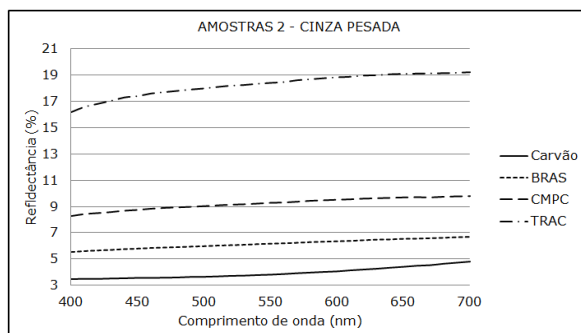
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 17 - Refletâncias AM1-FLY



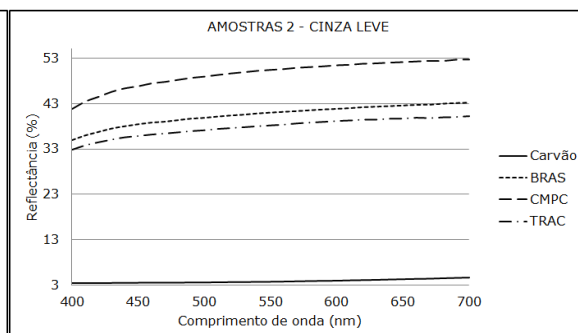
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 18 - Reflectâncias AM2-PES



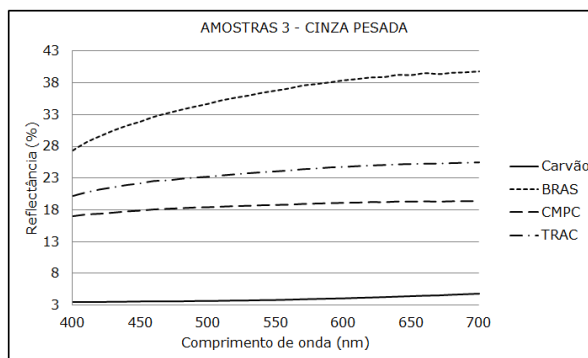
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 19 - Reflectâncias AM2-FLY



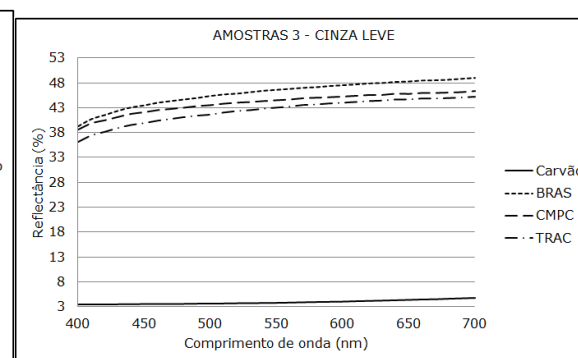
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 20 - Reflectâncias AM3-PES



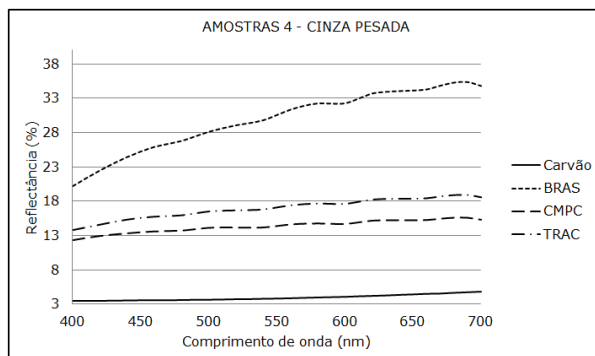
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 21 - Reflectâncias AM3-FLY



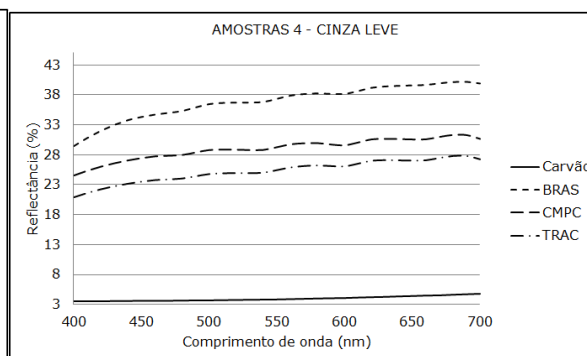
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 22 - Reflectâncias AM4-PES



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 23 - Reflectâncias AM4-FLY



Fonte: Produzido pelo autor.

Nas curvas das cinzas leves se verifica um padrão de comportamento muito similar entre as amostras, entre faixas de 28 a 50% refletância, apresentando alguma variação nas amostras 4ena curva da amostra 1 da empresa TRAC. As cinzas pesadas já apresentam comportamento diverso. A Tabela 7 mostra os parâmetros colorimétricos das quatro amostragens.

Tabela 7 - Parâmetros colorimétricos das cinzas leves e pesadas

AM	Parâmetro	BRASKEM		CMPC		TRACTEBEL	
		PES	FLY	PES	FLY	PES	FLY
1	L*	31,775	74,575	31,722	72,625	54,637	62,153
	a*	0,587	0,118	0,787	0,104	0,38	0,11
	b*	2,108	3,631	2,507	3,013	2,89	1,227
	Alvura ISO	6,49	44,65	6,38	42,24	21,16	29,84
2	L*	29,823	70,643	36,483	76,224	49,98	68,083
	a*	0,466	0,235	0,352	0,093	0,273	0,416
	b*	1,61	2,982	1,695	3,784	2,073	3,037
	Alvura ISO	5,82	39,44	8,79	47,06	17,50	35,92
3	L*	66,967	73,884	50,407	72,556	56,103	71,493
	a*	0,487	0,18	0,164	0,132	0,391	0,265
	b*	6,34	3,451	1,777	2,837	3,205	3,56
	Alvura ISO	32,25	43,76	17,99	42,31	22,37	40,19
4	L*	62,041	67,562	44,873	60,98	48,513	57,563
	a*	1,348	0,363	0,516	0,306	0,732	0,678
	b*	8,301	4,287	2,489	3,034	3,867	3,515
	Alvura ISO	25,72	34,59	13,56	27,59	15,68	23,71

Fonte: Produzido pelo autor.

Os parâmetros colorimétricos L* e alvura de todas as amostras são mais elevados na amostra CMPC. Observando-se o conteúdo de C das amostras CMPC e BRAS, verificam-se valores respectivos de 7,01 e 17,82%. Ou seja, na amostra BRAS efetivamente há mais carvão incombusto, fato igualmente comprovado com as curvas de refletância e os parâmetros colorimétricos das amostras.

Nas cinzas leves, o critério do teor de C atende parcialmente: serve para as amostras TRAC e BRAS, nas amostragens, mas não para a amostra CMPC. Isso pode ser indicativo de que outras substâncias, além do C, possam estar interferindo na curva de refletância.

A título de comparação, os valores médios para os parâmetros colorimétricos do carvão beneficiado e alimentado para a queima nas três empresas são: L* = 23,167 a* = 1,258 b* = 1,791 Alvura ISO = 3,56%.

Nas medidas de cores dos materiais, através de um colorímetro, utilizam-se os padrões CIELAB. Neste processo, mede-se a intensidade de absorção da luz incidente, na região que compreende os comprimentos de onda do visível, e se obtêm os parâmetros L* (luminosidade, que varia do negro (0) ao branco (100)), a*

(intensidade da cor vermelho (+) ou verde (-)) e b^* (intensidade da cor amarelo (+) ou azul (-)).

A curva de refletância do carvão mostra refletâncias baixas na faixa de comprimentos de onda considerada. É uma forma de curva normal para matérias-primas de cores escuras. Na Figura 18 (cinzas pesadas, amostras 2), a curva de refletância da amostra CMPC está em nível acima da amostra BRAS.

Devido à heterogeneidade de valores da Tabela 7, especialmente em relação ao parâmetro alvura nas amostras de uma mesma usina termelétrica, não foi possível correlacionar este parâmetro com o teor de material incombusto, como se desejava. Associado a este fato, considera-se, também, que a quantidade de amostras tenha sido insuficiente para uma possível correlação. Ainda assim, esta é uma alternativa não descartada pelo autor, e que será investigada mais amiúde em projetos subsequentes.

5.1.3 Massa específica aparente

A Tabela 8 mostra as massas específicas aparentes reais nas diversas amostras.

Tabela 8 Massa específica aparente (g/cm^3) cinzas leves e pesadas

AM	BRASKEM		CMPC		TRACTEBEL	
	PES	FLY	PES	FLY	PES	FLY
1	2,36	2,18	2,27	2,17	2,2	2,18
2	2,31	2,17	2,26	2,18	2,31	2,17
3	2,33	2,18	2,26	2,17	2,27	2,19
4	2,32	2,16	2,25	2,16	2,22	2,18

Fonte: Produzido pelo autor.

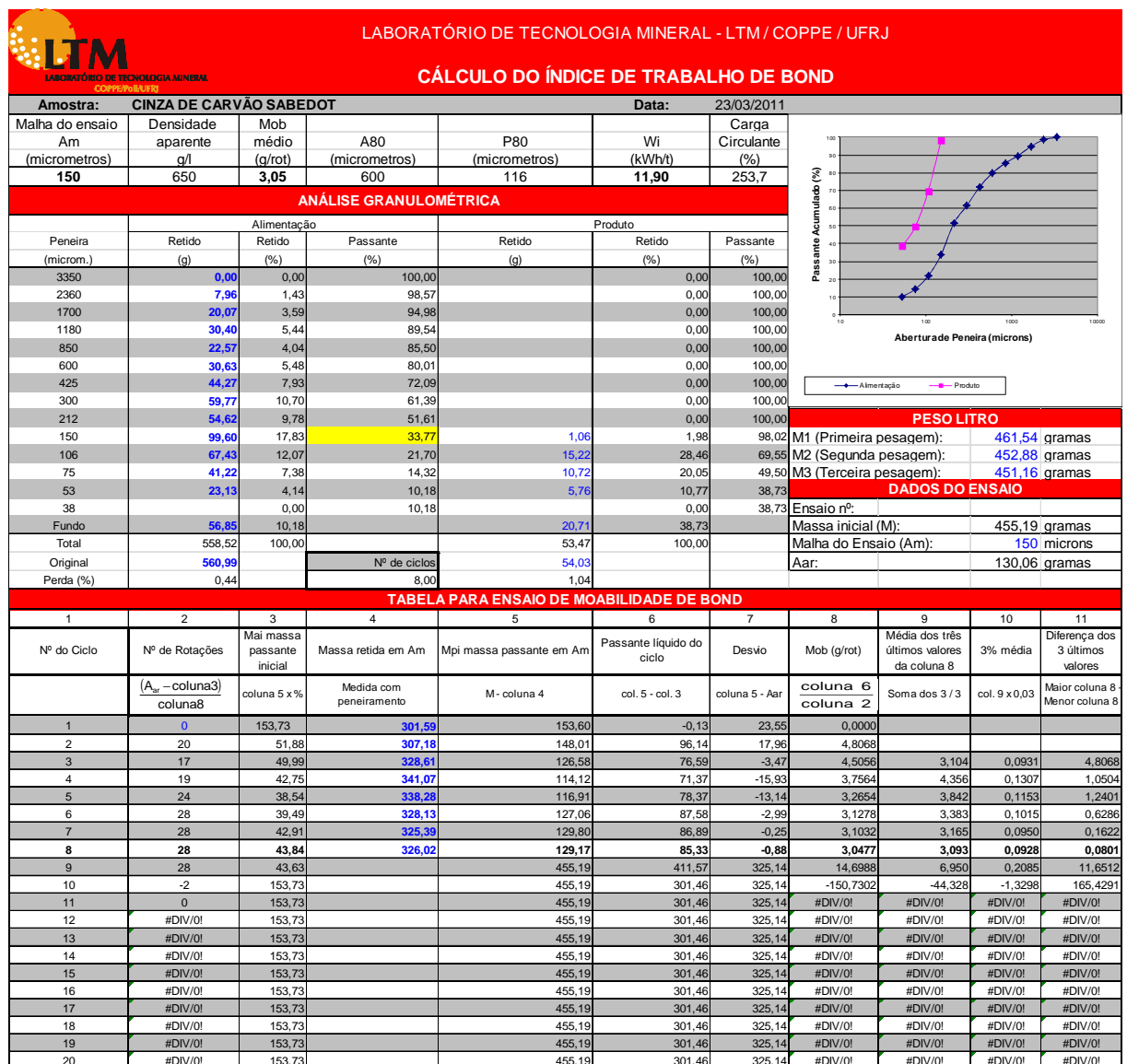
A análise de densidade das amostras de cinzas leves e pesadas mostrou semelhanças entre os valores das duas correntes das diferentes empresas. Os resultados demonstrados na tabela 8 estão compatíveis com os de medições anteriores, realizadas por Rhode *et al.* (2006), em duas das usinas amostradas no presente estudo. Segundo estes autores, os valores para as cinzas podem ser considerados como muito baixos se comparados aos valores dos solos em geral, e

as diferenças podem estar associadas às ocorrências de agregados e partículas que mantêm gases inclusos no seu interior.

5.1.4 Índice de trabalho de Bond

A Figura 24 mostra os dados do ensaio. Os dados demonstram necessidade de baixa potência para o processamento do resíduo.

Figura 24 - Dados do teste de moabilidade TRAC-PES-AM2



Fonte: Produzido pelo autor.

O ensaio para o cálculo do Índice de Trabalho de Bond, para uma amostra de cinza pesada, da segunda amostragem na Braskem, obteve 11,9 kWh/t, energia necessária a sua cominuição e homogeneização a um tamanho de partícula passante 600 micra em uma tela 150 *mesh*.

A avaliação destes resultados demonstra que as diferenças verificadas entre as cinzas leves e pesadas nas análises granulométricas, verificadas anteriormente nas tabelas 04, 05 e 06, podem ser reduzidas por um processo de moagem simples e de baixo custo ou talvez um processo ainda mais econômico de peneiramento de alto índice de fricção.

O consumo energético utilizado na moagem da cinza pesada é, por exemplo, inferior ao necessário à moagem de clínquer de cimento Portland, 13,45kWh/ton, normalmente aceito.

5.2 Caracterização química

5.2.1 Análise elementar

Em uma primeira avaliação dos resultados das análises de material inorgânico das amostras expressas em percentual, chamada vulgarmente de cinzas, pode ser visualizado na tabela 9. Pode-se afirmar que as cinzas leves, apresentaram em todas as amostragens uma concentração de material inorgânico, acima de 99%, enquanto que as cinzas pesadas apresentam variações na sua composição, entre 78 a 98% e menor reprodutibilidade nos resultados.

Os resultados das análises de enxofre nas cinzas pesadas e leves apresentaram concentrações bem menores que as encontradas no carvão, além de pequenas variações entre as amostras. A presença de maior concentração de enxofre no produto, assim como a pequena diferença entre as concentrações das cinzas leves e pesadas nas amostras era esperada devido à característica de volatilidade do elemento.

As análises preliminares demonstram a presença de concentrações em valores bem superiores de matérias voláteis nas frações de cinzas pesadas quando comparadas com as cinzas leves. As cinzas leves possuem concentração entre 0,5 e 2% de variação deste material, enquanto que as cinzas pesadas apresentam concentrações acima de 3%, podendo chegar até 6%, conforme tabela 9.

A análise de material incombusto conforme se verifica na tabela 9, na maioria das amostras tem concentração superior nas cinzas pesadas em detrimento as cinzas leves, a uma inversão ou aproximação das concentrações incombusto de ambas as correntes de cinzas, quando suas concentrações encontram se em patamares muito baixos, aumentando o erro no método de análise. De modo geral pode se afirmar que o incombusto é mais presente nas cinzas pesadas do que nas leves.

Tabela 9 - Análises elementares

EMPRESA	AM	MAT	CINZA (%)	ENXOFRE TOTAL (%)	MATÉRIA VOLÁTIL (%)	UMIDADE TOTAL (%)	INCOMBUSTO (%)
BRAS	AM1	PROD	37,09	0,72	27,52	16,68	-
		PES	92,15	0,31	7,83	52,45	5,72
		FLY	99,19	0,37	0,3	0,12	0,45
	AM2	PROD	35,87	0,73	25,08	17,96	-
		PES	78,67	0,4	4,69	NA	0,14
		FLY	99,54	0,12	0,47	0,15	0,64
	AM3	PROD	33,41	1,21	28,18	15,53	-
		PES	99,92	0,09	0,49	41,57	2,24
		FLY	99,75	0,12	0,08	0,13	0,58
	AM4	PROD	35,84	0,62	24,98	15,05	-
		PES	99,39	0,23	0,27	54,06	0,92
		FLY	100,03	0,29	0	0,12	0,47
CMPC	AM1	PROD	30,47	0,75	28,80	17,46	-
		PES	89,97	0,26	2,96	51	4,92
		FLY	99,12	0,22	0,55	0,2	1,38
	AM2	PROD	37,71	2,03	25,28	18,31	-
		PES	91,59	0,18	4,24	45,29	6,76
		FLY	99,86	0,21	0,22	0,12	1,59
	AM3	PROD	30,52	0,74	27,23	18,36	-
		PES	92,75	0,26	3,39	42,13	5,27
		FLY	98,58	0,15	1,07	0,17	1,58
	AM4	PROD	32,14	0,72	31,54	15,73	-
		PES	92,02	0,37	1,54	47,79	8,45
		FLY	99,25	0,01	0,35	0,19	1,49
TRAC	AM1	PROD	51,20	1,15	20,53	17,56	-
		PES	98,25	0,34	1,53	49,42	3,68
		FLY	99,33	0,35	0,54	0,09	0,24
	AM2	PROD	51,42	1,06	22,47	15,00	-
		PES	99,67	0,16	0,15	54,78	2,48
		FLY	99,5	0,22	0,32	0,12	0,02
	AM3	PROD	50,22	0,89	21,14	13,84	-
		PES	97,94	0,19	1,36	50,12	2,97
		FLY	99,52	0,18	0,18	0,14	3,62
	AM4	PROD	51,92	1,21	19,85	17,17	-
		PES	97,68	0,23	1,74	47,16	0,52
		FLY	99,52	0,14	0,53	0,11	0,66

Fonte: Produzido pelo autor.

