

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE UM
MÓDULO DE REJEITOS DE CARVÃO NA REGIÃO CARBONÍFERA DE SANTA
CATARINA**

JUAREZ RAMOS DO AMARAL FILHO

Dissertação para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Agosto de 2009.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE UM
MÓDULO DE REJEITOS DE CARVÃO NA REGIÃO CARBONÍFERA DE SANTA
CATARINA**

JUAREZ RAMOS DO AMARAL FILHO
Engenheiro Ambiental

Trabalho realizado no Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia (LEAMET) da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre, 2009.

Esse trabalho foi julgado adequado como dissertação de mestrado em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider
Co-orientador: Prof. Dr. Irineu A. S. de Brum

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Osório

Prof. Dr. Rubens Müller Kautzmann

Dr. Eduardo Rodrigo Ramos de Santana

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

*** À minha família**

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Centro de Tecnologia pela infraestrutura e recursos disponibilizados.

Ao professor Ivo Schneider, pela imprescindível orientação e apoio ao meu retorno para a dedicação exclusiva aos estudos.

Ao professor Irineu de Brum, pelo apoio técnico.

A Carbonífera Criciúma S/A pelo apoio à pesquisa, em especial ao Msc. Carlos Henrique Schneider pelas essenciais contribuições e sugestões.

Ao LAPROM e ao LASID pela disponibilização de materiais e equipamentos.

Ao Dr. Gerson Luis Miltzarek pela paciência, auxílio nas práticas laboratoriais e realização dos ensaios de afunda-flutua.

A todos meus colegas de LEAmet pelo apoio, paciência e contribuições dispensadas.

À minha namorada Márcia pela força e compreensão.

À Deus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipologia do carvão, distribuição no mundo e principais usos.....	20
Figura 2: Localização das jazidas de carvão na região sul	21
Figura 3: Diagrama dos produtos de mineração do carvão	22
Figura 4: Curvas de separabilidade de um minério	24
Figura 5: Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria	25
Figura 6: Efeito do tamanho de partícula na precisão de separação no beneficiamento de carvão.....	26
Figura 7: Diagrama esquemático de um jigge Baum.....	27
Figura 8: Arranjo típico das partículas sobre uma mesa.....	28
Figura 9: Representação esquemática de um ciclone autógeno.....	29
Figura 10: Representação esquemática de espirais concentradores.....	30
Figura 11: Esquema básico de uma coluna de flotação.....	31
Figura 12: Categorias de partes interessadas	35
Figura 13: Vista superior da Carbonífera Criciúma	40
Figura 14: Fluxograma da metodologia experimental da pesquisa	42
Figura 15: Localização dos pontos amostrados no módulo B	43
Figura 16: Metodologia experimental para classificação granulométrica	45
Figura 17: Fracionamento densimétrico de partículas utilizando um funil de separação.....	47
Figura 18: Procedimento experimental do ensaio afunda-flutua.....	47

Figura 19: Distribuição granulométrica do ponto A(0,0 - 5,0).....	53
Figura 20: Distribuição granulométrica do ponto A(5,0 - 10,0).....	54
Figura 21: Distribuição granulométrica do ponto B(0,0 - 5,0).....	56
Figura 22: Distribuição granulométrica do ponto B(5,0 - 8,5).....	57
Figura 23: Teor de cinzas acumulado por faixa granulométrica.	58
Figura 24: Teor de enxofre total acumulado por faixa granulométrica.	59
Figura 25: Teor de enxofre acumulado em relação a profundidade da amostra	59
Figura 26: Estimativa do tempo de disposição dos rejeitos amostrados	60
Figura 27: Distribuição granulométrica das amostras analisadas.....	60
Figura 28: Curvas de separabilidade densimétrica da fração “grossa”.....	61
Figura 29: Curvas de separabilidade densimétrica da fração “fina”.....	62
Figura 30: Massa acumulada em função da densidade de corte para as frações grossas (-50,8 mm +2,0 mm) e para as frações finas (-2,0 mm e +0,1 mm) do material presente no módulo de rejeitos.....	63
Figura 31: Resultados do teor de cinzas por faixa densimétrica.....	64
Figura 32: Resultados do teor de enxofre por faixa densimétrica.	64
Figura 33: Massa acumulada em função da densidade de corte para a fração grossa original e após a rebitagem do material presente no módulo de rejeitos.....	65
Figura 34: Flutuado em 1,5 (-50,8 mm +2,0 mm).....	65
Figura 35: Flutuado em 1,5 (-2,0 mm +0,1 mm).....	65
Figura 36: Flutuado em 2,8 (-50,8 mm +2,0 mm).....	66
Figura 37: Flutuado em 2,8 (-2,0 mm +0,1 mm).....	66

Figura 38: Afundado em 2,8 (-50,8 mm +2,0 mm).	66
Figura 39: Afundado em 2,8 (-2,0 mm +0,1 mm).	66
Figura 40: Fração leve (-50,8 mm +2,0 mm).....	67
Figura 41: Fração leve (-2,0 mm +0,1 mm).....	67
Figura 42: Fração Intermediária (-50,8 mm +2,0 mm).....	67
Figura 43: Fração Intermediária (-2,0 mm +0,1 mm).....	67
Figura 44: Fração densa (-50,8 mm +2,0 mm)	68
Figura 45: Fração densa (-2,0 mm +0,1 mm)	68
Figura 46: Recuperação de massa considerando diferentes possibilidades de aproveitamento do material disposto no módulo B de rejeitos da Carbonífera Criciúma S/A.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reservas de carvão na Região Sul.....	21
Tabela 2: “Tripé da Sustentabilidade”	36
Tabela 3: Participação do carvão na energia mundial	37
Tabela 4: Consumo anual de carvão mineral para a geração de energia elétrica no Brasil...38	
Tabela 5: Descrição das amostras analisadas	43
Tabela 6: Diâmetro aproximado das peneiras utilizadas na pesquisa.....	45
Tabela 7: Reagentes usados para o ensaio de afunda-flutua.....	46
Tabela 8: Volume e normalidade de HCl a ser adicionado na determinação do NP	49
Tabela 9: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “grossa”, granulometria de -50,8 mm +2,0 mm, do ponto A(0,0 - 5,0).	53
Tabela 10: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “fina”, granulometria de -2,0 mm +0,1 mm, do ponto A(0,0 - 5,0).	53
Tabela 11: Análises de cinzas e enxofre total do “lodo”, granulometria de -0,1 mm, do ponto A(0,0 - 5,0)	53
Tabela 12: Resultado Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “grossa”, granulometria de -50,8 mm +2,0 mm, do ponto A(5,0 - 10,0).	54
Tabela 13: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “fina”, granulometria de -2,0 mm +0,1 mm, do ponto A(5,0 - 10,0)	54
Tabela 14: Análises de cinzas e enxofre total do “lodo”, granulometria de -0,1 mm, do ponto A(5,0 - 10,0).	54