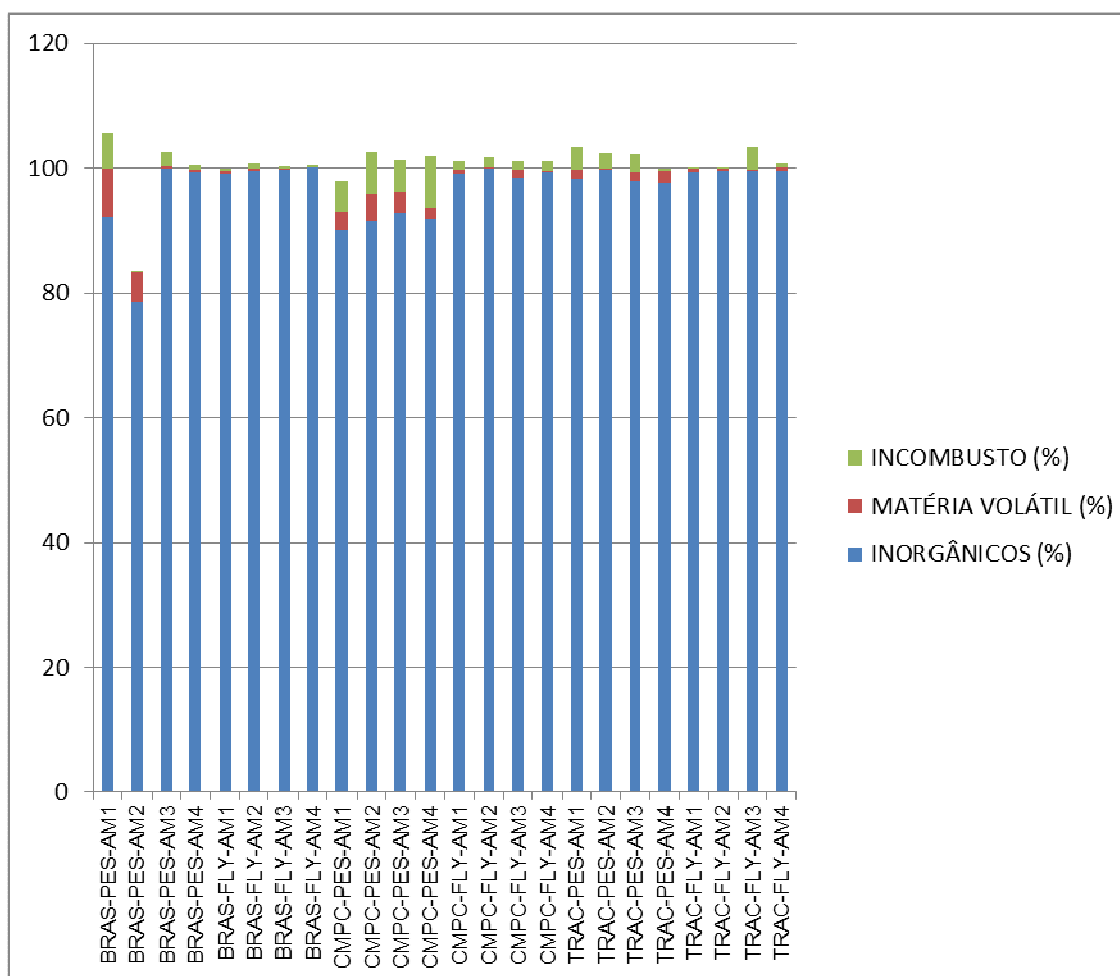
Como apresentado na revisão bibliográfica, à presença de material incombusto, ou a variação da concentração nas cinzas, pode gerar vários problemas

junto aos produtos finais onde são aditivadas, como cura excessiva e formação de bolhas entre outras, tornando-se entrave efetivo à utilização massiva do resíduo.

A presença de maiores concentrações de material incombusto nas cinzas pesadas acaba tornando-se um forte impeditivo em várias circunstâncias para a indústria cimenteira, pré-moldados de concreto, concreto celular, bem como toda indústria da construção civil.

Tanto os resultados de material incombusto quanto os de material inorgânico são plenamente corroborados pela análise de material volátil, todos apresentam valores de referência potencialmente mais altos nas cinzas pesadas, conforme pode ser observado na Figura 25, onde correlacionamos graficamente às variáveis.

Figura 25 - Relação materiais inorgânicos, incombusto e volátil das cinzas



Fonte: Produzido pelo autor.

Nota-se que o material inorgânico presente na amostra é inversamente proporcional à presença de incombusto, assim como o aumento de material volátil

presente está diretamente também ligado a presença deste. Este comportamento supõe devido à presença de material carbonoso não queimado no processo.

Uma análise mais profunda sobre a concentração do material incombusto foi realizada a partir das análises da concentração de incombustos presente na quarta série de amostragem de cinzas leves e pesadas, em cada uma das frações obtidas da a partir do peneiramento da análise de distribuição granulométrica da amostra bruta, demonstrada na Tabela 10. A amostra da cinza pesada da CMPC aplicou-se um procedimento diferenciado, onde após a passada pela série de peneiras a seco, todo o material passante a peneira de 3 mm foi reintroduzido em um processo de separação granulométrica a úmido e agitação vigorosa, conforme semelhante ao realizado para as cinzas leves.

Tabela 10 - Análise de incombustos faixas de distribuição granulométrica da AM4

INCOMBUSTO CINZAS PESADAS						
TELA	BRAS-PES-AM4		TRAC-PES-AM4		CMPC-PES-AM4	
(mm)	Retida (%)	Ponderada (%)	Retida (%)	Ponderada (%)	Retida (%)	Ponderada (%)
50	-	-	-	-	-	-
37,5	-	-	0,03	0,0003	-	-
25,4	-	-	0,38	0,0090	-	-
15,9	-	-	0,10	0,0007	-	-
12,7	2,08	0,0053	0,51	0,0069	-	-
9,50	0,49	0,0025	0,54	0,0146	-	-
6,35	0,39	0,0055	1,09	0,0221	-	-
3,35	0,9	0,0642	1,14	0,0405	6,26	0,1208
2	0,61	0,0536	1,10	0,0316	12,13	0,5460
1,68	0,84	0,0193	0,62	0,0063	20,98	0,2698
1,2	0,82	0,0376	1,13	0,0229	21,88	1,1960
0,75	1,47	0,0824	2,85	0,0868	20,11	1,7459
0,59	1,61	0,0431	0	0,0000	17,36	0,6140
0,5	1,19	0,0349	5,24	0,1773	15,91	1,0743
0,25	0,74	0,0933	7,8	0,8579	9,75	2,9156
0,15	1,66	0,2516	4,72	0,8466	4,22	0,9498
< 0,15	0,41	0,1478	3,48	1,5663	3,88	0,5988
AM Bruta	0,92	-	0,52		8,45	

CINZAS LEVES						
TELA (mm)	BRAS-FLY-AM4		TRAC-FLY-AM4		CMPC-FLY-AM4	
	Retido (%)	Rendimento (%)	Incombusto (%)	Rendimento (%)	Incombusto (%)	Rendimento (%)
0,25	-	-	-	-	-	-
0,15	-	-	2,91	0,0197	3,96	0,1401
< 0,15	0,47	0,118	0,33	0,1094	0,84	0,4970
AM Bruta	0,47		0,66	0,1	1,49	

Fonte: Produzido pelo autor.

A avaliação mostra a tendência de maior presença de material incombusto concentrada em faixas granulométricas específicas das cinzas pesadas, quando se verifica a relação calculando a porcentagem entre a massa de material incombusto sobre a massa total da amostra bruta, incombusto total. Encontra-se uma concentração maior no tamanho de partícula entre 0,15 mm até 0,25 mm, em todas as amostras.

Devido à homogeneidade no tamanho de partícula que apresentam as cinzas leves, observa-se poucas faixas para uma avaliação, mas notas e a presença de uma concentração maior de incombusto nos resultados de nas faixas superiores, de tamanho de partícula $>0,15$ mm.

Estes resultados são plenamente justificáveis quando se tem em mente que o tamanho de partícula é um dos mais importantes elementos controladores da reação da queima dentro de caldeiras a carvão pulverizado.

As grandes concentrações de material incombusto encontrados nas amostras são provavelmente causadas por ineficiências no processo de cominuição do carvão alimentado nas unidades geradores de cinzas, não atingindo a especificação de granulometria exigida pelo projeto do equipamento, antes da sua injeção na zona de queima. A avaliação da concentração do material incombusto é uma importante ferramenta de acompanhamento da eficiência dos processos de queima do carvão, apresentando indiretamente a eficiência do aproveitamento da matéria-prima nas caldeiras, possibilitando identificar rapidamente possíveis problemas no processo.

Importante ressaltar o efeito verificado nas amostras depois de submetidas ao novo processo de peneiramento a úmido vigoroso. Quando comparamos a análise granulométrica das amostras anteriores realizadas a seco, houve uma grande desagregação das cinzas pesadas e o material teve suas faixas bastante alteradas.

Passando de valores médios de 60 a 70% da massa de cinza retida a cima da malha de 6 mm, na avaliação granulométrica a seco, vistas anteriormente nas tabelas 4, 5 e 6, apresentando a mesma amostra após o processo de análise granulométrica a úmido vigoroso uma massa quase que totalmente desagregada, entre 80 a 90% e passante nas telas inferiores, $< 0,6$ mm.

Aspecto diferencial marcante entre as correntes de cinzas leves e pesadas, as concentrações de umidade total nas amostras analisadas apresentaram grande diferenças, resultantes da forma de extração e manipulação entre elas nas unidades geradoras. Enquanto que as cinzas volantes apresentam valores médios inferiores a

0,2% de umidade total, as correntes de cinzas pesadas praticamente atingem sua saturação de umidade, apresentando concentrações entre 40 e 50%, demonstradas na Tabela 9.

Estas diferenças se devem à forma de abatimento utilizada em cada caso: via seca e aérea para cinzas leves e via úmida por sistemas de retiradas e tubulação hidráulica para as de fundo. Além do abatimento da cinza pesadas na caldeira ser realizado via úmida, normalmente, os empreendimentos ainda realizam o transporte por sistemas hidráulicos para deposição em lagos de decantação, o que altera substancialmente a umidade desta fração.

As grandes concentrações de umidade presentes nas correntes de cinzas pesadas podem ser facilmente removidas por sistemas de secagem, como secadores rotativos ou manipulação em áreas abertas por equipamentos para secagem. Várias destas unidades estão hoje espalhadas dentro de empresas geradoras do resíduo de cinzas, com o processo todo sendo controlado e manipulado por conta e risco do tomador do produto, citando-se as unidades de secagem da empresa Votorantin Cimentos, no município de Esteio e da empresa Suprema Cimentos, localizada em Criciúma, dentre outras.

5.2.2 Determinação de óxidos maiores, menores e elementos traços

As cinzas remanescentes da combustão do carvão consistem de uma mistura complexa de fases cristalinas e amorfas sem um ponto de fusão definido. Essa parcela inorgânica do carvão se caracteriza por agregar em sua composição uma grande diversidade de óxidos, entre eles SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , K_2O e Na_2O .

As análises de óxidos de elementos maiores das amostras de cinzassão apresentadas na Tabela 11.

Os teores mais altos de sílica, seguido de alumínio e subsequentemente o ferro e mais baixos para Ca e Mg, são confirmados pelas concentrações nas análises de elementos maiores de seus óxidos.

Tabela 11 - Óxidos elementos maiores

A M	Eleme nto	PESCon c(%)	BRAS FLY Conc(%)	PRODCon c(%)	PESCon c(%)	CMPC FLYCon c(%)	PRODCon c(%)	PESCon c(%)	TRAC FLYCon c(%)	PRODCon c(%)
1	SiO ₂	42,75	60,9		46,5	59,05		59,4	61,5	
	Al ₂ O ₃	18,1	28,85		19,65	27,25		24,95	27,45	
	Fe ₂ O ₃	5,52	2,15		7,65	3,13		6,65	3,72	
	CAO	3,04	2,37		5,89	3,73		2,68	1,66	
	MgO	0,35	0,505		0,38	0,465		0,405	0,425	
	TiO ₂	0,81	1,23		0,93	1,21		1,105	1,205	
	P ₂ O ₅	0,04	0,054		0,034	0,045		0,042	0,042	
	Na ₂ O	0,12	0,21		0,145	0,195		0,13	0,12	
	K ₂ O	1,21	1,75		1,21	1,535		1,63	1,665	
	MnO	0,06	0,015		0,09	0,035		0,05	0,02	
	LOI		0,835			1,895			1,135	
	C	17,8104	0,509 93	45,39165	7,855817	1,055733	44,66333	1,2189	0,06419	40,5591
	H	0,58843	0,014 78	3,442425	0,311503	0,036742	1,94177	0,01581	0,0126	2,9399
	N	0,33573	0,047 27	0,828191	0,226166	0,081147	0,877273	0,06101	0,05332	0,7094
	S	0,44778	0,083 21	0,90105	0,277356	0,114722	3,434997	0,10518	0,08771	1,6601
2	SiO ₂	45,8	60,8		49,8	59,3		58,3	62,2	
	Al ₂ O ₃	19,9	29,7		21,5	27,7		24,1	28,6	
	Fe ₂ O ₃	5,07	1,96		7,4	2,9		7,51	3,04	
	CAO	2,5	2,24		6,13	3,68		3,03	1,52	
	MgO	0,31	0,48		0,39	0,48		0,38	0,43	
	TiO ₂	0,86	1,26		0,98	1,24		1,07	1,22	
	P ₂ O ₅	0,035	0,052		0,037	0,049		0,042	0,044	
	Na ₂ O	0,13	0,24		0,16	0,21		0,14	0,12	
	K ₂ O	1,28	1,73		1,31	1,59		1,74	1,79	
	MnO	0,05	0,01		0,08	0,03		0,06	0,02	
	LOI		0,87			1,08			0,88	
	C	20,7391	0,372 5	47,25864	8,589475	0,818353	45,10007	2,87615	0,50448	35,3291
	H	0,76024	0,119 05	4,578824	0,303106	0,072745	4,699888	0,11007	0,02817	3,88316
	N	0,30169	0,034 74	0,826307	0,173428	0,034241	0,828526	0,07306	0,05301	0,6734
	S	0,45013	0,107 21	0,722724	0,473867	0,207873	0,980943	0,22311	0,12503	0,5593
3	SiO ₂	62,3	63,3		56,4	61,2		60,6	63,5	
	Al ₂ O ₃	24,6	28		22,2	26,9		24	27,4	
	Fe ₂ O ₃	6,33	2,02		5,91	3,29		7,73	3,17	
	CAO	4,62	3,18		5,87	2,73		1,89	1,3	
	MgO	0,51	0,53		0,44	0,51		0,45	0,46	
	TiO ₂	1,16	1,23		1,04	1,23		1,08	1,19	
	P ₂ O ₅	0,048	0,054		0,043	0,048		0,56	0,052	
	Na ₂ O	0,23	0,27		0,26	0,27		0,16	0,17	
	K ₂ O	1,68	1,62		1,35	1,49		1,57	1,64	
	MnO	0,05	0,01		0,07	0,02		0,04	<0,01	
	LOI		0,58		7,01	1,76		1,79	1,04	
	C	0,14475	0,701 031	47,71531	3,654289	1,499628	50,44698	0,672163	0,838788	35,3753
	H	0,055104	0,053 224	3,9035	0,193355	0,033853	4,585111	0,054224	0,035967	3,1451
	N	0,063747	0,096 74	0,9059	0,122609	0,081951	0,927749	0,096572	0,087916	0,7102
	S	0,04473	0,118 98	1,090394	0,121047	0,100949	0,895233	0,043872	0,110845	0,6058
4	SiO ₂	65,2	64		54,6	62		61,5	63,7	
	Al ₂ O ₃	25,2	29,5		22,5	26,8		23,1	27,2	
	Fe ₂ O ₃	4,73	2,14		5,39	3,31		8,18	3,84	
	CAO	2,75	1,73		4,09	3,65		2,03	1,39	
	MgO	0,52	0,57		0,44	0,54		0,46	0,47	
	TiO ₂	1,2	1,29		1,02	1,2		1,05	1,18	
	P ₂ O ₅	0,048	0,066		0,042	0,058		0,057	0,055	
	Na ₂ O	0,19	0,21		0,17	0,24		0,16	0,17	
	K ₂ O	1,64	1,77		1,31	1,56		1,52	1,69	
	MnO	0,04	0,02		0,04	0,02		0,05	0,01	

LOI		0,1		8,9	1,97		2,34	0,73	
C	0,365618	0,236 756	45,65513	9,770139	1,654069	49,98547	2,005498	0,551808	29,782
H	0,058432	0,024 168	3,913577	0,240399	0,038048	4,25257	0,108151	0,033887	2,8695
N	0,082967	0,066 455	0,845214	0,202991	0,089551	0,956847	0,095436	0,085534	0,62914
S	0,037419	0,236 75	0,558362	0,229885	0,123007	0,66655	0,264519	0,103762	1,0348

Fonte: Produzido pelo autor.