Tabela 15: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “grossa”, granulometria de -50,8 mm +2,0 mm, do ponto B(0,0 - 5,0).	56
Tabela 16: : Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “fina”, granulometria de -2,0 mm +0,1 mm, do ponto B(0,0 - 5,0)	56
Tabela 17: Análises de cinzas e enxofre total do “lodo”, granulometria de -0,1 mm, do ponto B(0,0 - 5,0).....	56
Tabela 18: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “grossa”, granulometria de -50,8 mm +2,0 mm, do ponto B(5,0 - 8,5).	57
Tabela 19: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “fina”, granulometria de -2,0 mm +0,1 mm, do ponto B (5,0 - 8,5)	57
Tabela 20: Teor acumulado de cinzas e enxofre total por faixa granulométrica.	58
Tabela 21: Resultados da ponderação dos dados da fração “grossa”	61
Tabela 22: Resultados da ponderação dos dados da fração “fina”	62
Tabela 23: Resultados da ponderação dos dados do “lodo”	63
Tabela 24: Compostos cristalinos identificados por DRX nas frações grossas e finas nas diferentes faixas densimétricas.	68
Tabela 25: Comparação entre os cenários com e sem reaproveitamento dos rejeitos.	71

LISTA DE ABREVIATURAS

ABA – Contabilização de ácidos e bases

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Af – Afundado

ANAEEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AP – Potencial de acidez

AS – *Social Accountability*

BEN - Balanço Energético Nacional

CAS – Chemical Abstracts Service

CCICED - China Council for International Cooperation on Environment and Development

CCSA – Carbonífera Criciúma S/A

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

Cz – Cinzas base seca

DAM – Drenagem ácida de minas

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

EPA – *Environmental Protection Agency*

Fl – Flutuado

g – grama

IEA – *Information Energy Administration*

ISO – *International Standart Organization*

LAPROM – Laboratório de Processamento Mineral

LASID – Laboratório de Siderurgia

LEAMET – Laboratório de Estudos Ambientais para a Metalurgia

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

mm – milímetros

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR – Norma Brasileira Registrada

NNP – Potencial de neutralização líquido

NP – Potencial de neutralização

NPR – Razão do potencial de neutralização

OSHAS – *Occupational Health and Safety Assessment Series*

P+L – Produção mais limpa

ROM – *Run of mine*

S – Enxofre total

S/A – Sociedade Anônima

SC – Santa Catarina

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

t – toneladas

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UM II – Unidade Mineira II

USITESC – Usina Termoelétrica do Extremo Sul Catarinense

UTM – *Universal Transverse Mercator*

WCI – *World Coal Institute*

RESUMO

Depósitos de rejeitos de carvão proporcionam uma série de problemas ambientais, pois ocupam uma grande área física, modificam o relevo, a paisagem e geram a drenagem ácida de minas (DAM). Assim, o objetivo do presente trabalho foi realizar a caracterização do material em um depósito de rejeitos da Carbonífera Criciúma S/A, de forma a avaliar a possibilidade de separação de três frações para futura reutilização: (a) uma fração de densidade baixa, rica em carvão para uso energético; (b) uma fração de densidade intermediária, com predomínio de materiais inertes; (c) uma fração de densidade alta, para uso comercial da pirita. A metodologia do trabalho consistiu na coleta de amostras e caracterização do material. A caracterização incluiu a análise granulométrica, estudos de afunda-flutua em meios densos e análises do material em termos de teor de cinzas e enxofre total. Os resultados demonstraram que 68% do material apresentam granulometria grosseira (entre 50,8 mm e 2,0 mm), 15% granulometria fina (entre 2,0 e 0,1 mm) e que 17% correspondem ao lodo proveniente das bacias de decantação. Os estudos indicam que é possível, por beneficiamento gravimétrico, recuperar 37% do material para fins energéticos, com um teor de 67,0% de cinzas e 2,9% de enxofre total. Ainda, 10% do material poderá ser recuperados para obtenção de um concentrado rico em pirita. O material remanescente, com densidade intermediária, poderá ser disposto com um menor potencial de geração de acidez.

PALAVRAS-CHAVE: carvão, pirita, mineração, beneficiamento, rejeitos de carvão, sustentabilidade, desenvolvimento sustentável

ABSTRACT

Coal tailing deposits can be a source of various environmental problems. It demands large physical area, change the topography and generate the acid mine drainage (AMD). The aim of this work was to characterize the coal tailing deposit of Carbonífera Criciúma S/A, seeking the separation of three fractions for future reuse: (a) a fraction of low density for energy production in thermoelectric plants, (b) a fraction of intermediate density, with predominance of inert minerals, and (c) a fraction of high density, for commercial use of pyrite. The work methodology consisted in sample collection and characterization of the material. The characterization included particle size analysis, densimetric studies and material analyses in terms of ash and total sulfur. The results showed that 68% of the material is composed by coarse particles (between 50.8 mm and 2.0 mm), and 15% of fine particles (between 2.0 and 0.1 mm) and 17% sludge from settling ponds. It is possible, by gravimetric concentration, to recover 34.2% of the material for energetic application, with 67.0% ash and 2.9% sulfur. Still, 10.0% of the material can be recovered as a pyrite rich concentrate. The remaining material, with intermediate density, can be discarded with a lower acid generation potential.

KEY WORDS: coal, pyrite, mining, coal preparation, sustainability, coal tailings, sustainable development

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Carvão Mineral	19
2.2. Beneficiamento de Carvões	21
2.2.1. Beneficiamento de frações grosseiras de carvão	26
2.2.2. Beneficiamento de frações finas de carvão	28
2.3. Rejeitos de Carvão e a Drenagem Ácida de Minas	32
2.4. Sustentabilidade na Mineração	34
3. EXPERIMENTAL	40
3.1. Materiais	40
3.1.1. Rejeitos de carvão	40
3.1.2. Equipamentos	41
3.1.3. Reagentes	41
3.2. Métodos	42
3.2.1. Amostragem	43
3.2.2. Caracterização das amostras	44
3.2.2.1. Homogeneização e quarteramento	44
3.2.2.2. Separação manual “lodo/rejeito”	44
3.2.2.3. Classificação granulométrica	45
3.2.2.4. Ensaio de afunda-flutua	46
3.2.2.5. Avaliação dos teores de cinzas e enxofre	48
3.2.2.6. Ensaio estático de contabilização de ácidos e bases	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1. Caracterização Granulométrica e Densimétrica das Amostras Coletadas	52
4.2. Análise por Faixa Granulométrica das Amostras	58
4.3. Análise por Faixa Densimétrica das Amostras	60
4.4. Características das Frações Densimétricas	65
4.5. Cenários de Aproveitamento do Material	69
5. CONCLUSÕES	73
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
7. REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

O carvão é a segunda fonte de energia primária mais utilizada no mundo, mas em termos de energia elétrica ele se constitui como primeira opção em âmbito mundial (*Energy Information Administration*, 2008). No Brasil, apenas 1,3% da energia elétrica é produzida através do carvão (MME/ANEEL, 2009), ficando na sexta colocação em termos de produção de eletricidade, somente à frente da energia eólica.

Porém, segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (Brasil/MME, 2007), o aumento das técnicas de “queima limpa” para carvões mais pobres, o aumento do preço de outros combustíveis fósseis (gás natural e petróleo) e a perspectiva de dificuldades no aproveitamento dos recursos para fins hidrelétricos ainda disponíveis no país, aumentaram as atenções para uma possível expansão do parque termelétrico a carvão no Brasil, principalmente dentro da perspectiva de longo prazo. As fontes de energia elétrica “limpas” (eólica, fotovoltaica) ainda são economicamente inviáveis para o completo suprimento da matriz energética atual. Assim, o carvão mineral, mesmo sendo uma fonte potencialmente poluidora, deverá desempenhar um importante papel na energia nacional e mundial devido à disponibilidade de enormes reservas que estão geograficamente espalhadas no mundo e ao desenvolvimento de tecnologias limpas em toda a sua cadeia produtiva.

Apesar de sua importância para o desenvolvimento econômico, deve-se frisar que a exploração mineral inadequada e sem foco no desenvolvimento sustentável pode trazer inúmeros problemas para o meio ambiente e para a comunidade. Um dos principais problemas enfrentados pelas indústrias carboníferas, causado pela disposição final dos rejeitos gerados nas etapas de processamento, é a drenagem ácida de minas (DAM). A DAM nada mais é que um efluente de acidez extremamente elevada, formada pela oxidação de sulfetos metálicos, como por exemplo a pirita (FeS_2), através da ação conjunta da água e do ar atmosférico (Kontopoulos, 1998).

A implantação de políticas voltadas à produção mais limpa focadas nos 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar) e/ou outras ferramentas de gestão ambiental empresarial, como avaliações de ciclo de vida, podem auxiliar as empresas carboníferas a remediar e/ou prevenir impactos ambientais. Podem também incrementar a receita com a reutilização ou reciclagem de rejeitos dispostos em pilhas, aumentando seus índices de sustentabilidade empresarial.

Neste contexto fica evidente a importância de se diminuir a geração de rejeitos pelas carboníferas bem como investir em estudos que possibilitem o desenvolvimento de novas tecnologias para a maximização do uso energético do carvão mineral. Ainda, componentes minerais presentes nos rejeitos podem ser aproveitados e processados, transformando resíduos sólidos em co-produtos da extração do carvão com valor de mercado agregado.

Trabalhos vêm sendo realizados com a intenção de tratar ou minimizar a geração de DAM estabelecendo como solução tratamentos de fim de tubo (Galatto et al., 2007; Machado, 2007; Possa e Santos, 2003; Silveira et al., 2009). Entretanto estudos que visem à redução da fonte geradora da drenagem ácida, ou seja, diretamente voltados aos rejeitos, estão ainda no seu princípio. Grande parte destes tratamentos de controle da poluição propostos exigem um consumo muito grande de insumos e energia, devido principalmente ao baixo pH e a alta quantidade de íons metálicos presentes na DAM. Com o desenvolvimento de novas tecnologias que visem à redução da quantidade de sulfetos nos rejeitos, o custo do tratamento final diminuiria e a qualidade do efluente tratado melhoraria.

O advento de novas usinas termoeletricas com técnicas de queima avançadas e de baixo impacto permitirá a utilização de carvões com até 70% de matéria inorgânica, proporcionando assim a possibilidade do reaproveitamento de boa parte da massa de resíduos dispostos até hoje, já que atualmente as usinas convencionais aceitam carvões com cerca de 40% de cinzas. A Usina Termoeletrica do Extremo Sul Catarinense - USITESC - está com a licença ambiental prévia liberada e o início das operações está previsto para 2012. Esta usina aceitará carvões para queima com até 67,0% de cinzas e 3,2% de enxofre. Do ponto de vista ambiental, este projeto baseia-se no uso de tecnologias limpas para carvão, atendendo à legislação nacional de emissões atmosféricas, alcançando remoção superior a 99% do material particulado e a 97% dos gases de enxofre.

Estudos vêm sendo desenvolvidos com a intenção tanto de utilizar o máximo de carvão contido em rejeitos, para uso energético, quanto para aproveitar a fração rica em pirita para outros fins. Feil (2007) demonstrou que o beneficiamento dos rejeitos de carvão das minas do Faxinal e Butiá Leste, localizadas no Estado do Rio Grande do Sul, permite recuperar uma significativa fração do material para emprego em termoeletricas. A separação de uma fração rica em pirita pode também ser aproveitada como matéria-prima para a fabricação de enxofre, ácido sulfúrico, sulfato férrico, sulfato ferroso e pigmentos (Barbosa et al., 2002; Colling et al., 2009; Marcello et al., 2008; Menezes e Schneider, 2007; Vigânico et

al., 2009). Por fim, a matéria mineral com densidade intermediária, com características inertes, poderá servir como base para futuros estudos, como por exemplo, para ser aproveitada em empreendimentos da construção civil.

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Estudos Ambientais para a Metalurgia (LEAMet), o qual faz parte da Rede Carvão - Rede de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação em Carvão Mineral. O LEAMet vem desenvolvendo trabalhos para a verificação do potencial de aproveitamento de rejeitos de carvão para diversos fins (Colling et al., 2009; Menezes e Schneider, 2007; Vigânico et al., 2009), com a intenção de proporcionar às indústrias de extração ferramentas que possam auxiliar a atividade na redução dos impactos em sua cadeia produtiva abrindo novas oportunidades de negócios e aumentando ainda o tempo de vida útil de uma atividade de lavra.