As concentrações dos óxidos de silício e alumínio nas cinzas de pesadas originárias de produtos da combustão do carvão 5200 e 4700 kcal/t possuem uma relação menor em termos percentuais sobre a massa total, quando comparado com as suas cinzas volantes, aproximadamente 60 e 90%, respectivamente. No caso das cinzas geradas do carvão de menor poder calorífico, a relação foi mais homogênea de 85% e 90%, respectivamente, com uma potencialidade para as utilizações diferentes, quando comparada com as cinzas das de maior poder calorífico geradas nas empresas CMPC e BRASKEM, principalmente no caso das cinzas pesadas.

As análises detectaram uma maior concentração de óxidos de ferro e óxido de cálcio nas amostras de cinzas oriundas dos carvões de maior poder calorífico, 5200 e 4700 kcal/t com concentrações em torno de 7,0 a 8,0% e de 5,5 a 6,5%, respectivamente, geralmente ligadas à redução das temperaturas de fusibilidade das mesmas.

As análises de óxidos de magnésio, titânio, sódio, potássio e manganês não apresentaram divergências significativas quanto aos seus resultados, mostrando valores baixos e constantes ao longo das amostras.

Os resultados da tabela 11 indicaram baixos valores de enxofre em todas as amostras, mas com particular redução nas amostras das cinzas leves, o que seria esperado devido às altas temperaturas utilizadas no processo de combustão, responsáveis pela volatilização do elemento, oscilando entre 3 a 5 vezes mais, quando comparadas às concentrações nas cinzas de fundo sobre as volantes.

Grandes concentrações de carbono, 3,7 a 9,7%, foram detectadas em todas as amostras de cinzas pesadas da empresa CMPC e nas amostras 1 e 2 da empresa BRASKEN. Os altos teores de carbono e as grandes variações entre as amostras confirmam as imperfeições dos processos.

As cinzas leves apresentaram valores de concentrações bastante similares em todas as amostras coletadas, atingindo no máximo 1,5%.

As análises de nitrogênio e hidrogênio das amostras das cinzas mostraram resultados muito baixos e homogêneos em todas as amostras, com valores abaixo de 1% da massa, como esperado devido a características.

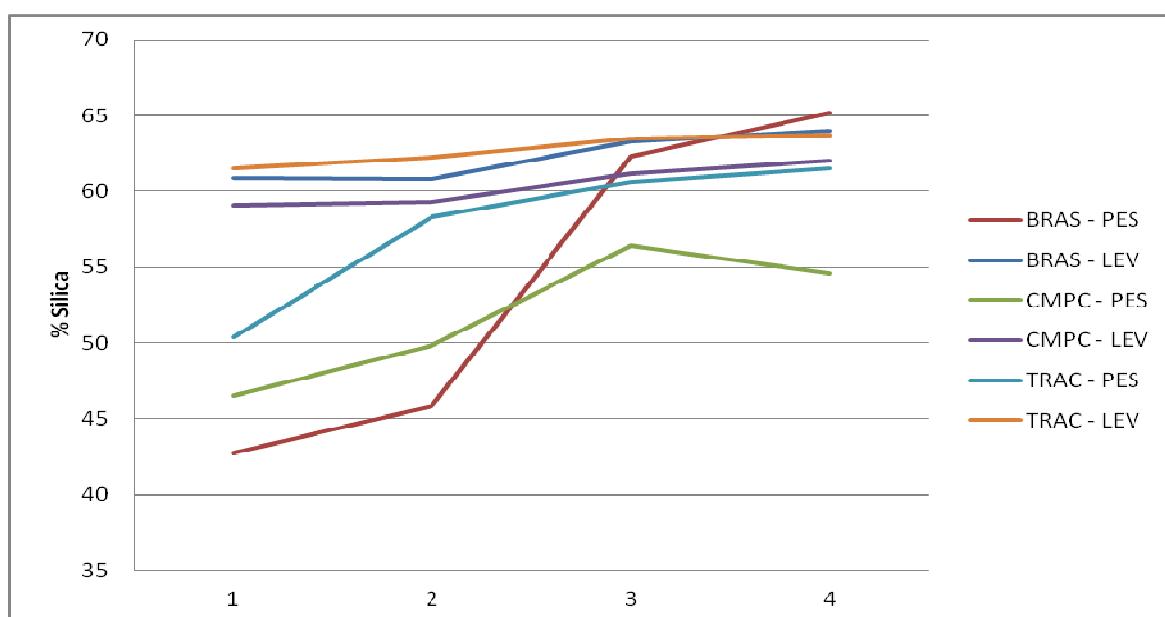
A presença de elementos trocáveis, como os óxidos de metais alcalinos terrosos Ca e Mg, com teores superiores, corroboraram o caráter alcalino da cinza leve, este fato foi confirmado pelos valores de pH de todas as amostras em suspensão aquosa.

A perda ao fogo (LOI) apresentou maiores valores no material gerado do carvão de maior poder calorífico da CMPC.

Nas Figuras 26 e 27, avaliam se as concentrações dos dois elementos preponderantes na composição das quatro amostras das cinzas. Os silicatos e óxidos de alumínio compõem sozinhos 60 a 90% do total em massa das amostras de cinzas tanto leves quanto pesadas.

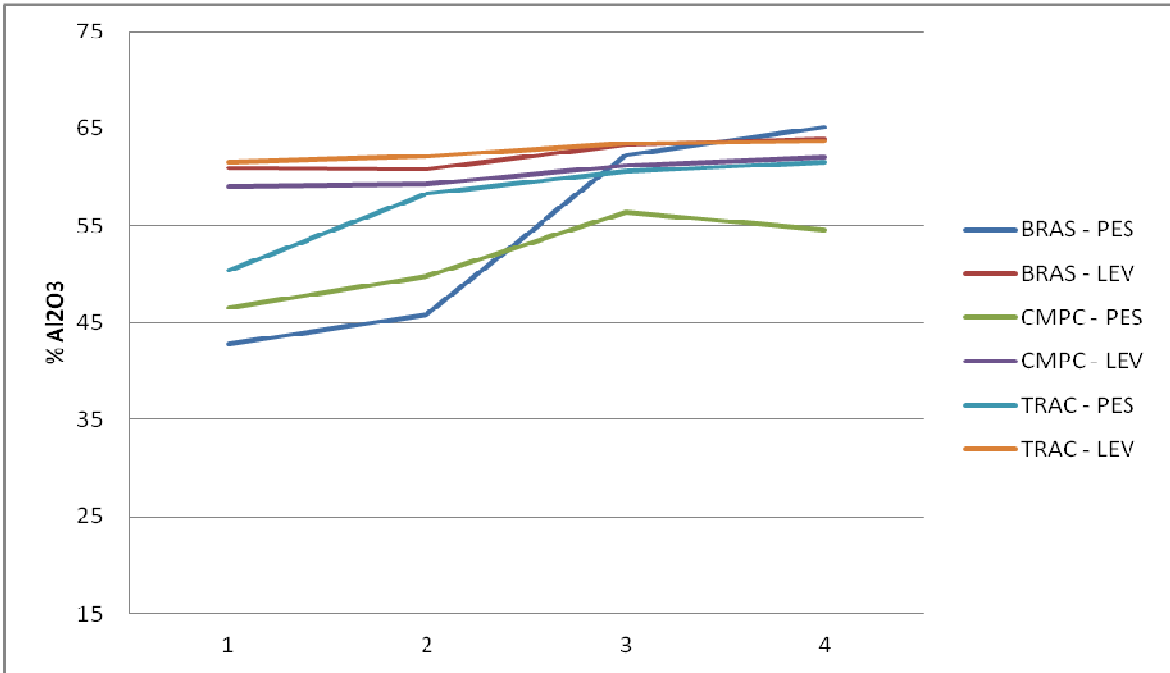
O diagrama de concentrações expresso na Figura 28 correlaciona, além das concentrações dos elementos silicatos e óxidos de alumínio também o óxido de ferro. O Diagrama formado a partir da combinação das concentrações dos elementos analisados delimitando uma região de abrangência para as variações das quatro amostras de cinzas pesadas e leves, explicitando no diagrama a composição combinada esperada do material em análise.

Figura 26 - Concentração de SiO_2



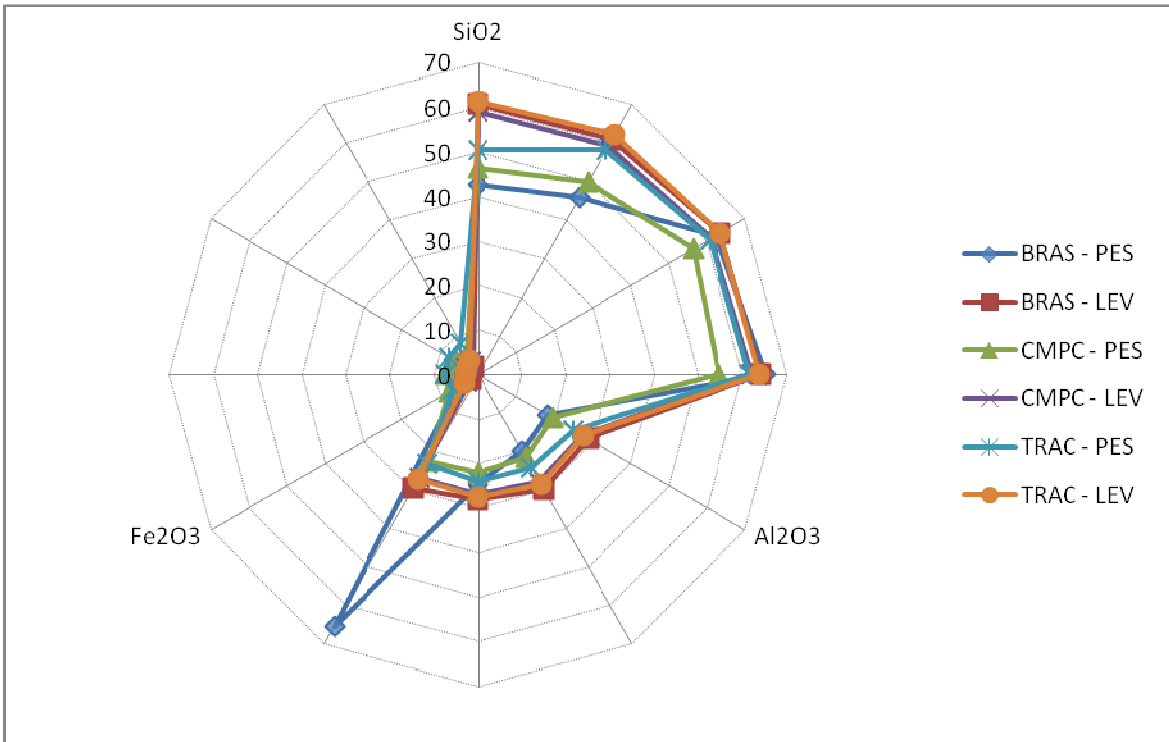
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 27 - Concentração de Al₂O₃



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 28 - Diagrama de concentração SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃



Fonte: Produzido pelo autor.

Uma avaliação dos dados em gráficos demonstrou que para as cinzas pesadas existe uma tendência de diferenciação na sua composição quando geradas a partir de carvões com mais alto poder calorífico em relação ao gerado pelo de menor poder calorífico, verificada claramente no diagrama de concentrações quando se avaliam separadamente. As cinzas pesadas geradas a partir da queima dos carvões de maior poder calorífico como da empresa CMPC, 5200 kcal/t, e BRASKEN, 4700 kcal/t, apresentaram comportamento próximos, concentrações de silicatos oscilando entre 42,7 e 65,2%, de óxidos de alumínio entre 18,1 e 25,2%, respectivamente.

Enquanto as cinzas pesadas originárias da queima do carvão de menor poder calorífico da empresa Tractebel, 3100kcal/t tem um comportamento semelhante aos resultados das concentrações obtidas para as cinzas leves, com localizando-se nos limites ou pouco abaixo aos estabelecidos por estas, sempre próxima a 60% de silicatos e entre 26,8 e 29,7% para o óxido de alumínio.

A fusibilidade de cinzas está intrinsecamente ligada à presença de elementos como Fe, Ca, Na e Mg; quanto maior a presença destes elementos, menores são as temperaturas de fusão e amolecimento do material. Baixas temperaturas de fusão são responsáveis pela formação de um material denominado “cascão”, que adere às paredes das caldeiras devido à ultrapassagem da temperatura de fusão da cinza, causando problemas operacionais nos equipamentos. De um modo geral, grandes quantidades de fases minerais com alto e baixo ponto de fusão causam um aumento ou redução, respectivamente nas temperaturas de fusibilidade. Porém, esse fato algumas vezes não ocorre devido às transformações e interações sofridas em altas temperaturas das fases minerais das cinzas, originando novas fases com diferentes pontos de fusão.

Na análise de elementos menores detectou-se a presença de elevadas concentrações dos metais pesados chumbo, cromo trivalente e arsênio (Tabela 12), nas análises das cinzas pesadas e leves do material originário da combustão de carvão com 3100 kcal/t.

Tabela 12 - Óxidos elementos menores

Conc. (mg/kg)																		
AM	ARSÊNIO			CHUMBO			CROMO TT			CÁDMIO			MERCÚRIO			URÂNIO		
	1	3	4	1	3	4	1	3	4	1	3	4	1	3	4	1	3	4
BRAS - PES		<1	<1		1,2	2,7		5,3	3,9		<0,1	<0,1		0,051	0,051		<1	<1
BRAS - FLY		12	12		4,9	3,8		14	13		<0,1	<0,1		0,12	0,052		<1	<1
BRAS - PRO	1,9		<1	6,67		7	7,2		8,9	<0,001		<0,1	0,124	0,068		<0,4	<1	
CMPC - PES		<1	<1		1,9	11		6,4	14		<0,1	<0,1		<0,05	0,051		<1	<1
CMPC - FLY		15	12		3,1	3,6		12	15		<0,1	<0,1		0,1	0,12		<1	<1
CMPC - PRO	2,8		<1	6,48		7,8	10,7		6,4	<0,001		<0,1	0,025		0,074	<0,7		<1
TRAC - PES	<0,01	12	<1	0,613	3,2	1,4	3,85	6,9	4,7	<0,001	<0,1	<0,1	0,056	0,051	0,051	<0,4	<1	<1
TRAC - FLY	4,1	4,7	16	1,18	3,8	1,8	5,6	4,1	4,5	<0,001	<0,1	<0,1	0,064	0,051	0,1	<0,6	<1	<1
TRAC - PRO	<0,01		5,9	7,97		51	9,64		90	<0,001		<0,1	0,072		0,57	<0,4		<1

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.3 Caracterização de resíduos, ensaios de lixiviação e solubilização

A análise de classificação de resíduo sólido, realizada na terceira amostra das cinzas pesadas da unidade da empresa Tractebel, foi classificada como resíduo classe II - Não Perigoso, para os ensaios de periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, conforme avaliação descrita na análise de constante no Anexo II.

As análises dos lixiviados realizadas dentro da metodologia de classificação de resíduos, para mesma amostra de cinzas pesadas, conforme tabela 13, não demonstraram transporte de concentrações dos elementos significativas, a ponto de serem consideradas tóxicas pelos padrões da NBR 10.004.

Ainda na avaliação do ensaio de solubilização realizado também dentro da metodologia de classificação de resíduos da terceira amostra de cinza pesada, não foram verificadas solubilização dos elementos chumbo, assim como o cromo e arsênio apresentaram valores de concentrações no extrato solubilizado das amostras, muito baixas ou não detectados, como se verifica na Tabela 14.

Determinando se que para as amostras avaliadas, nas condições executadas pelo método, os elementos metais pesados detectados na análise de elementos-

traço, discutida no item anterior, não apresentaram periculosidade, sendo, portanto classificada como Classe II.

Por outro lado, os mesmos ensaios de solubilização demonstram que as cinzas, conforme os padrões da NBR10004, não podem ser considerados como produtos inertes, devido à ultrapassagem dos limites máximos observáveis dos elementos sulfatos e alumínio, 496 mg/L de sulfatos e 1,1 mg/L de alumínio.

Notou-se detecção sazonal da presença de selênio e arsênico nas correntes de cinzas pesadas em concentrações acima do limite, indicadores de possíveis restrições à utilização massiva na agricultura e recuperação de áreas degradadas sem um severo controle ambiental em longo prazo.

Tabela 13 - Análise de lixiviados cinzas pesadas TRAC-PES-AM2

Determinação	Unidades	Resultado	Máx.(NBR 10.004)
Fluoretos	mg/L F ⁻	0,66	150,0
Arsênio	mg/L As	0,012	1,0
Bário	mg/L Ba	0,645	70,0
Chumbo	mg/L Pb	0,199	1,0
Cromo	mg/L Cr	N.D.	5,0
Cádmio	mg/L Cd	N.D.	0,5
Merúrio	mg/L Hg	N.D.	0,1
Prata	mg/L Ag	0,021	5,0
Selênio	mg/L Se	0,011	1,0

Fonte: Produzido pelo autor.

N.D. = Não Detectado.

Tabela 14 - Análise de solubilizados cinzas pesadas TRAC-PES-AM2

Determinação	Unidades	Resultado	Máx.(NBR 10.004)
Fenóis	mg/L C ₆ H ₅ OH	N.D.	0,01
Surfactantes	mg/L ABS	0,03	0,5
Cianetos	mg/L CN ⁻	N.D.	0,07
Cloretos	mg/L Cl ⁻	2,81	250,0
Fluoretos	mg/L F ⁻	1,31	1,5
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	496	250
Nitratos	mg/L NO ₃ ⁻	0,2	10,0
Alumínio	mg/L Al	1,1	0,2
Arsênio	mg/L As	N.D.	0,01
Bário	mg/L Ba	0,06	0,7
Chumbo	mg/L Pb	N.D.	0,01
Cobre	mg/L Cu	N.D.	2,0
Cromo	mg/L Cr	N.D.	0,05
Cádmio	mg/L Cd	N.D.	0,005
Ferro	mg/L Fe	0,075	0,3
Manganês	mg/L Mn	0,012	0,1
Merúrio	mg/L Hg	N.D.	0,001
Prata	mg/L Ag	N.D.	0,05
Selênio	mg/L Se	N.D.	0,01
Sódio	mg/L Na	20,0	200,0
Zinco	mg/L Zn	0,03	5,0

Fonte: Produzido pelo autor.