1.1 Objetivos

Considerando o exposto acima, o objetivo geral deste trabalho foi caracterizar o rejeito de carvão depositado no módulo B de rejeitos da UM II – Verdinho, da Carbonífera Criciúma S/A., localizado no Município de Forquilha, SC, avaliando a possibilidade de recuperação de produtos com valor de mercado.

Os objetivos específicos foram:

- a) quantificar as frações granulométricas, considerando o beneficiamento gravimétrico do material em um circuito de grossos e em um circuito de finos;
- b) caracterizar os materiais, dentro de cada faixa granulométrica, em relação a distribuição densimétrica com seus respectivos teores de cinzas e enxofre total;
- c) avaliar a porcentagem de material a ser recuperado considerando a fração menos densa (para produção de energia), intermediária (materiais mais inertes) e mais densa (concentrado de pirita);
- d) avaliar possíveis cenários para o reaproveitamento dos materiais no contexto regional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Carvão Mineral

No planeta Terra são encontradas rochas de diversas origens, formadas pela solidificação de materiais provenientes do manto, por precipitação de soluções aquosas, recristalização de outros materiais e pelo acúmulo, através de milhões de anos, de resíduos de outras rochas previamente formadas. Nas rochas sedimentares, podem-se apresentar massas coerentes de matéria orgânica, na forma de carvão mineral, formada a partir de vegetais soterrados e que, sob pressão e temperaturas elevadas, na ausência de ar, sofreram transformações físico-químicas e geológicas, ao longo dos anos (Araújo, 2007).

Por milhares de anos a matéria orgânica sofreu transformações em suas propriedades físicas e químicas, evoluindo de turfa à antracito. Essas alterações, chamadas de estágios de carbonificação, “rank” ou grau de carbonificação, são avaliadas através de parâmetros químicos (carbono, hidrogênio, umidade, matéria volátil, poder calorífico) e físicos (poder refletor da vitrinita). Carvões de baixo “rank”, tais como linhito e carvões sub-betuminosos, são tipicamente quebradiços e de aparência fosca. São caracterizados por um alto índice de umidade e baixo teor de carbono, possuindo conseqüentemente um baixo poder calorífico. Já carvões de alto “rank” geralmente se apresentam mais resistentes, de aparência vítrea e preta. Contém baixa umidade e um alto teor de carbono, possuindo um alto poder calorífico. O antracito é o carvão com menor índice de umidade e maior teor de carbono e poder calorífico (World Coal Institute, 2005).

O carvão mineral é classificado de acordo com a sua qualidade em: turfa, de baixo conteúdo carbonífero, que constitui um dos primeiros estágios do carvão com teor de carbono, em base seca isento de cinzas, na ordem de 45%; linhito, que apresenta teor de carbono em base seca isento de cinzas que varia de 60% a 75%; carvão betuminoso (hulha), o mais utilizado como combustível, e que contém entre 75% e 85% de carbono; e antracito, o mais puro dos carvões, que apresenta um teor de carbono superior a 90% (Brasil/MME, 2007).

Como mostra a Figura 1, 53% do carvão mundial é de alto grau de carbonificação enquanto 47% são carvões de baixo grau de carbonificação. A grande maioria deste recurso natural é consumida para geração de energia. Apenas 15% das reservas de carvão no mundo são de carvões com propriedades coqueificantes, ou seja, capazes de produzir coque, insumo utilizado na produção de aço.

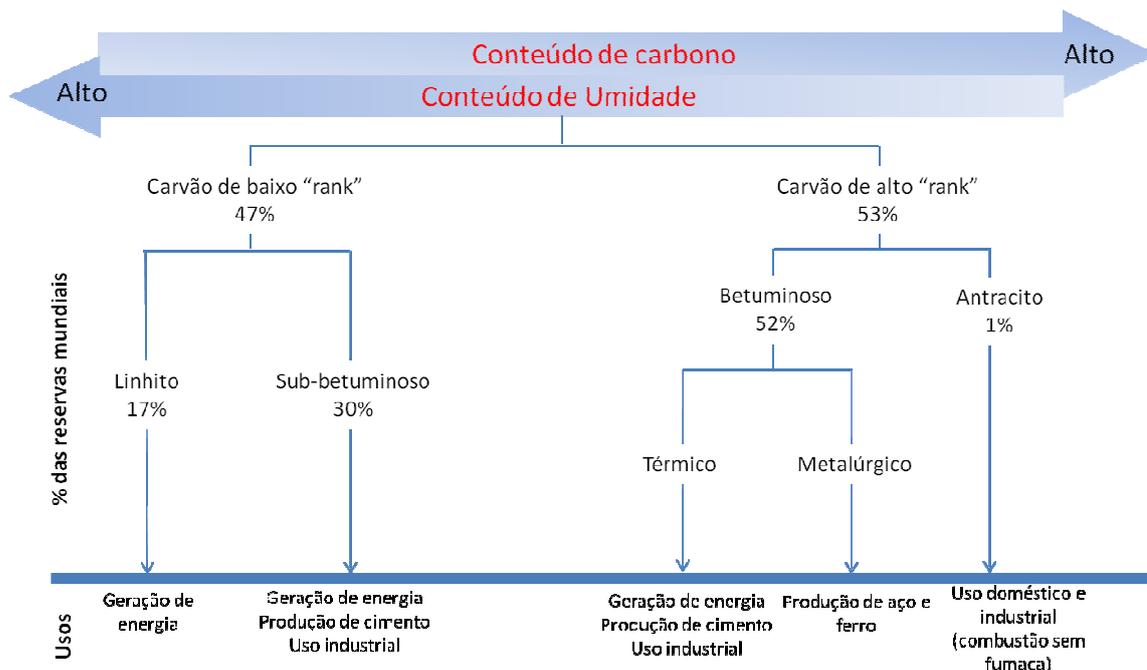


Figura 1: Tipologia do carvão, distribuição no mundo e principais usos (WCI, 2005).

O carvão mineral é formado por carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e traços de outros elementos e normalmente está associado, a rochas, como arenito, silito, folhelhos e diamictitos, e a minerais como a pirita. Essa matéria é associada a materiais inertes incombustíveis compondo as cinzas no momento da queima. A separação desse material indesejável melhora a qualidade do carvão bruto extraído da mina (ROM), de forma que melhora o rendimento do carvão no seu uso final. O processo de separação dos materiais desejáveis e indesejáveis existentes no carvão bruto chama-se “beneficiamento” (Leonard et al., 1979; Brasil/MME, 2007). Do processo de beneficiamento resultam duas frações: uma de produto ou carvão lavado e outra de rejeito. O produto normalmente é encaminhado para as termoelétricas enquanto o rejeito vai para disposição final em “depósitos de rejeito”. Esses depósitos de rejeitos resultam no principal passivo ambiental dos empreendimentos mineiros.