N.D. = Não Detectado.

5.2.4 Potencial hidrogeniônico (pH)

Os valores para pH do meio aquoso contendo as cinzas leves e pesadas estão mostrados dos na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores de pH da suspensão de cinzas

AM	BRASKEM		CMPC		TRACTEBEL	
	PES	FLY	PES	FLY	PES	FLY
1	FLY	12,6	8,9	12,2	9,3	9,6
2	8,7	12,0	12,1	12,6	9,1	11,9
3	8,9	12,5	12,1	12,3	8,4	11,6
4	9,4	11,5	11,7	12,3	9,5	11,1

Fonte: Produzido pelo autor.

Os valores da Tabela 15 indicam materiais alcalinos, com alcalinidade mais acentuada nas cinzas leves, nas quais os valores tendem à homogeneidade. Os valores das cinzas pesadas são mais heterogêneos e certamente refletem as características da matéria-prima beneficiada e queimada.

O pH da massa e do concreto depois de curado é considerado um dos fatores mais importantes, responsável por possíveis degradações futuras devido a reações expansivas. O pH considerado ideal para cimento Portland é de aproximadamente 10. O pH das amostras das cinzas pesadas oscilaram entre 8 e 12, enquanto os obtidos das cinzas leves tem um faixa de variação menor de 11 a 12,5. As cinzas leves apresentam-se com valores mais próximos aos valores ideais para a adição a massa sem causarem modificações ao agregado, enquanto as cinzas pesadas apresentaram variações que devem ser corrigidas ou dosadas em proporções que não gere a redução do pH da massa toda.

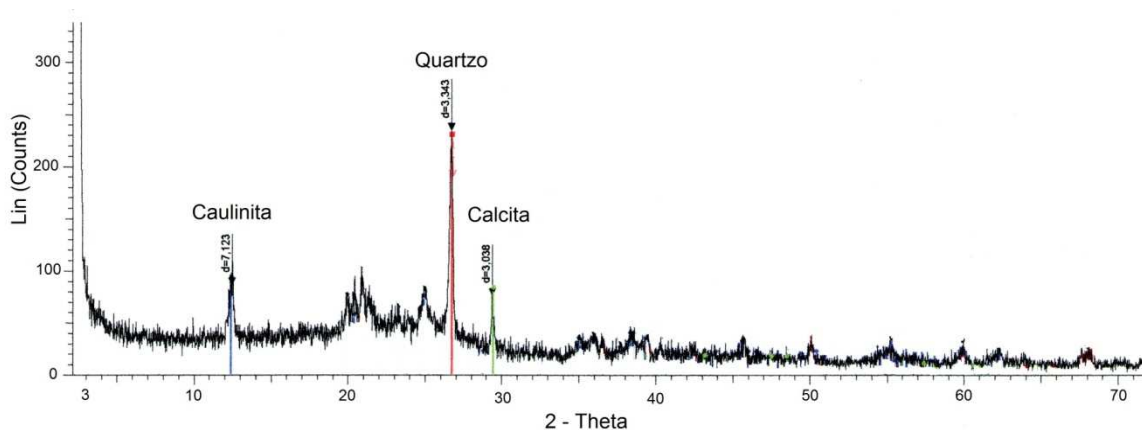
5.3 Caracterização mineralógica

5.3.1 Difratometria

As Figuras 29, 30 e 31 mostram, respectivamente, os difratogramas de amostras do carvão alimentado, das cinzas pesadas e leves da segunda amostra da empresa CMPC.

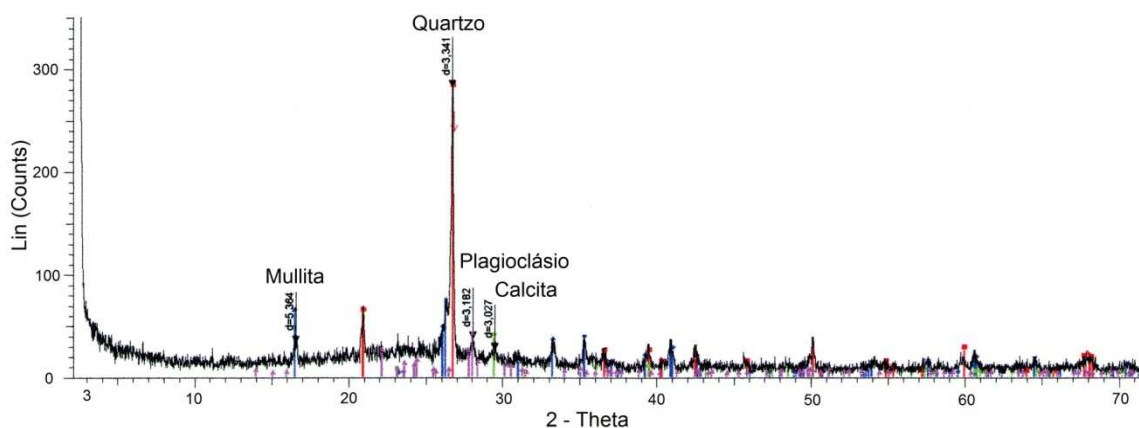
Os difratogramas mostram algumas diferenças. No carvão (Figura 29), ficam evidentes as fases cristalinas quartzo, caulinita e calcita como principais minerais associados. Na cinza pesada (Figura 30), além do quartzo, verifica-se a substituição de caulinita por mullita, processo que ocorre durante a combustão do carvão. A detecção de plagioclásio na cinza pesada deve-se ao aumento de sua concentração nesta amostra, pela queima do carvão; neste, antes da queima, o plagioclásio deveria estar em concentrações inferiores ao limite de detecção do difratômetro de raios.

Figura 29 – Difratograma carvão alimentado CMPC-PROD-AM2



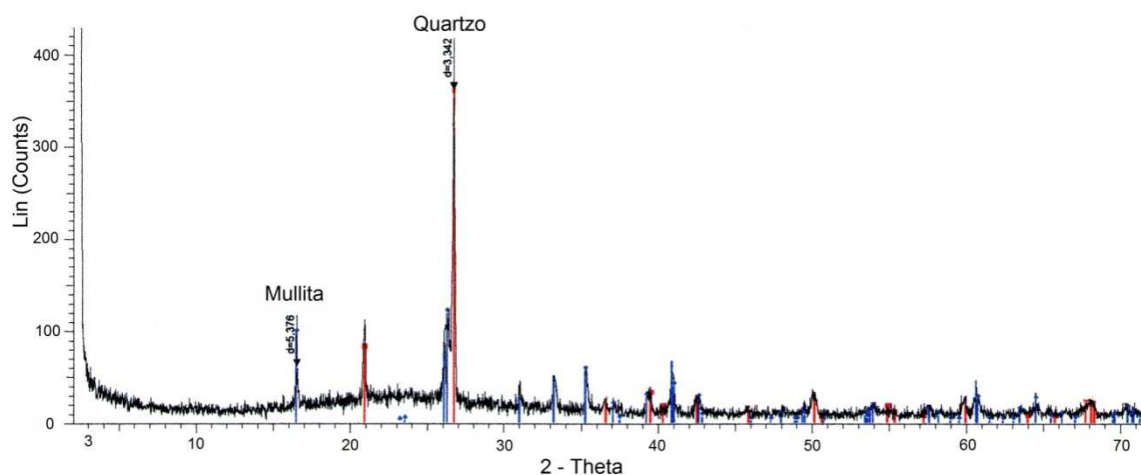
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 30 – Difratograma cinzas pesadas CMPC-PES-AM2.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 31 – Difratoograma cinzas leves CMPC-FLY-AM2



Fonte: Produzido pelo autor.

5.3.2. Morfologia

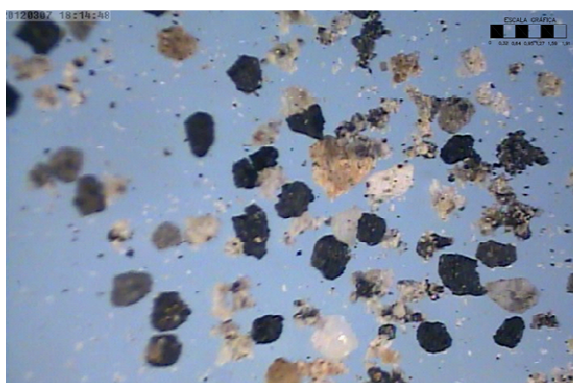
As análises microscópicas possibilitaram uma avaliação melhor da forma e uma visualização das fases minerais, indicando a diversidade quanto à composição das amostras e as características do material.

Com auxílio de fotomicrografias obtidas em lupa binocular avaliou-se a amostra 4 de cinzas pesadas e leves das três empresas (resultados no Anexo III).

A partir destas observações constatou-se serem as partículas de maior dimensão, presentes nas cinzas pesadas, constituídas por aglomerados de partículas menores, conforme se visualiza nas Figuras 32 a 37.

Figura 32 - Fotomicrografia TRAC-PES

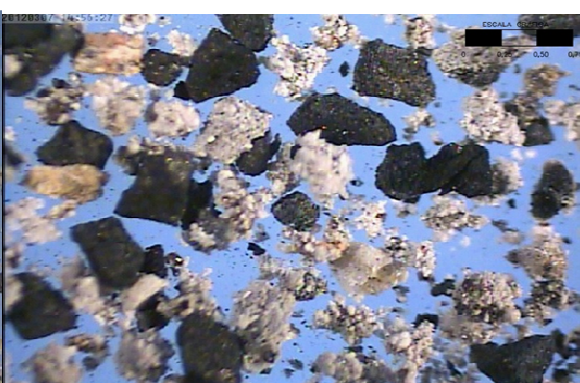
AM4, 0,25 mm



Fonte: Fotomicrografia produzida pelo autor.

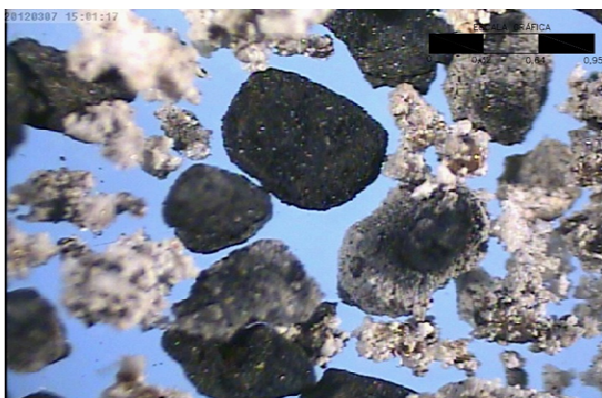
Figura 33 - Fotomicrografia CMPC-PES

AM4, 0,50 mm



Fonte: Fotomicrografia produzida pelo autor.

Figura 34 - Fotomicrografia CMPC-PES
AM4 0,75 mm



Fonte: Fotomicrografia produzida pelo autor.

Figura 35 - Fotomicrografia BRAS-PES
AM40,75 mm



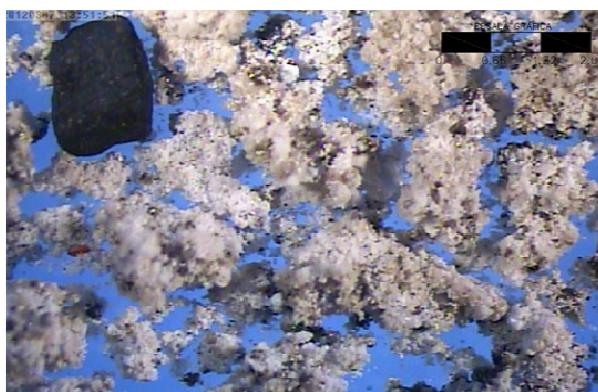
Fonte: Fotomicrografia produzida pelo autor.

Figura 36 - Fotomicrografia BRAS-PES
AM4 1,20 mm



Fonte: Fotomicrografia produzida pelo autor.

Figura 37 - Fotomicrografia BRAS-PES
AM4 1,68 mm



Fonte: Fotomicrografia produzida pelo autor.

As cinzas leves apresentaram massa homogênea em forma e tamanho de partícula, conforme análise visual, com alguma diferença de coloração. As partículas de cor mais escura indicaram a presença de material incombusto na massa, sendo que quanto mais clara a cinza melhor a queima foi realizada.

Nas cinzas pesadas observa-se uma grande diversidade de tamanhos de partículas, formas, composição e coloração. Estas frações diferenciam claramente os materiais:

- Carvão: material incombusto, grãos grossos, completamente intactos, cores escuras e com aspecto de sólido, apresentando um tamanho médio de partícula superior ao das cinzas de combustão;

- Sílica: partículas com formato desordenado (amorfo) com coloração leitosa esbranquiçada, sem transparência alguma, disposta em inúmeros formatos esféricos ou ovalados e aglomerados com materiais mais finos, formados devido à dinâmica de aquecimento e resfriamento, e até mesmo de interferentes em suas formações cristalinas;
- Quartzo: cristal bastante transparente com formato cristalino organizado, grãos de formatos retangulares, losangulares e quadrados, também consequência do aquecimento e resfriamento do material;
- Argilominerais: com coloração oscilando nos tons de marrom e cinza claros e escuros compondo os aglomerados e em partículas mais finas dispersas;
- Pirita: coloração amarelada e metalizada característica do óxido metálico, sulfato de ferro.

Os aglomerados de pequenas partículas são mais perceptíveis nas frações retidas de materiais nas malhas superiores, a partir de 0,5 mm. As partículas aglomeradas, facilmente friáveis, de fácil redução de tamanho através de processos de baixo impacto, provavelmente, resultantes de processos físicos atrativos de baixa energia. Comprovado quando se submeteu-se as frações de amostras a um processo de análise granulométrica em sistema úmido e agitação vigorosa como discutido anteriormente nas análises físicas, com uma clara desagregação dos aglomerados.

Nas frações granulométricas de cinzas pesadas, verificou-se que a presença do material incombusto para cinzas pesadas nas mesmas dimensões já anteriormente detectadas pela análise de incombusto, entre as frações de 2,0 e 0,50 mm. Enquanto notou-se a sua quase ausência nos materiais avaliados abaixo 0,15 mm. A Tabela 16 mostra a classificação e concentração dos materiais e minerais por contagem amostral visual realizada para quarta série de coletas de amostras de cinzas pesadas.

Um fato interessante é que a presença de material incombusto, denominado simplesmente de carvão na Tabela 16, formado somente por partículas sólidas maciças, diferentemente dos materiais inorgânicos, não estando disseminadas por toda a amostra e sim concentradas em algumas partículas. Observa-se, também, a tendência em algumas amostras de redução destes incombustos em frações específicas, 0,6 e 1,2 mm na amostra da Braskem; acima de 0,95 mm nas amostras da Tractebel.

Tabela 16 - Classificação mineralógica visual cinza pesada AM4

	PENEIRA (mm)	CARVÃO	SÍLICA	QUARTZO	ARGILOMINERAL	PIRITA
TRAC-PES-AM4	< 0,15	10,7	54,5	4,2	26,9	3,8
	0,15	15,3	32,4	5,2	41,8	5,3
	0,25	26,6	41,4	6,0	24,4	1,6
	0,95	4,7	52,6	2,7	33,7	6,3
CMPC-PES-AM4	< 0,15	7,7	78,9	1,4	11,4	12,8
	0,15	11,2	57,9	3,6	23,7	3,6
	0,25	24,5	14,5	0,0	55,8	5,2
	0,5	26,0	15,1	1,1	54,0	3,7
	0,75	19,2	18,8	0,0	59,3	2,6
BRAS-PES-AM4	<0,15	2,5	92,9	0,5	0,7	3,5
	0,15	3,4	88,3	1,1	4,0	3,2
	0,25	2,0	84,9	1,7	8,0	3,4
	0,5	2,4	90,6	1,1	5,2	0,8
	0,59	2,2	88,7	1,8	4,9	2,5
	0,75	0,8	94,1	0,9	3,3	0,9
	1,2	4,0	85,4	1,0	7,9	1,7
	1,68	3,7	49,9	0,0	42,9	3,5
	2	0,0	68,9	0,0	22,3	8,8
	3,5	2,2	21,4	0,0	69,5	8,4

Fonte: Produzido pelo autor.

5.4 Considerações finais

Os resultados confirmam as grandes variações entre as composições das cinzas pesadas da mesma ou de várias origens, quando comparadas entre si. As cinzas leves apresentam composições mais estáveis e reprodutíveis. Este fato é o principal motivo para a opção de uso da cinza leve pelas empresas, em detrimento à cinza pesada. Os resultados somente corroboram a realidade dos projetos e montagem dos equipamentos para geração de energia a partir da queima de carvão, construídos de forma a privilegiar as cinzas leves e tornar estas mais homogêneas, e acumulando todos os contaminantes nas cinzas pesadas, portanto, mais heterogêneas.

Estas variações são amplificadas, nas cinzas pesadas, quando se agregam alterações com os processos de extração, manuseio e deposição inadequados para

as cinzas após a queima do carvão, como transporte, arraste hidráulico e deposição em grandes lagoas de sedimentação.

Alterar a forma tratamento dada ao resíduo, definindo uma forma de manipulação com vias de garantir a obtenção de características de qualidade mais homogêneas, desde a fonte de geração na empresa que consome o carvão até a destinação final, viabilizando o uso das mesmas.

Cada carvão processado em cada gerador deve ser tratado como produto singular, que necessita de processos de segregação, transporte e deposição que evitem contaminações com outros materiais e também cinzas de outras fontes, evitando-se grandes depósitos comuns de cinzas de várias origens com qualidades desconhecidas e grande variabilidade.

Os estudos citados na revisão bibliográfica do presente trabalho demonstraram muitas vantagens para utilização de cinzas de carvão em termos estratégicos, econômicos, técnicos e ambientais. A gestão ambiental do resíduo da combustão do carvão se justifica por si só, devido ao seu caráter causador de possíveis danos ambientais (legislação e poluição) quando tratado inadequadamente, e torna-se mais atrativo quando são agregadas questões sociais (saúde da comunidade e geração de empregos) e comerciais (colaboradores, investidores, clientes, etc.).

A possibilidade de presença de traços de metais pesados nas cinzas pesadas, mesmo que sazonalmente, restringem a utilização ampla das cinzas em fertilização, recomposição e recuperação de áreas abertas na agricultura. Pressupõe-se a necessidade de ambientes controlados, como o que ocorre nos ambientes confinados de mineração, devido à incerteza sobre existência de solubilização e transporte, em certas circunstâncias de algum elemento nocivo.

Processos que envolvam a imobilização das cinzas tanto leves como pesadas devem ser considerados visando uma utilização mais correta, econômica e segura ambientalmente para este resíduo.

Pode-se considerar uma aplicação promissora o uso de cinzas para obtenção de zeólitas sintéticas e seu uso em vários processos alternativos de polimento final de efluentes ou recuperação de metais. Considera-se que as cinzas leves tenham melhores resultados, o que restringe o consumo de grandes volumes para as cinzas pesadas.

Pode-se citar como aplicação com bom potencial de utilização das cinzas pesadas na estabilização de solo para pavimentação com cal; em bases e sub-

bases de pavimentos; em aterros estruturais melhorados com aglomerado e construção de barragens, que podem utilizar as propriedades pozolânicas dos materiais e a sua distribuição granulométrica original, que acaba sendo um facilitador para seu consumo. Na atualidade, a legislação exige para qualquer utilização de cinzas como material de insumo em projetos estruturantes ou utilização de larga escala, prévia permissão e licença ambiental.

Na avaliação dos resultados das análises das cinzas, têm-se indicativos concretos da maior potencialidade de utilização eficaz e econômica destas na indústria da construção civil, contemplando principalmente a indústria cimenteira, de concretos asfálticos, pré-moldados de concreto e concreto celular, tanto das cinzas leves, já utilizada em larga escala, mas principalmente as cinzas pesadas de carvão mineral.

A utilização como aditivo ao Cimento Portland pozolânico é, com certeza, a maior e mais atraente de todas as atividades consumidoras do insumo, largamente conhecida e utilizada para as cinzas volantes e pouco explorada para as cinzas pesadas. Portanto, o grande desafio é justamente conseguir viabilizar/ampliar o uso das cinzas pesadas geradas nos consumidores de carvão.

6 CONCLUSÕES

Determinou-se que os fatores limitantes à utilização em larga escala das cinzas pesadas estão centrados nas questões qualitativas como: tamanho de partícula, distribuição granulométrica, umidade total e concentrações de materiais incombustos.

A umidade total presente nas cinzas pesadas apresenta-se em torno de sua saturação 50%, causador de grandes problemas de manuseio e instabilidade nos processos em que poderia ser utilizada. A umidade pode ser facilmente minimizada por alterações na forma de armazenagem e transporte da cinza pesada, durante a sua geração e/ou processos de secagem simples de baixo custo, oscilando entre 15 a 20 R\$/ton.

As divergências entre as distribuições granulométricas das correntes de cinzas leves e pesadas podem facilmente ser reduzidas por processos de moagem simples de baixo custo, ou peneiramento vigoroso, comprovado pela redução do tamanho de partícula médio ocorrido quando da análise granulométrica úmida, onde de partindo de uma massa 60 a 70% retida na tela de $>0,6$ mm, para uma nova distribuição com mais de 90% da massa passante na mesma tela, após peneiramento.

A avaliação mineralógica identificou que este efeito de desagregação do material é decorrência da característica das partículas das cinzas pesadas, que na realidade são compostos aglomerados fracamente unidos, de tamanho de partícula similar ou igual as das cinzas leves. Resultados estes corroborados pela baixa energia necessária para a moagem das cinzas pesadas, obtida no teste de moabilidade para cálculo do Índice de Trabalho de Bond, 11,90 kwh/t.

Verificou-se a existência de apenas um entrave efetivo para a utilização massiva da corrente das cinzas pesada dentro da indústria cimenteira; a concentração de materiais incombustos.

Devido ao pequeno número de amostras, não se pode afirmar categoricamente, mas a análise individual de material incombusto em cada faixa de tamanho de partícula das amostras aponta uma tendência à concentração do mesmo presente em faixas específicas obtida nos peneiramentos. Quando comparado com avaliação mineralógica que demonstra que, diferentemente dos materiais inorgânicos componentes das cinzas, o material incombusto é compostos

por partículas maciças, que pressupõem podem ser separadas durante o processo de peneiramento ou outro processo de unitário.

Recomenda-se a continuação do estudo sobre a distribuição preferencial dos materiais incombustos nas cinzas pesadas, buscando correlacionar variáveis controladoras do processo preparação e combustão do carvão.

A construção de unidade piloto, capaz de caracterizar e confirmar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do reprocessamento do resíduo torna se inestimável interesse. Projetada a partir de um sistema simples de secagem e peneiramento vigoroso por peneira vibratória, de baixo custo energético, através da redução de tamanho de partícula e segregação da fração de material incombusto presente e assim eliminando as propriedades qualitativas limitantes ao uso das cinzas pesadas, transformando as cinzas pesadas em cinzas leves, com especificações utilizáveis pela indústria cimenteira.

REFERÊNCIAS

- ADRIANO, D. C.; PAGE, A. L.; ELSEEWI, A.A.; CHANG, A. C.; STRAUGHAN, I.. Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: a review. **Journal of Environmental Quality**, v. 9, n. 3, p. 333-344, 1980.
- ANDRADE, A. C. F.. **Tijolos de Cinza Volante e Cal** – Estudo de Desempenho Quanto a Resistência, Absorção, Durabilidade e Aderência. Dissertação de Mestrado- UFRGS, 1991.
- CALARGE, L. M.; SILVA, N. I. W.; CHIES, F.; ZWOSNOK, O. **Desenvolvimento de tijolos maciços a partir de cinzas pesadas e cal hidratada** - Caracterização de cinza pesada. In: FRANKENBERG, C. L. C.; RAYA-RODRIGUES, M. T.; CANTELLI, M. (Org). Gerenciamento de Resíduos Sólidos e Certificação Ambiental. Porto Alegre: EDIPUCRS, v. 1, p.130-139, 2000.
- CHIES, F.; SILVA, N. I. W.; ZWOSNOK, O. **Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão - CIPECAL**. In: ROCHA, J. C.; JOHN, U. M. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Porto Alegre: Coleção Habitare, v. 4, p. 218-239, 2003.
- DEPOI, FERNANDA S.; POZEBON, DIRCE; KALKREUTH, WOLFGANG **Caracterização de Carvões e suas Cinzas Provenientes da Região Sul do Brasil**; Instituto de Química – UFRGS/RS E Instituto de Geociências - UFRGS/RS, Sociedade Brasileira de Química (SBQ), 2010.
- EL-MOGAZI, D.; LISK, D.J.; WEINSTEIN, L. H. **A review of physical, chemical and biological properties of fly ash and effects on agricultural ecosystems**. The Science of the Total Environment, v. 74, p.1-37, 1998.
- FUNGARO, D. A. Aplicação de material zeolítico preparado com cinzas de carvão no tratamento de águas contaminadas. **Revista Meio Filtrante**, ano III, n. 09, p. 12 – 13, Abril/Maio/Junho 2004. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br>>. Acesso em 02 de fev. de 2012.
- FUNGARO, D. A.; SILVA, M. G. Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão como adsorvedor de metais em água. **Química Nova**, v. 25, p.1081 – 1085, 2002.
- GOMES, A. P.; FERREIRA, J. A. F.; ALBUQUERQUE, L. F.; SÜFFERT, T. Carvão Fóssil. **Estudos Avançados**, 12 (33), p. 89-106, 1998.
- HALL, M.; LIVINGSTON, W.R. Fly ash: quality, past, present and future and the effect of ash on the development of novel products. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 77, p. 234-239, 2002.
- HAMLEY, P. **The removal of carbon from fly ash using supercritical water oxidation**. In: International Ash Utilization Symposium, 4, Lexington, Kentucky, USA, 2001, Proceedings, University of Kentucky, p. 216-234, 2001.

JORDAN, DANIELE. Cinzas de Carvão são utilizadas para criação produtos ecológicos no Rio Grande do Sul. In: Blog Meio Ambiente e Saúde. Disponível em: <<http://meioambientesauade.blogspot.com.br/2010/06/cinzas-de-carvao-saoutilizadas-para.html>> (2010). Acesso em 10 de dez. de 2011.

KALKREUTH, W. D.; et al. **Avaliação dos impactos ambientais das cinzas pesadas e leves provenientes da Usina Termelétrica de Figueira, Paraná.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. In: SANTOS, W. Avaliação da Cinza “Pesada” Gerada no Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda Para Uso em Aterros de Trecho da Duplicação da BR 101. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, SC, 2008.

MARTINS, J. L. **Aproveitamento de cinza de carvão mineral na agricultura.** Porto Alegre, Tese de Doutorado, PPGEM/UFRGS, 2001.

MATTIGOD, S. V.; RAI, D.; EARY, L.E.; AINSWORTH, C.C. Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues. Review of the majors elements. Journal of Environmental Quality V 19, p.188-201, 1990.

OZDEMIR, O.; ERSOY, B.; CELIK, M. S. **Separation of pozzolonic materials from lignitic fly ash of Tuncbilek Power Station.** In: International Ash Utilization Symposium, 4, Lexington, Kentucky, USA, 2001, Proceedings, University of Kentucky, p. 216-234, 2001.

PAGE, A. L.; ELSEEWI, A. A.; STRAUGHAN, I. R.; Physical and chemical properties of fly ash from coal-fired power plants with reference to environmental impacts **Residue Rev.**, v. 71, p.83-120, 1990.

QUERALT, X.; QUEROL X.; LÓPEZ, S.; PLANA, F. **Use of coal fly ash for ceramics:** a case study for a large Spanish power station. **Fuel**, v. 76, p. 787-791, 1997.

QUEROL, X.; PLANA, F.; ALASTUEY, A.; LÓPEZ-SOLER, A. Synthesis of Na-zeolite from fly ash. **Fuel**, v. 76, p. 793-799, 1997.

RAYSMAN, V. L. Technology for chemical-metallurgical coal ash utilization. **Energy and Fuels**, v. 11, p. 761-773, 1997.

REYNOLDS, R. **The manufacture and evaluation of an artificial soil (Slash) as influenced by soil texture, acidity and fertility.** In: International Ash Utilization Symposium, 3, Lexington, Kentucky, USA, 1999, Proceedings, University of Kentucky, p. 378-385, 1999.

ROHDE, G. M.; ZWONOK, O.; CHIES, O.; DA SILVA, N. L. W. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil:** Aspectos Técnicos e Ambientais. Porto Alegre: CIENTEC, v. 1, 202 p., 2006.

RYU, T. G.; RYU, J. C.; CHOI, C. H.; KIM, C. G.; YOO, S. J.; YANG, H. S.; KIM, Y. H. Preparation of Na-P1 Zeolite with High Cation Exchange Capacity from Coal Fly Ash. **Journal of Industrial Engineering Chemistry**, v. 12, p. 401-407, 2006.

SILVA, N. I. W.; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMAN, J. E.; ZWONOK, O. **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico**. Cerâmica, v. 45, p. 184-187, 1999.

SANTOS, W. **Avaliação da Cinza Pesada Gerada no Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda para uso em aterros de trecho da duplicação da Br 101**. – Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação Eng. Civil. Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, SC, 2008.

STAMM, R. H. **Método de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) em Projetos de Grande Porte**: Estudo de Caso de uma Usina Termelétrica. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEPP, Florianópolis, SC, 2003.

TISHMACK, J. K. **Use of coal combustion by-products to reduce soil erosion**. In: International Ash Utilization Symposium, 4, Lexington, Kentucky, USA, 2001, Proceedings, University of Kentucky, p. 216-234, 2001.

TSUCHIAI, H. High active absorbent for SO₂ removal prepared from coal ash. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 34, p. 1404-1411, 1995.

VASSILEV, S.V.; MENENDEZ, R.; ALVAREZ, D.; BORREGO, A.G. **Multicomponent utilization of fly ash: dream or reality**. In: International Ash Utilization Symposium, 4, Lexington, Kentucky, USA, 2001, Proceedings, University of Kentucky, p. 216-234, 2001.

VILCHES, L. F. **Development of new fire-proof products made from coal fly ash: the Cefyr Project**. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 77, p. 361-366, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8629**: Carvão Mineral: Análise Granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise Granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8295**: Carvão Mineral - Determinação do enxofre total pelo processo de combustão (Hidróxido de Sódio): Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8292**: Preparação de amostra de carvão mineral para análise e ensaios: Procedimento. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8290**: Carvão Mineral: Determinação do teor de matérias voláteis: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8293**: Carvão Mineral: Determinação de umidade: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

APÊNDICE 1 – Portfólio de Carvão COPELMI

Característica/ Carvão Tipo	CE3100		CE4700		CE5200	
	Minimo	Maximo	Minimo	Maximo	Minimo	Maximo
Poder Calorífico Superior (kcal/kg) base seca	3000	3200	4600	4800	5100	5300
Umidade Total (%)	20	30	20	30	20	30
Análise Elementar (% em base seca)						
Carbono	32	33	49	51	53	55
Hidrogênio	2	3	3	4	3	4
Nitrogênio	0,4	0,7	0,5	1,2	0,5	1,2
Oxigênio + halogênios	8	10	8	10	8	10
Análise Imediata (%)						
Cinzas base seca	53,5	55,5	34	36	29	31
Matéria Volátil base seca	19,5	20,5	28,0	29,5	28	32
Carbono Fixo base seca	24,0	26,0	34	37	38	41
Enxofre Total base seca	0,9	1,5	0,7	1,5	0,7	1,5
Análise Química das Cinzas (%)						
SiO ₂	59	64	59	64	59	64
Al ₂ O ₃	24	29	24	29	24	29
Fe ₂ O ₃	3	6	3	6	3	6
K ₂ O	1,2	2,5	1,1	2,5	1,2	2,5
NaO	0,1	0,8	0,1	0,8	0,1	0,8
TiO	0,5	2,0	0,5	2,0	0,5	2,0
CaO	0,7	4,0	0,5	4	0,7	4,0
MgO	0,4	1,5	0,4	1,5	0,4	1,5
Fusibilidade das Cinzas(° C)						
Amolecimento	1400	1550	1400	1550	1400	1550
Hemisféra	1420	1600	1420	1600	1420	1600
Fluidez	1450	1650	1450	1650	1450	1650
Moabilidade - HGI	60	75	60	90	60	90
Granulometria (%)						
> 50,00	0,0	1,0	0	1	0	1
50,00 - 37,50	15,0	34,0	15	34	15	34
37,50 - 25,40	10,0	22,5	10	22,5	10	22,5
25,40 - 12,70	9,0	16,0	9	16	9	16
12,70 - 3,35	7,5	15,0	7,5	15	7,5	15
3,335 - 1,00	3,5	4,5	3,5	4,5	3,5	4,5
1,00 - 0,60	2,0	3,0	2	3	2	3
< 0,60	3,0	4,0	3	4	3	4

APÊNDICE 2 – Análise de Classificação de Resíduos

LAUDO DE CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO Nº RS/180248

1- IDENTIFICAÇÃO DO SOLICITANTE**Razão Social:** **COPELMI MINERAÇÃO LTDA****Endereço:** BR-290 - km 178 - Butiá - RS**2- DADOS DO RESÍDUO****Identificação do resíduo:** ***RESÍDUO TRATEBEL – CINZAS PESADAS*****Gerador do resíduo:** **TRATEBEL****Endereço do gerador:** Charqueadas – RS**Ramo de atividade:** Geração de energia**Local de Coleta:** *Bacia de cinzas pesadas***Forma de estocagem:** Tanques de sedimentação**Descrição do resíduo:** Cinzas da combustão de carvão mineral**Descrição do processo de geração:** *Cinzas geradas na combustão de carvão mineral pulverizado em fornalha de leito fixo***3- DADOS DE COLETA****Responsável Técnico:** A amostra foi coletada pelo interessado, não tendo sido fornecidos dados a respeito do responsável pelos procedimentos de coleta da amostra.**Endereço da coleta:** Charqueadas – RS**Data de recebimento:** 30/01/2011**Data de coleta:** 30/01/2011**4- CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A sistemática de classificação de resíduos sólidos está descrita na NBR 10.004 - RESÍDUOS SÓLIDOS – CLASSIFICAÇÃO, que em sua segunda edição data de 31/05/2004.

Antes disto, em dezembro de 1995, a FEPAM emitiu orientações a respeito da sistemática de elaboração do laudo de classificação e fixou, principalmente, um fluxograma a ser seguido. Mais recentemente foram estabelecidas as “Diretrizes para a Elaboração de Laudo Técnico de Classificação de Resíduos Sólidos Industriais”.