Segundo DNPM (2006), a quantidade de reservas medidas, indicadas, inferidas e lavráveis são de 6,6, 10,7, 6,5, 6,6 bilhões de toneladas respectivamente, como mostra a Tabela 1. As jazidas brasileiras de carvão estão localizadas na região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, conforme apresentado na Figura 2, e praticamente a totalidade do carvão nacional é utilizada para a geração de energia (térmica e elétrica). A produção anual de carvão ROM em 2005 foi de aproximadamente 13 milhões de toneladas. O estado do Rio Grande do Sul é o maior produtor do país, com 52,3% da produção, ficando Santa Catarina com 46,3% e o Paraná com 1,4%. Em termos de faturamento, porém, o carvão

catarinense, com um poder calorífico superior, garante a Santa Catarina uma participação de 68,3%, contra 28,5% do Rio Grande do Sul e 3,2% o Paraná.

Tabela 1: Reservas de carvão na região sul (DNPM, 2006).

Unidade da Federação	Quantidade (t)			
	Medida	Indicada	Inferida	Lavrável
Paraná	4.184.006	212.000		3.509.006
Rio Grande do Sul	5.255.915.580	10.098.475.668	6.317.050.409	5.376.789.122
Santa Catarina	1.354.211.132	593.216.494	217.069.278	1.212.340.482



Figura 2: Localização das jazidas de carvão na região sul.

O carvão brasileiro apresenta como característica um elevado teor de materiais inertes (cinzas). Do sul para o norte, há um acréscimo no “rank”. Na maioria dos casos, precisa ser beneficiado, para melhorar suas características.

2.2. Beneficiamento de Carvões

O processamento de minérios, também chamado de tratamento ou beneficiamento de minérios, conforme Araújo (2007), é um conjunto de operações básicas realizadas em uma matéria-prima mineral bruta com o objetivo de se obter sua adequação, ou seja, produtos comercializáveis.

No caso do carvão mineral, as jazidas apresentam camadas de matéria mineral intercaladas nos estratos de carvão, correspondentes ao estéril ou ganga. Esse material é transportado para plantas de beneficiamento, com o objetivo de separar a ganga, sem valor econômico, do carvão. A Figura 3 apresenta um diagrama mostrando que somente após o beneficiamento é que o carvão retirado da jazida agrega valor comercial. Porém, concomitantemente, materiais sem valor comercial também são gerados.

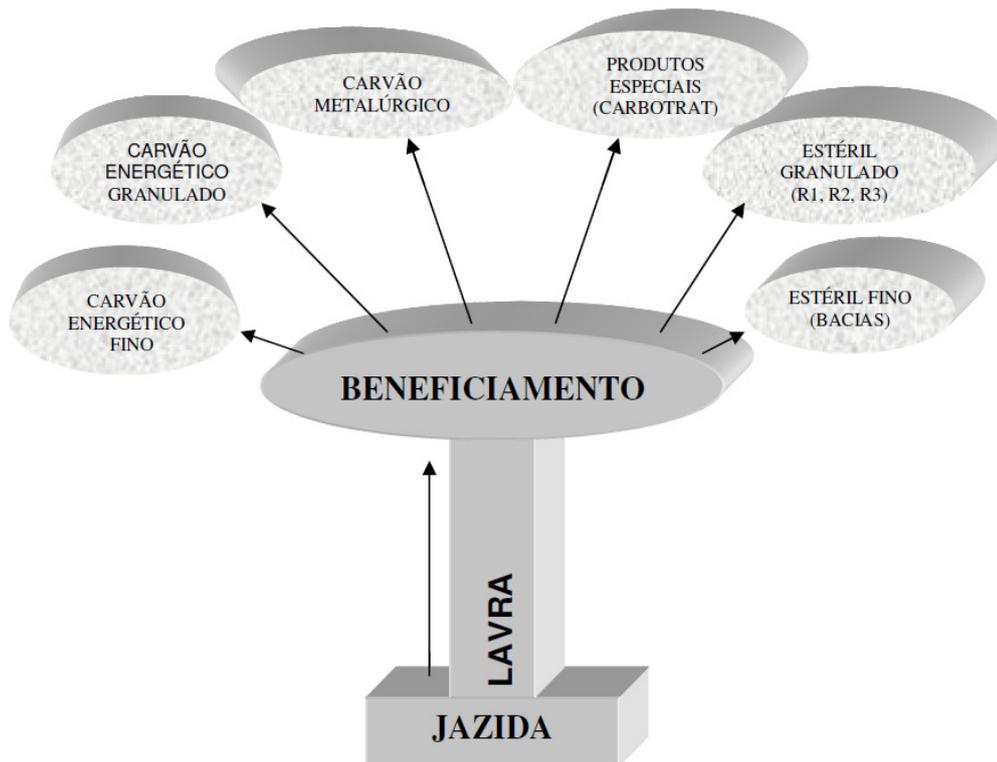


Figura 3: Diagrama dos produtos de mineração do carvão (Schneider, 2006).

Tavares e Sampaio (2005), baseados nos textos clássicos de Gaudin (1939), observam que as operações que envolvem concentração de minerais constituem um conjunto de três requisitos fundamentais: (a) liberação das fases constituintes do minério; (b) existência de propriedade diferenciadora dos minerais e (c) separabilidade dinâmica.

O conjunto de operações realizadas no processamento de uma matéria-prima mineral inclui: fragmentação (redução do tamanho de blocos e/ou partículas), separação por tamanho (colocação dos materiais dentro de uma faixa adequada de tamanho), concentração (separação das espécies de valor econômico das demais), separação sólido/líquido (recuperação da água utilizada nas operações e disposição de rejeitos) e outras operações auxiliares (manuseio, transporte, amostragem, estocagem, etc.) (Araújo, 2007).

Conforme Sampaio e Tavares (2005), o carvão é formado por minerais inertes (ganga) e por “minerais orgânicos” chamados macerais e estes são divididos em: vitrinita, exinita e inertinita, com densidades variáveis conforme o teor de carbono. Portanto, por não ser uma rocha homogênea, a densidade do carvão é determinada pela concentração relativa dos diversos constituintes orgânicos e inorgânicos presentes no carvão. A matéria inorgânica presente no carvão é mais densa que os macerais. Assim, quanto maior a concentração da matéria carbonosa no material, menor será sua densidade. O teor de cinzas está diretamente ligado à quantidade de minerais inertes presentes no carvão, podendo-se afirmar que quanto mais denso for o produto menor sua qualidade para a queima.