Foi com base na NBR 10.004 e nas orientações da FEPAM, que este laudo técnico foi elaborado.

Estes dois documentos ressaltam a importância de serem conhecidas informações a respeito dos processos industriais e de geração do resíduo, das matérias primas e insumos utilizados e, ainda, a necessidade de que a coleta da amostra obedeça aos procedimentos contidos na NBR 10.007 - AMOSTRAGEM DE RESÍDUOS.

No presente caso, a amostra foi coletada pela empresa requisitante dos serviços. Um questionário com informações acerca do processo de geração do resíduo encontra-se anexado ao final deste trabalho.

A sistemática de classificação de um resíduo de origem conhecida, como é o caso, consiste em inicialmente em verificar se ele aparece listado nos anexos “A” ou “B”, da NBR 1004, quando seria imediatamente considerado perigoso (classe I). Não estando listado, é verificada uma série de características que conferem periculosidade. Se qualquer destas características for observada ele é imediatamente considerado perigoso (classe I). Se o resíduo não for perigoso, é então classificado de resíduo não perigoso (classe II) e o ensaio de solubilização é executado para diferenciação entre resíduo não inerte (classe II A) e resíduo inerte (classe II B)

Passamos a seguir a analisar estas possibilidades com base nas informações recebidas e nos ensaios realizados.

5- ESTUDO DE PERICULOSIDADE DO RESÍDUO

Um resíduo será considerado *perigoso* quando, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, apresentar:

- a) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

5.1. Origem do resíduo

Em uma análise detalhada das listagens dos resíduos reconhecidamente perigosos de fontes não específicas (anexo A) ou de fontes específicas (anexo B) não se encontra qualquer referência a cinzas de caldeiras, qualquer que seja o combustível ou processo de queima e, portanto, não é possível caracterizar este tipo de resíduo como *perigoso* exclusivamente por sua origem ou processo de geração.

5.2. Inflamabilidade

Segundo a NBR 10.004, um resíduo sólido é caracterizado como *inflamável*, se uma amostra representativa dele, obtida conforme a NBR 10.007, apresentar qualquer uma das seguintes propriedades:

- a) ser líquido e ter ponto de fulgor inferior a 60°C,

- b) não ser líquido e ser capaz de, sob condições de temperatura e pressão de 25°C e 0,1 MPa, produzir fogo por fricção, absorção de umidade ou por alterações químicas espontâneas e, quando inflamada, queimar vigorosa e persistentemente, dificultando a extinção do fogo;
- c) ser um oxidante definido como substância que pode liberar oxigênio e, como resultado, estimular a combustão e aumentar a intensidade do fogo em outro material;
- d) ser um gás comprimido inflamável, conforme a Legislação Federal sobre transporte de produtos perigosos.

Como já mencionado, a amostra é sólida e por ser resultante de um processo de queima em caldeira, não apresenta nenhuma destas características e não pode ser caracterizado como *inflamável*.

5.3. Corrosividade

Segundo a NBR 10.004, um resíduo é caracterizado como *corrosivo* quando uma amostra representativa apresentar uma das seguintes propriedades:

- a) ser aquosa e apresentar pH inferior ou igual a 2, ou superior ou igual a 12,5, ou sua mistura com água, na proporção de 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5;
- b) ser líquida ou, quando misturada em peso equivalente de água, produzir um líquido e corroer o aço (COPANT 1020) a uma razão maior que 6,35 mm ao ano, a uma temperatura de 55°C, de acordo com a USEPA SW 846 ou equivalente.

As características do resíduo não permitem considerá-lo como *corrosivo*. A amostra é sólida e, em solução a 1:1 em água a amostra apresenta pH 10,4 (Tabela 1), o que se encontra dentro dos limites estabelecidos acima. O pH não muito alcalino da solução 1:1, associado ao baixo teor de cloretos da amostra (ver Tabela 3 – Ensaio de Solubilização) indicam que o líquido não apresenta nenhuma possibilidade de corroer o aço na razão mencionada.

5.4. Reatividade

Segundo a NBR 10.004, um resíduo é caracterizado como *reativo* se uma amostra representativa dele, obtida segundo a NBR 10.007, apresentar uma das seguintes propriedades:

- a) ser normalmente instável e reagir de forma violenta e imediata, sem detonar;
- b) reagir violentamente com a água;
- c) formar misturas potencialmente explosivas com a água;
- d) gerar gases, vapores e fumos tóxicos em quantidades suficientes para provocar danos à saúde pública ou ao meio ambiente, quando misturados com a água;
- e) possuir em sua constituição os íons CN^- ou S^{2-} em concentrações que ultrapassem os limites de 250 mg de HCN liberável por quilograma de resíduo ou 500 mg de H_2S

liberável por quilograma de resíduo, de acordo com ensaios estabelecidos no USEPA SW 846;

f) ser capaz de produzir reação explosiva ou detonante sob ação de forte estímulo, ação catalítica ou temperatura em ambientes confinados;

g) ser capaz de produzir, prontamente, reação ou decomposição detonante ou explosiva a 25°C e 0,1 MPa;

h) ser explosivo, definido como uma substância fabricada para produzir um resultado prático, através de explosão ou efeito pirotécnico, esteja ou não esta substância contida em dispositivo preparado para este fim.

Foram realizados ensaios referentes aos itens “a”, “b”, “c” e “d”, não tendo sido observado comportamento *reativo*.

Os itens “e”, “f”, “g” e “h” foram descartados em função das características do resíduo e seu processo de geração.

Uma análise da composição da amostra foi realizada e os resultados obtidos são apresentados na tabela 1.

O resíduo apresenta-se *estável*, não ocorrendo liberação de gases, vapores ou fumos tóxicos em quantidades suficientes para por em risco a saúde humana ou o meio ambiente. Sendo assim, podemos dizer que, o resíduo não apresenta periculosidade sob o ponto de vista da *reatividade*.

Tabela 1 - Composição do resíduo

Certificado de Ensaio nº 180248/11		
Determinação	Unidades	Resultado
Densidade	g/ml	0,721
pH (Solução a 50%)	x-x-x-x	10,4
Cianetos	mg/kg CN ⁻	N.D.
Sulfetos	mg/kg H ₂ S	364
Umidade a 105°C	% H ₂ O	10,07
Cinzas	%	87,02

Os resultados estão expressos em base seca, com exceção da umidade e do pH.

5.5. Toxicidade

Um resíduo será caracterizado como *tóxico* se apresentar uma ou mais das seguintes características:

a) quando o extrato obtido desta amostra, segundo a NBR 10.005 - Lixiviação de Resíduos, contiver qualquer um dos contaminantes em concentrações superiores aos valores constantes no anexo F;

- b) possuir uma ou mais substâncias constantes no anexo C e apresentar toxicidade;
- c) ser constituída por restos de embalagens contaminadas com substância constantes nos anexos D ou E;
- d) resultar de derramamentos ou de produtos fora de especificação ou do prazo de validade que contenham quaisquer substâncias constantes nos anexos D ou E;
- e) ser comprovadamente letal ao homem;
- f) possuir substância em concentração comprovadamente letal ao homem ou estudos do resíduo que demonstrem, uma DL_{50} oral para ratos menor que 50 mg/Kg ou CL_{50} inalação para ratos menor que 2 mg/l ou uma DL_{50} dérmica para coelhos menor que 200 mg/Kg;

Os resultados obtidos na análise do extrato do ensaio de lixiviação são apresentados na tabela 2, e já comparados com os valores máximos permitidos. Os dados do referido ensaio são os seguintes: Teor de sólidos secos: 89,03%; Solução de extração: N° 1; Tempo total de lixiviação: 18 h; pH do extrato lixiviado: 5,9; Volume filtrado: 990 ml

Tabela 2 – Ensaio de Lixiviação

Certificado de Ensaio nº 180249/11			
Determinação	Unidades	Resultado	Máximo segundo NBR 10.004
Fluoretos	mg/l F ⁻	0,66	150,0
Arsênio	mg/l As	0,012	1,0
Bário	mg/l Ba	0,645	70,0
Chumbo	mg/l Pb	0,199	1,0
Cromo	mg/l Cr	N.D.	5,0
Cádmio	mg/l Cd	N.D.	0,5
Mercúrio	mg/l Hg	N.D.	0,1
Prata	mg/l Ag	0,021	5,0
Selênio	mg/l Se	0,011	1,0

N.D. = Não detectado.

Como pode ser observado na Tabela 2, nenhum dos parâmetros analisados se encontra acima dos valores máximos permitidos. Não foram analisados os compostos voláteis visto que a geração do resíduo inviabiliza completamente a presença destes.

Neste caso, podemos dizer que o material em estudo não apresenta características que o tornem perigoso por toxicidade, quando submetido ao ensaio de lixiviação.

As informações conhecidas permitem excluir também as demais características que poderiam conferir toxicidade à amostra.

5.6. Patogenicidade

Um resíduo é caracterizado como patogênico, segundo a NBR 10.004, se uma amostra representativa dele, obtida conforme a NBR 10.007, “contiver ou se houver suspeita de conter microorganismos patogênicos, proteínas virais, ácido desoxirribonucléico (ADN) ou ácido ribonucléico (ARN) recombinantes, organismos geneticamente modificados, plasmídeos, cloroplastos, mitocôndrias ou toxinas capazes de produzir doenças em homens, animais ou vegetais”.

Os resíduos de serviços de saúde deverão ser classificados conforme ABNT NBR 12.808 e os resíduos gerados nas estações de tratamento de esgoto doméstico e os resíduos sólidos domiciliares, excetuando-se os originados na assistência à saúde das pessoas ou animal, não serão classificados segundo os critérios de patogenicidade.

O resíduo em estudo não apresenta características que possam indicar uma eventual contaminação por microorganismos patogênicos semelhantes aos anteriormente citados. Consideramos, então, que de acordo com a NBR 10.004 o resíduo não deva ser considerado como *patogênico*.

5.7. Conclusão parcial

Baseado nas considerações até aqui expostas, é possível concluir que o resíduo não apresenta qualquer característica que o classifique como resíduo perigoso e, portanto, sua classificação é de RESÍDUO NÃO PERIGOSO – CLASSE II.

6- ESTUDO DE CLASSIFICAÇÃO COMO RESÍDUO CLASSE II B - INERTE

Entendem-se como *inertes* aqueles resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10.007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, conforme NBR 10.006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G.

As informações obtidas até aqui não permitem excluir a possibilidade do resíduo ser considerado inerte. Assim sendo, o mesmo foi submetido ao ensaio de solubilização.

Na Tabela 3 aparecem os resultados obtidos neste ensaio, já comparados com os padrões listado no Anexo G. São apresentados em negrito os parâmetros que apresentaram resultados superiores a estes padrões.

Dados do ensaio de solubilização: Umidade: 10,07 % - pH do extrato de solubilizado: 9,4

Tabela 3 - Ensaio de Solubilização – Parte I

Certificado de Ensaio nº 180250/11			
Determinação	Unidades	Resultado	Máximo segundo NBR 10.004
Fenóis	mg/l C ₆ H ₅ OH	N.D.	0,01
Surfactantes	mg/l ABS	0,03	0,5
Cianetos	mg/l CN ⁻	N.D.	0,07
Cloretos	mg/l Cl ⁻	2,81	250,0
Fluoretos	mg/l F ⁻	1,31	1,5
Sulfatos	mg/l SO ₄ ⁻²	496	250
Nitratos	mg/l NO ₃ ⁻	0,2	10,0
Alumínio	mg/l Al	1,1	0,2
Arsênio	mg/l As	N.D.	0,01
Bário	mg/l Ba	0,060	0,7
Chumbo	mg/l Pb	N.D.	0,01
Determinação	Unidades	Resultado	Máximo segundo NBR 10.004
Cobre	mg/l Cu	N.D.	2,0
Cromo	mg/l Cr	N.D.	0,05
Cádmio	mg/l Cd	N.D.	0,005
Ferro	mg/l Fe	0,075	0,3
Manganês	mg/l Mn	0,012	0,1
Mercúrio	mg/l Hg	N.D.	0,001
Prata	mg/l Ag	N.D.	0,05
Selênio	mg/l Se	N.D.	0,01
Sódio	mg/l Na	20,0	200,0
Zinco	mg/l Zn	0,030	5,0

N.D. = Não Detectado.

Como pode ser observado na Tabela 3, as concentrações de sulfatos e alumínio encontram-se acima dos limites máximos aceitáveis pela NBR 10.004 e, portanto, o resíduo efetivamente, não pode ser classificado como “inerte”.

7- CONCLUSÃO

Considerando que o “RESÍDUO TRACTEBEL – CINZAS PESADAS”:

- ☐ Não apresenta periculosidade por origem;
- ☐ Não é inflamável;
- ☐ Não é corrosivo;
- ☐ Não apresenta características de reatividade;
- ☐ Não apresenta características de toxicidade, quando submetido ao ensaio de lixiviação;
- ☐ Não é constituído de restos de embalagens contaminadas e não é produto fora de especificação ou resíduo de derramamento;
- ☐ Não pode ser considerado como “patogênico”;
- ☐ Apresenta, no extrato do ensaio de solubilização, os parâmetros sulfatos e alumínio acima dos limites estabelecidos para resíduo inerte;

Concluimos que o mesmo deve ser classificado como RESÍDUO CLASSE II A – NÃO INERTE.

Segundo SIGECORS - Sistema de Gerenciamento e Controle de Resíduos Sólidos Industriais da FEPAM, as cinzas de caldeiras recebem o *Código de Identificação A 111*.

8- ANEXOS

Estão anexados a este trabalho, e dele fazem parte os seguintes documentos:

- ☐ Questionário de informações do resíduo;
- ☐ Certificado de ensaio nº 180248/10 - Composição do Resíduo;
- ☐ Certificado de ensaio nº 180249/10 - Extrato de Lixiviação;
- ☐ Certificado de ensaio nº 180250/10 - Extrato de Solubilização.

9- NOTA

Os resultados contidos neste relatório têm significação restrita e se aplicam somente à amostra ensaiada. O mesmo só poderá ser reproduzido na íntegra com a autorização da *Laborquímica*.

Canoas, 28 de fevereiro de 2010.

Flávia Terezinha Bignetti

Químico – CRQ-V 05200128

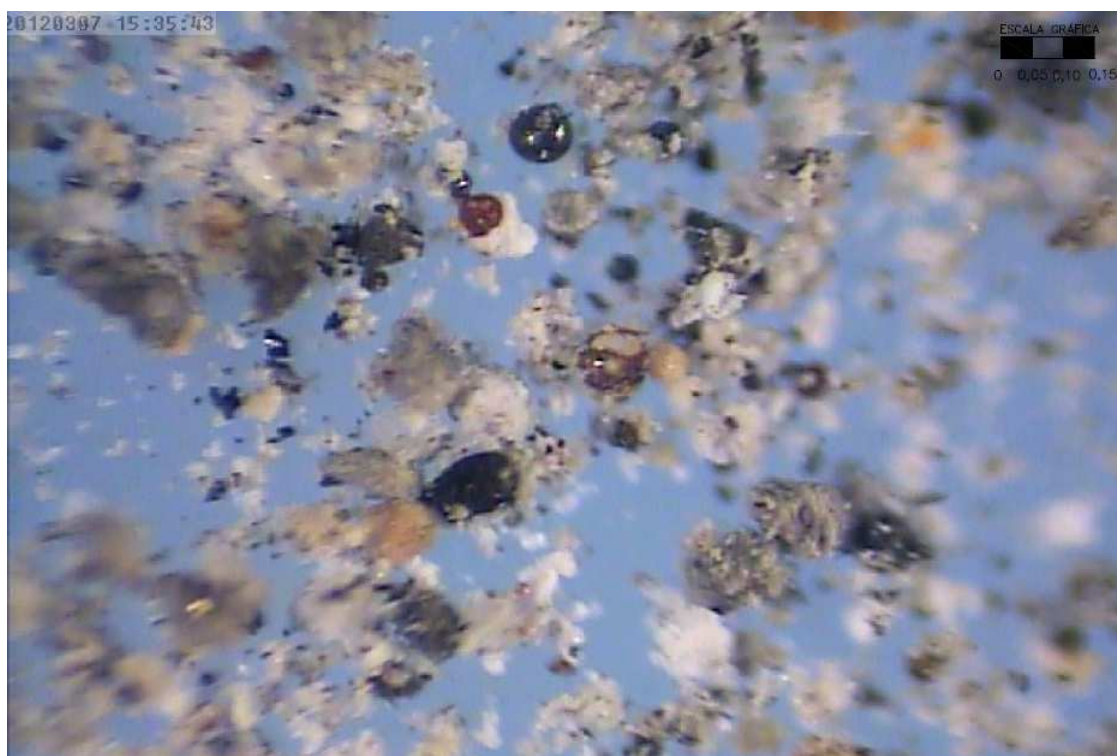
José Carlos Bignetti

Eng. Químico – CRQ-V 05300675

APÊNDICE 03 – Análise Mineralógica

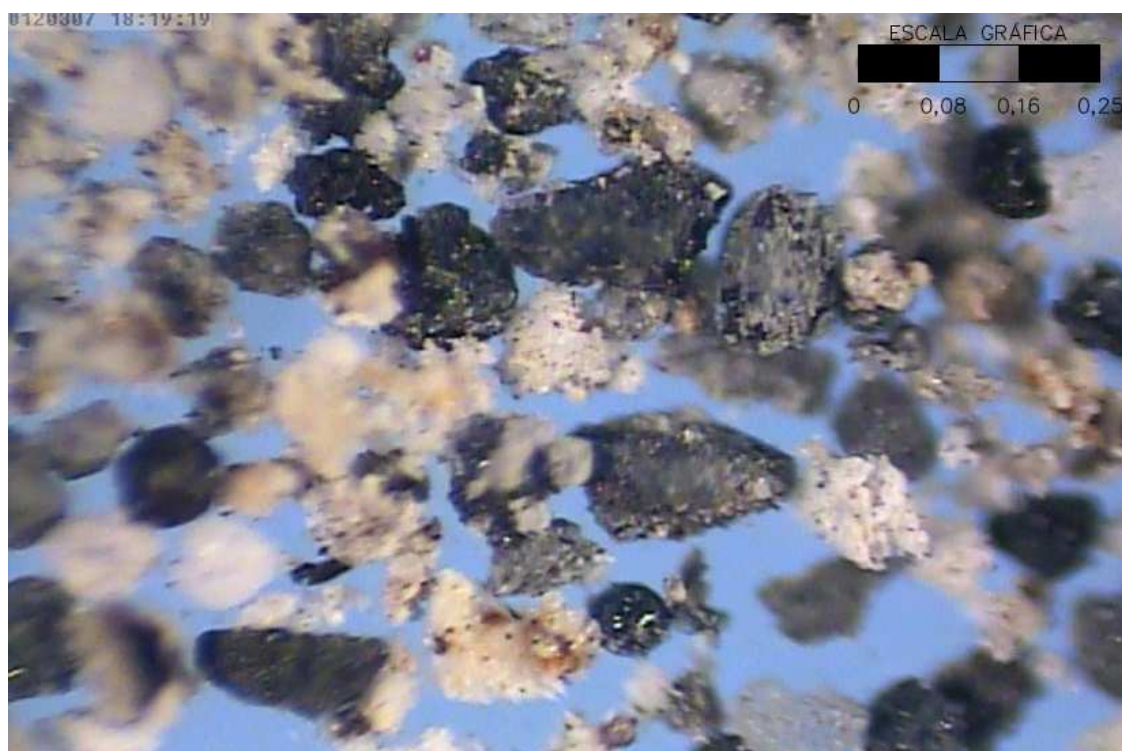
ANÁLISE MACROSCÓPICA DE FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL

Descrição da fração: TRAC-PES AM4 <0,15 mm



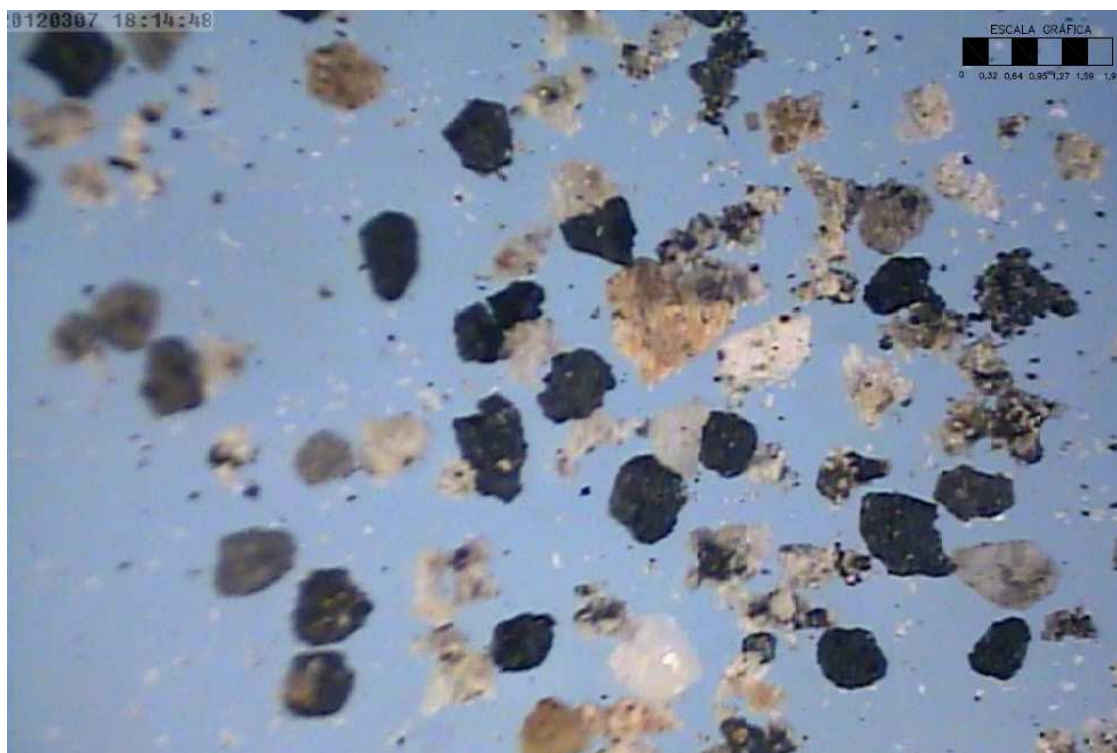
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	14,50	6,96	10,5	10,65
SÍLICA	60,50	50,87	52,26	54,54
QUARTZO	3,50	4,78	4,26	4,18
ARGILOMINERAL	20,00	30,43	30,15	26,86
PIRITA	1,50	6,96	2,83	3,76

Descrição da fração: TRAC-PES AM4 0,15 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	17,59	13,43	14,88	15,30
SÍLICA	31,48	32,84	32,78	32,37
QUARTZO	3,70	5,96	6,00	5,22
ARGILOMINERAL	43,52	41,77	40,15	41,81
PIRITA	3,71	6,00	6,19	5,30

Descrição da fração: TRAC-PES AM4 0,25 mm



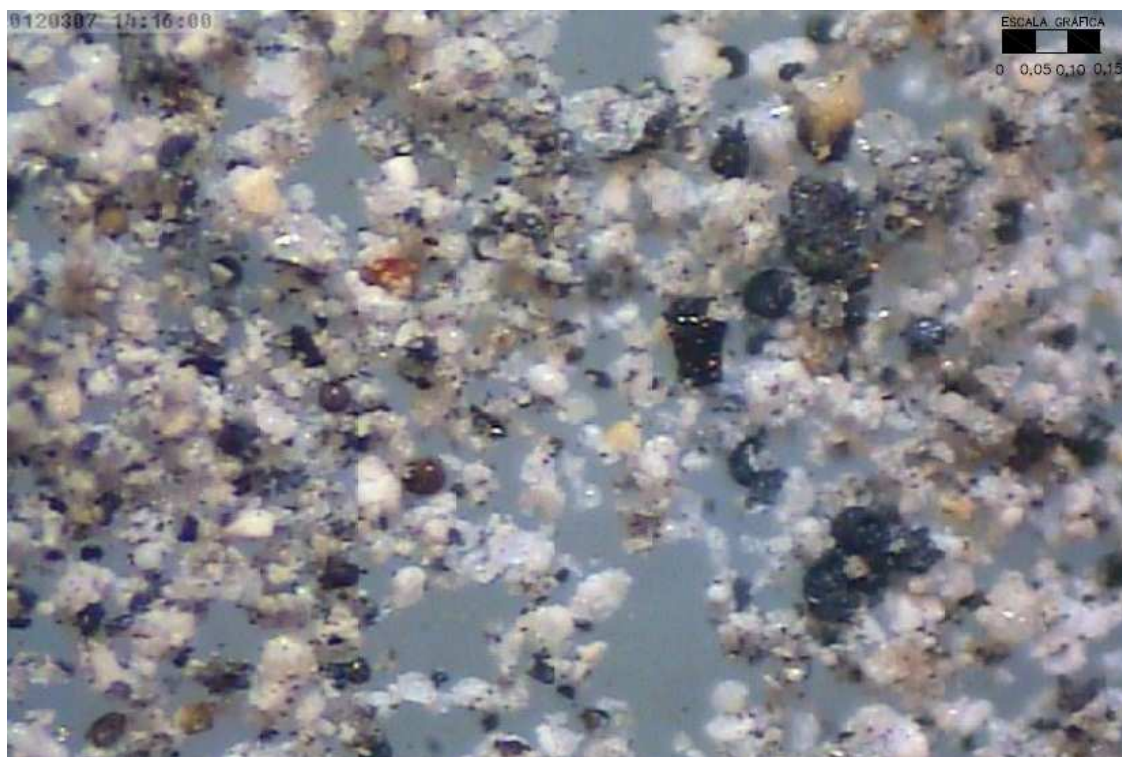
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	30,51	20,73	28,56	26,60
SÍLICA	42,37	41,46	40,21	41,35
QUARTZO	5,08	6,10	6,78	5,99
ARGILOMINERAL	20,34	30,49	22,50	24,44
PIRITA	1,70	1,22	1,95	1,62

Descrição da fração: TRAC-PES AM4 0,95 mm



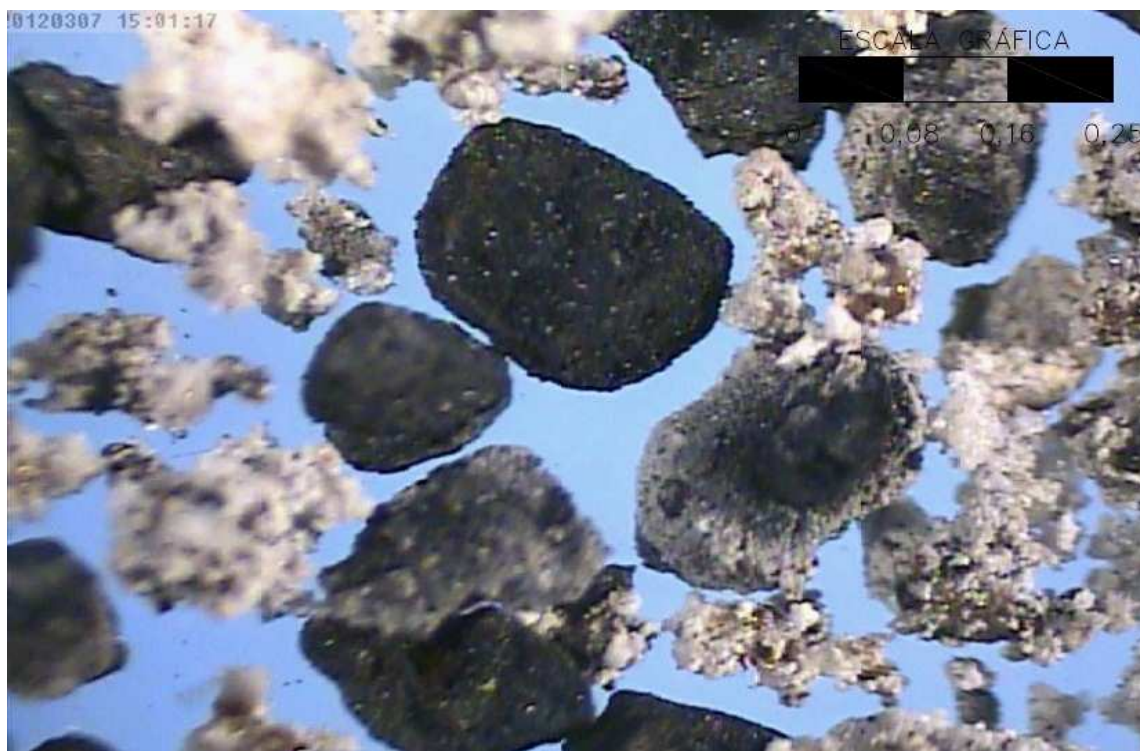
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	3,67	5,25	5,12	4,68
SÍLICA	51,33	58,00	48,50	52,61
QUARTZO	3,33	2,00	2,78	2,70
ARGILOMINERAL	33,33	31,25	36,58	33,72
PIRITA	8,34	3,50	7,02	6,29

Descrição da fração: CMPC-PES AM4 <0,15 mm



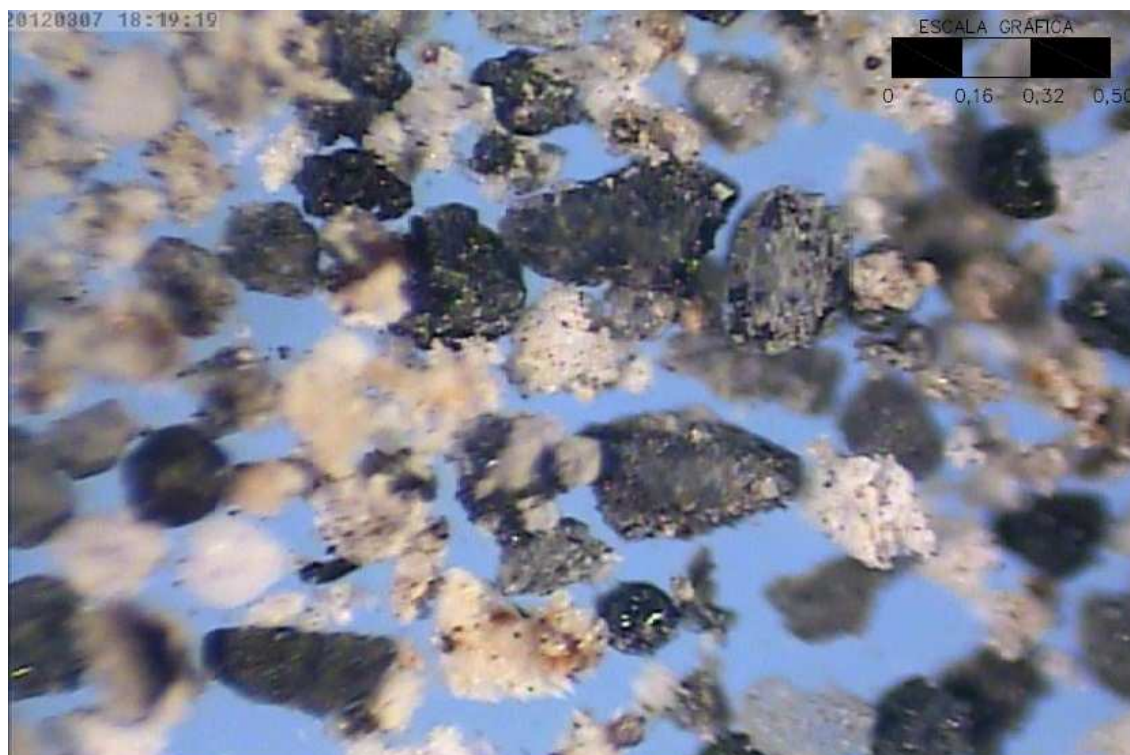
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	7,00	7,50	6,80	7,1
SÍLICA	83,20	74,25	79,25	78,90
QUARTZO	1,00	2,00	1,05	1,35
ARGILOMINERAL	8,00	15,00	11,10	11,37
PIRITA	0,80	1,25	1,80	12,83

Descrição da fração: CMPC-PES AM4 0,15 mm



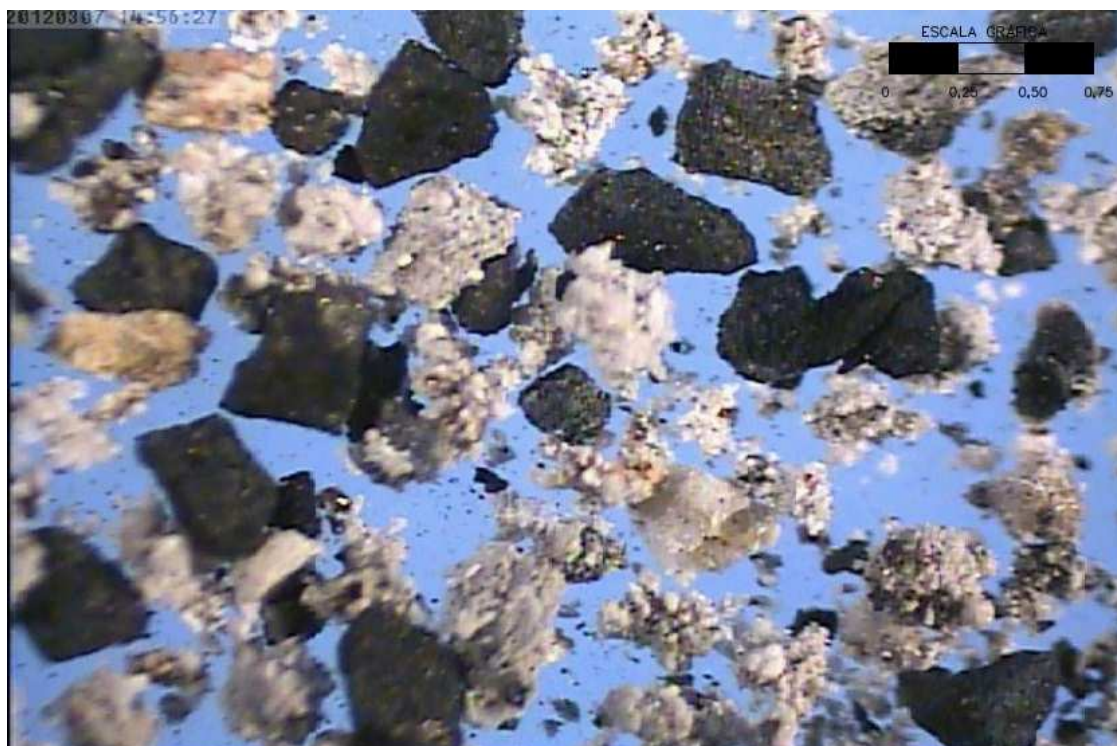
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	17,20	7,35	8,98	11,18
SÍLICA	58,06	58,82	56,82	57,90
QUARTZO	5,38	1,47	3,96	3,60
ARGILOMINERAL	16,13	27,94	27,12	23,73
PIRITA	3,23	4,42	3,12	3,59