Especificamente no extremo sul de Santa Catarina, o carvão é obtido a partir de minas a céu aberto, subterrâneas e também em instalações de beneficiamento de antigos depósitos de rejeitos que se encontram na região. Na maioria dos casos, os constituintes orgânicos não se encontram suficientemente concentrados para sua utilização direta, necessitando de algum tipo de beneficiamento que resulte acréscimo na concentração da matéria orgânica e redução dos minerais de ganga a proporções aceitáveis. Nas instalações de beneficiamento, o minério lavrado e os rejeitos são concentrados em jiques, espirais, hidrociclones e mesas concentradoras. A recuperação mássica está em torno de 40% de produto comercializável para carvão ROM e 10% de produto comercializável para rejeitos submetidos ao re-beneficiamento (Soares e Trindade, 2002).

Resumidamente, pode-se definir o processamento mineral do carvão em duas etapas. A primeira etapa consiste na de preparação do carvão, com as fases de cominuição ou fragmentação (através de britagem e moagem) e classificação granulométrica (através de ciclonagem ou peneiramento). A segunda etapa consiste na concentração do carvão, propriamente dita.

Segundo Galery et al.(2007), os principais objetivos da fragmentação são: (a) atingir o grau de liberação necessário, separando a matéria orgânica da matéria mineral (ganga); e (b) atingir as especificações granulométricas exigidas pelo mercado.

A avaliação do grau de liberação pode ser realizada por diversos métodos divididos em dois tipos: os diretos e os indiretos. Nos métodos diretos há a observação direta das amostras. O método de Gaudin, que utiliza a microscopia ótica, é bastante conhecido e consiste na observação das amostras minerais em várias faixas granulométricas, obtendo-se o grau de liberação para cada uma delas. Nos métodos indiretos, a avaliação é feita aplicando um método de concentração adequado à separação da espécie útil. O grau de liberação é

avaliado através da análise de resultados de concentração obtidos para cada faixa ou por curvas de separabilidade. Esta concentração é realizada considerando-se uma propriedade diferenciadora como densidade, susceptibilidade magnética, condutividade ou propriedades superficiais. No caso específico da densidade, os líquidos orgânicos são muito utilizados em testes de afunda/flutua (Brandão et al., 2007).

Os métodos de concentração são uma série de operações unitárias responsáveis para separar, no caso do carvão mineral, a matéria com maior teor de carbono da ganga. Os equipamentos mais utilizados para a concentração mineral do carvão são os jigues, utilizados principalmente para a fração graúda, as espirais concentradoras e a flotação, para as frações finas e ultrafinas respectivamente. Conforme Figura 4 a separação da faixa aproveitável do rejeito pode ser inferida através das curvas de separabilidade densimétrica, construídas para uma determinada faixa granulométrica. Obtém-se, assim, a recuperação mássica e os teores dos produtos em qualquer densidade particular (Sampaio, 1983).

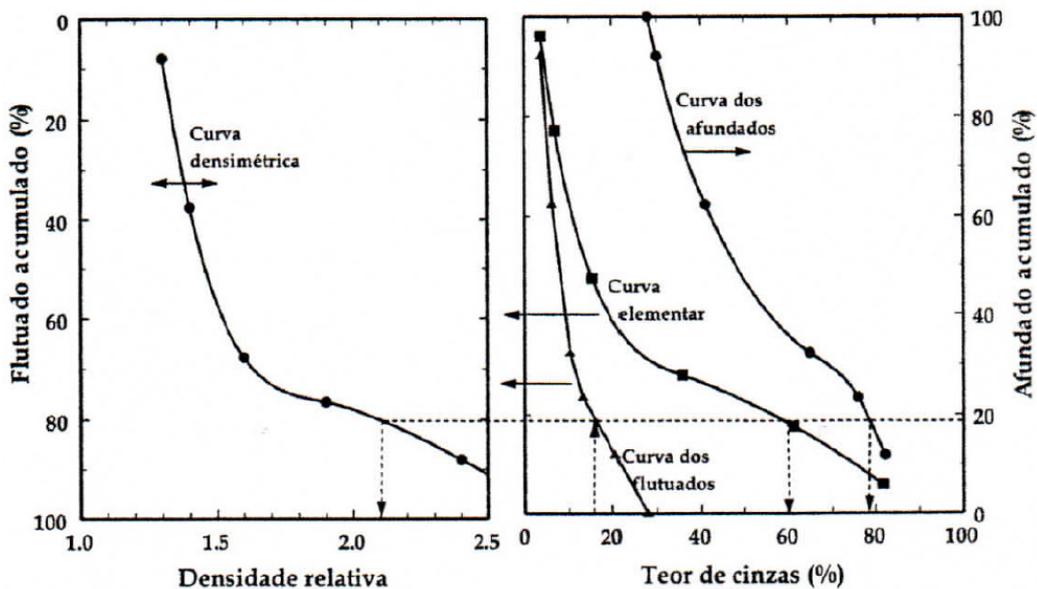


Figura 4: Curvas de separabilidade de um carvão (Tavares e Sampaio, 2005).

Os processos de beneficiamento de carvões podem ser divididos em dois grupos (Sampaio, 1983): (a) processos baseados em diferenças de gravidade (jigagem, ciclonação, vasos de meio denso); e (b) processos baseados em fenômenos superficiais (flotação, aglomeração oleosa).

Os processos de concentração por meios densos são os mais utilizados no mundo. As concentrações em meios densos são aqueles processos os quais o carvão ROM é “limpo” por

imersão em um fluido contendo uma densidade intermediária entre o produto e o rejeito. Sua principal vantagem em relação aos demais processos de concentração é a precisão na separação mesmo na presença de altas taxas de alimentação, baixas diferenças de densidade e variações nas especificações de mercado (Leonard, 1979). Por outro lado possui um custo operacional elevado sendo aplicado praticamente na concentração de carvões com um grau de carbonificação elevado.

Segundo Tavares e Sampaio (2005), a concentração gravimétrica é uma das mais antigas formas de beneficiamento mineral e até hoje é largamente empregada. As suas vantagens em relação a outros métodos de processamento (tais como a flotação, a lixiviação, a separação magnética) são várias. Apresenta uma alta capacidade de processamento com baixos custos de investimento e operação. São menos influenciados pela composição da água, não sofrendo influência de pequenas variações na composição química dos constituintes que se deseja separar além de não existir qualquer limitação ao tamanho máximo de partícula para aplicação. Como não há necessidade de reagentes químicos nos processos de concentração gravimétrica, os custos de operação e os custos ambientais em relação a outros processos são menores. A Figura 5 apresenta diferentes métodos de beneficiamento gravimétrico e sua aplicação teórica de acordo com a granulometria do produto.

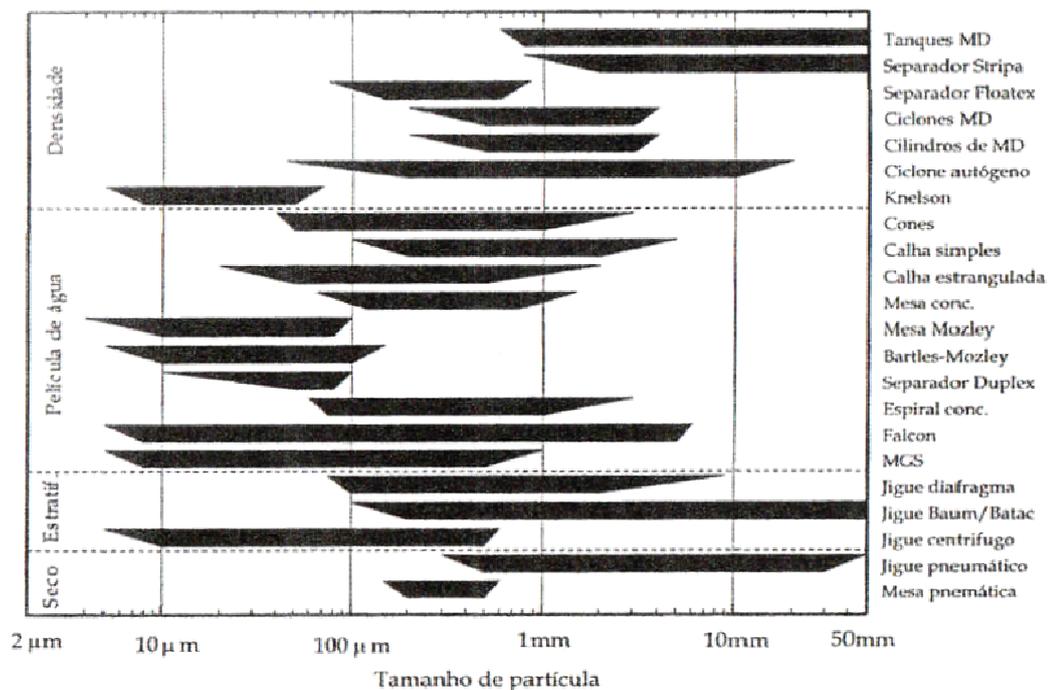


Figura 5: Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria (Tavares e Sampaio, 2005).

A Figura 6 apresenta os efeitos do tamanho das partículas de carvão na precisão do beneficiamento. Quanto maior a granulometria maior é a eficiência do equipamento, entretanto menor é seu grau de liberação. Tavares e Sampaio (2005) consideram que os equipamentos existentes para separação de grossos de carvão são restritos aos jigues e à separação por meio-denso. Para a concentração dos finos de carvão, o número de opções aumenta bastante, incluindo ciclones e cilindros a meio-denso (custo mais elevado), mesas concentradoras, espirais, calhas, jigues (custo mais baixo)(Leonard et al., 1979).

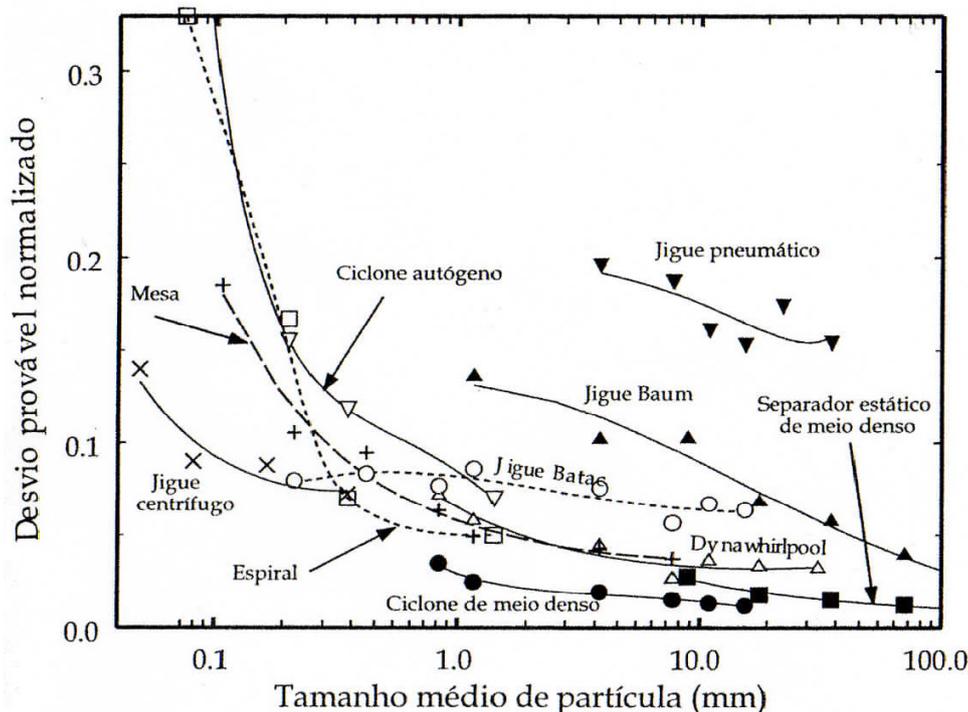


Figura 6: Efeito do tamanho de partícula na precisão de separação no beneficiamento de carvão (Tavares e Sampaio, 2005).

2.2.1. Beneficiamento de frações grosseiras de carvão

Segundo Tavares e Sampaio (2005) a jigagem e a separação em meio denso são as únicas opções para faixas maiores que 2 mm, possuindo a jigagem custos de investimento e operacional bem menores, sendo a mais utilizada comercialmente.