Descrição da fração: CMPC-PES AM4 0,25 mm



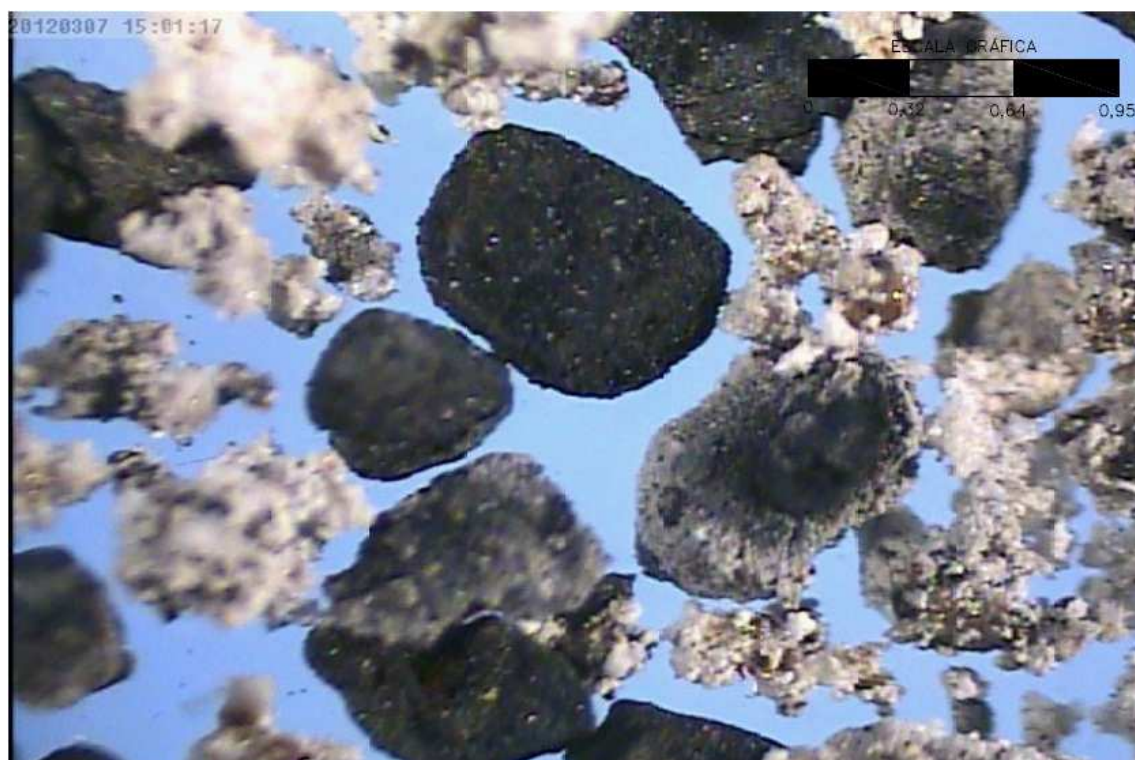
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	21,67	28,50	23,42	24,53
SÍLICA	16,67	12,50	14,25	14,47
QUARTZO	0,00	0,00	0,05	0,02
ARGILOMINERAL	55,56	54,50	57,30	55,79
PIRITA	6,10	4,50	4,98	5,19

Descrição da fração: CMPC-PES AM4 0,50 mm



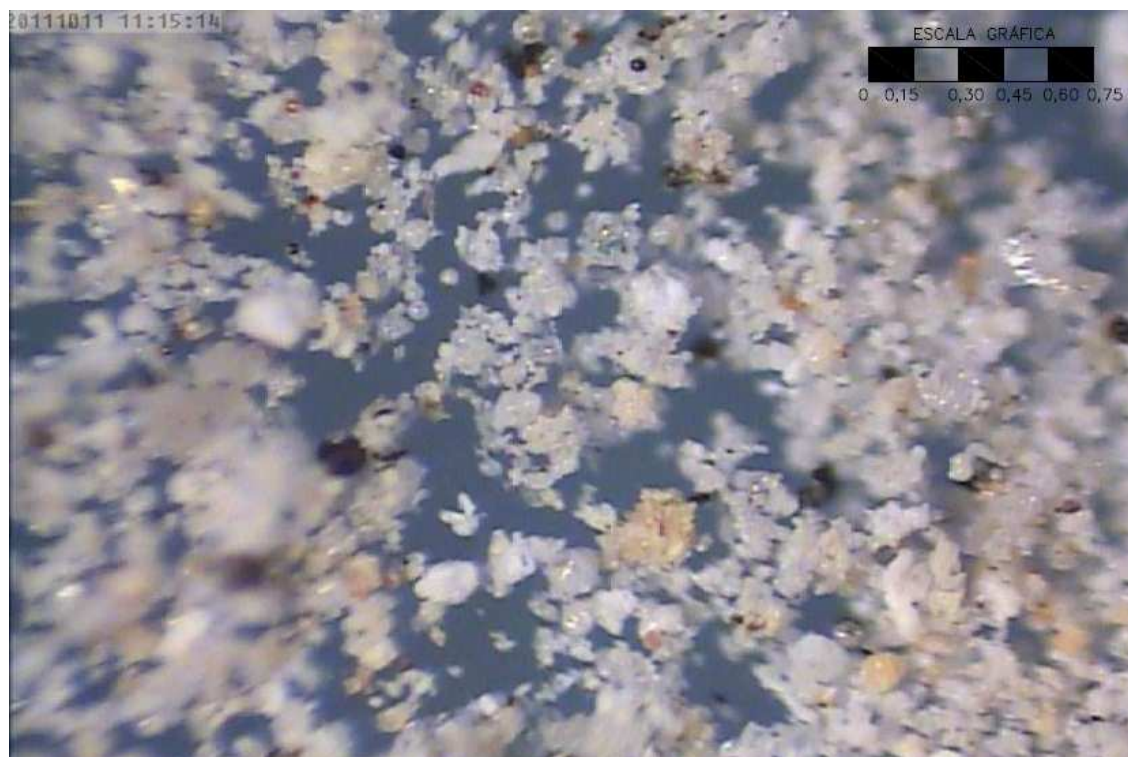
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	24,72	27,12	26,18	26,01
SÍLICA	13,48	18,64	13,21	15,11
QUARTZO	0,00	3,38	0,00	1,13
ARGILOMINERAL	57,30	47,46	57,32	54,03
PIRITA	4,50	3,40	3,29	3,73

Descrição da fração: CMPC-PES AM4 0,75 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	19,51	18,92	19,26	19,23
SÍLICA	14,63	21,62	20,28	18,84
QUARTZO	0,00	0,00	0,00	0,00
ARGILOMINERAL	63,41	56,76	57,86	59,34
PIRITA	2,45	2,7	2,6	2,58

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 <0,15 mm



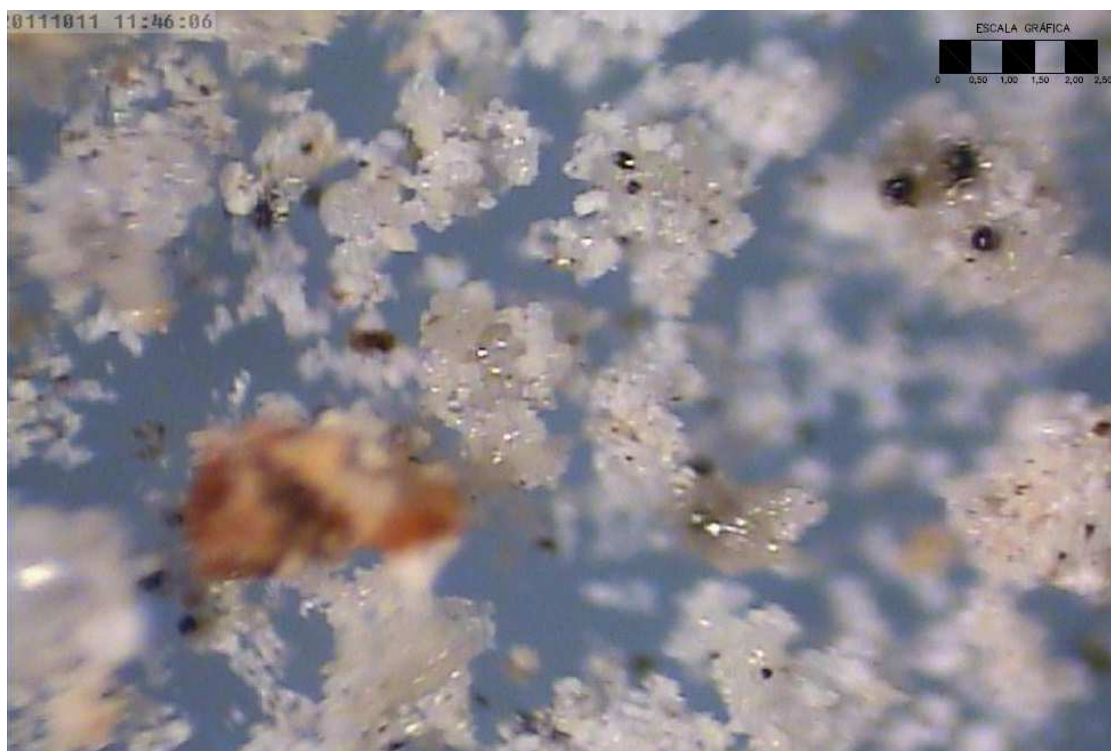
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	2,00	2,71	2,66	2,46
SÍLICA	94,13	93,18	91,28	92,86
QUARTZO	0,13	0,2	1,02	0,45
ARGILOMINERAL	0,38	0,91	0,89	0,73
PIRITA	3,36	3,0	4,15	3,50

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 0,15 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	4,17	2,86	3,25	3,43
SÍLICA	91,67	85,71	87,54	88,31
QUARTZO	0,42	1,43	1,42	1,09
ARGILOMINERAL	0,42	7,14	4,48	4,01
PIRITA	3,32	2,86	3,31	3,16

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 0,25 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	1,43	2,33	2,32	2,03
SÍLICA	87,15	83,72	83,73	84,87
QUARTZO	1,43	2,33	1,43	1,73
ARGILOMINERAL	5,71	9,30	8,93	7,98
PIRITA	4,28	2,32	3,59	3,40

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 0,50 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	2,00	2,86	2,25	2,37
SÍLICA	92,66	88,57	90,54	90,59
QUARTZO	0,67	1,90	0,59	1,05
ARGILOMINERAL	4,00	5,71	6,00	5,23
PIRITA	0,67	0,96	0,62	0,75

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 0,59 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	3,57	0,77	2,21	2,18
SÍLICA	85,71	92,31	88,01	88,68
QUARTZO	1,79	0,77	2,75	1,77
ARGILOMINERAL	5,36	4,62	4,68	4,89
PIRITA	3,57	1,53	2,35	2,48

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 0,75 mm



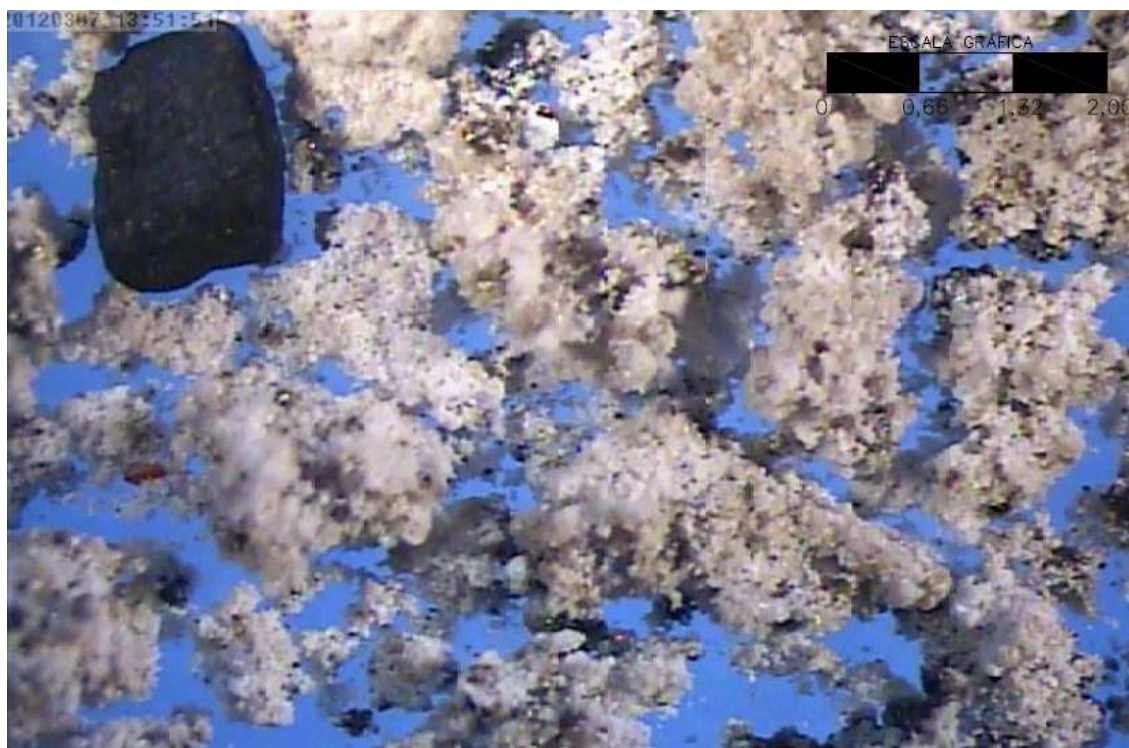
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	0,83	0,87	0,68	0,79
SÍLICA	94,18	93,91	94,28	94,12
QUARTZO	0,83	0,87	0,98	0,89
ARGILOMINERAL	3,33	3,48	3,05	3,29
PIRITA	0,83	0,87	1,01	0,90

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 1,20 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	5,00	3,13	3,75	3,96
SÍLICA	90,00	78,13	88,00	85,38
QUARTZO	0,00	3,13	0,00	1,04
ARGILOMINERAL	5,00	12,5	6,21	7,90
PIRITA	0,00	3,13	2,04	1,72

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 1,68 mm



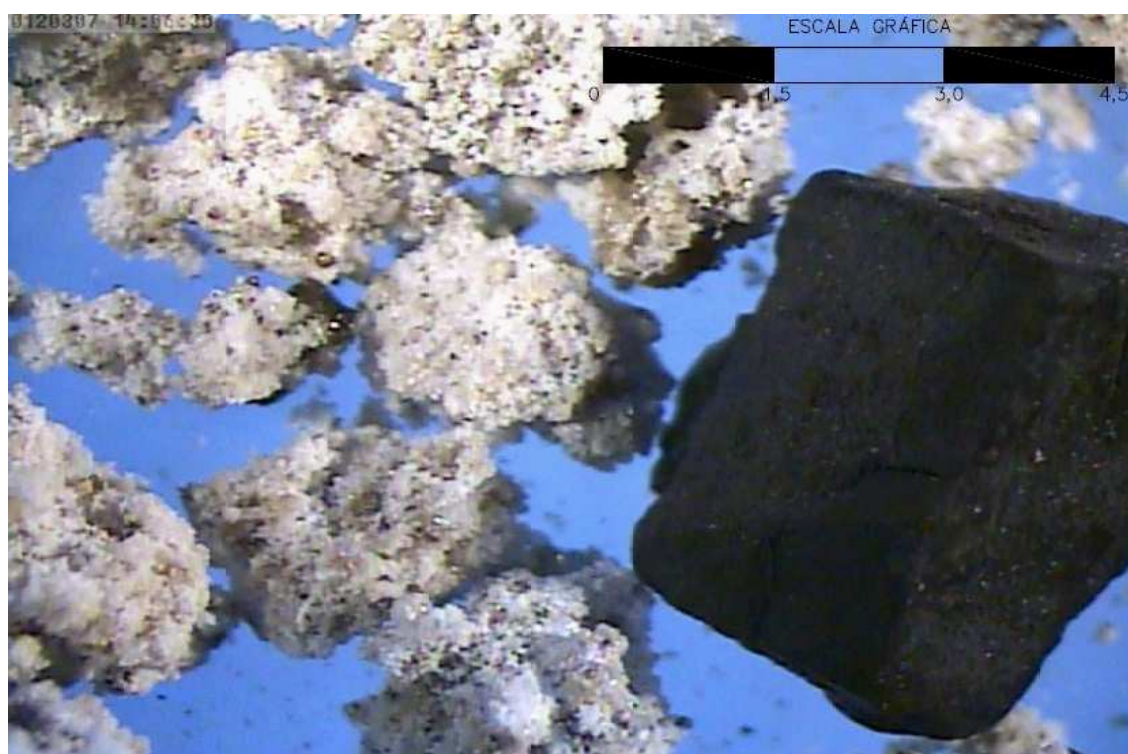
COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	4,35	2,63	4,12	3,70
SÍLICA	47,83	52,63	49,25	49,90
QUARTZO	0,00	0,00	0,00	0,00
ARGILOMINERAL	43,48	42,10	43,01	42,86
PIRITA	4,34	2,64	3,62	3,53

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 2,0 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	0,00	0,00	0,00	0,00
SÍLICA	71,43	75,00	60,24	68,89
QUARTZO	0,00	0,00	0,00	0,00
ARGILOMINERAL	22,86	20,00	24,05	22,30
PIRITA	5,71	5,00	15,71	8,81

Descrição da fração: BRAS-PES AM4 3,5 mm



COMPOSIÇÃO	AM 1 (%)	AM 2 (%)	AM 3 (%)	MÉDIA (%)
CARVÃO	6,67	0,00	0,00	2,22
SÍLICA	33,33	12,00	19,00	21,44
QUARTZO	0,00	0,00	0,00	0,00
ARGILOMINERAL	52,33	84,00	72,18	69,50
PIRITA	12,33	4,00	8,82	8,38