A jigagem é um dos métodos mais antigos de concentração gravimétrica e opera em faixas granulométricas mais grosseiras e caracteriza-se pela criação de correntes verticais, através de um dispositivo que pode ser um pistão (embolo), um diafragma ou o ar. Dispõe-se, ainda, de uma superfície perfurada denominada crivo, sobre a qual se introduz uma camada

de material (esferas, por exemplo) chamadas de leito. A corrente vertical produzida é alternada em relação ao seu sentido, produzindo-se assim, efeitos de expansão e contração do leito. As pulsações podem ser obtidas com o emprego de água ou ar comprimido, através de diversos mecanismos diferentes. As partículas mais densas vão encontrar maior facilidade de passagem tanto pelo leito quanto pelo crivo, separando-se das partículas menos densas (Peres, 2007). Os jigues foram e continuam sendo amplamente usados principalmente devido a sua economia. Além de apresentar baixo custo operacional, jigues são robustos, têm elevada capacidade, são de simples operação e admitem alimentação com granulometria relativamente ampla, o que permite simplificar o fluxograma de beneficiamento. Se comparados a outros separadores, jigues apresentam uma maior capacidade de absorver grandes flutuações de teor de minério, taxa de alimentação e porcentagem de sólidos (Tavares e Sampaio, 2005). Existem no mercado diversas configurações de jigues, entre elas estão: o jigue Harz, o jigue Denver, o jigue Bandelari, o jigue Baum e o jigue Batac. A Figura 7 apresenta um diagrama esquemático de um jigue Baum em um corte longitudinal e em um corte transversal.

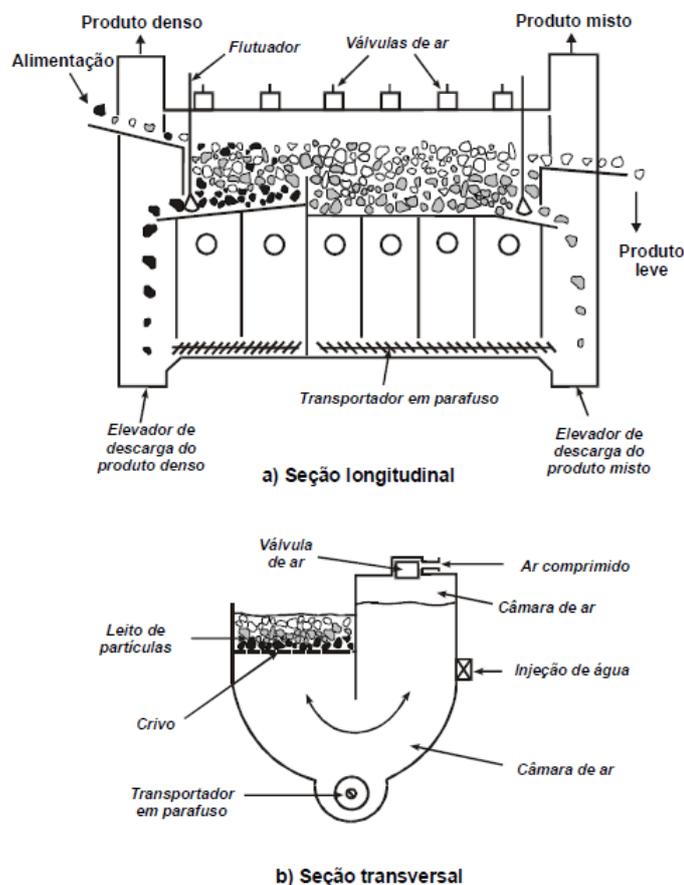


Figura 7: Diagrama esquemático de um jigue Baum (Tavares e Sampaio, 2005).

2.2.2. Beneficiamento de frações finas de carvão

Segundo Sampaio (1983), ao contrario das frações grosseiras em que todos os métodos se baseiam nas diferenças de densidade entre a matéria orgânica e inorgânica, para os finos existem, além dos processos por diferenças de densidade (mesas, ciclones, espirais), processos baseados em fenômenos físico-químicos superficiais (flotação, aglomeração oleosa). A seguir são apresentados os aspectos gerais e os princípios básicos de funcionamento das mesas concentradoras, ciclones autógenos, espirais e por fim da flotação.

As mesas concentradoras consistem em um *deck* provido de ripas, também chamadas de *riffles*, montado numa base que permite modificações do ângulo de inclinação. Este *deck* está conectado com um mecanismo oscilatório na direção paralela às ripas. Pela parte superior é ministrado um fluxo de água de lavagem. As partículas são estratificadas em camadas ao longo dos *riffles* de acordo com as suas diferenças de forma, densidade e tamanho. A separação das partículas em mesas concentradoras é fundamentada em 2 princípios: (a) concentração de partículas em película de água, na direção da largura da mesa; (b) estratificação das partículas de acordo com as diferenças em densidade, tamanho e forma na direção longitudinal da mesa. A Figura 8 demonstra de forma esquemática uma mesa concentradora e o arranjo típico das partículas sobre a mesa, separadas por diferença de densidade. Entre as vantagens reconhecidas, destacam-se: (a) grande número de variáveis disponíveis para otimizar a operação; (b) a operação é visível, o que permite a avaliação imediata de um determinado parâmetro; (c) eliminação eficiente da pirita; (d) baixo custo operacional; e (e) processamento de altas concentrações de sólidos (Rubio, 1988).

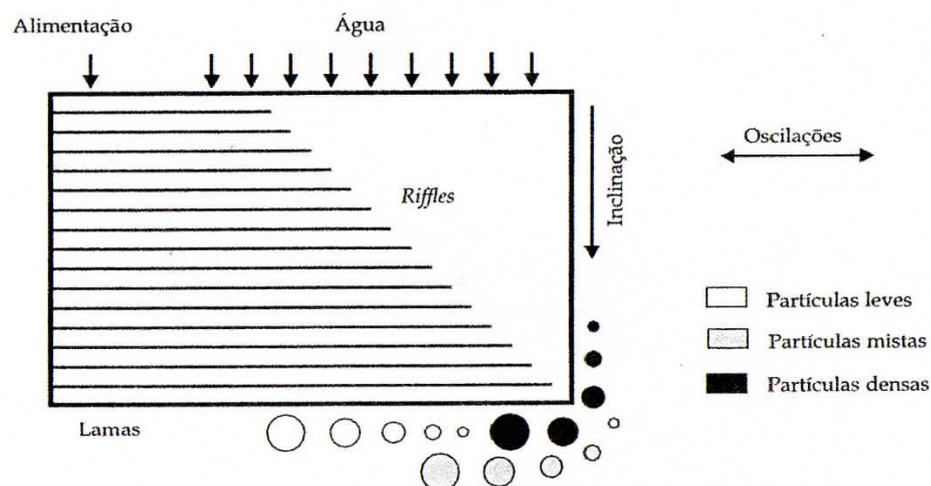


Figura 8: Arranjo típico das partículas sobre uma mesa (Tavares e Sampaio, 2005).

Os ciclones autógenos, embora não utilizem meios densos, concentram o carvão como se este estivesse em um meio denso gerado com a própria polpa do carvão que está sendo processado. Os princípios básicos da ciclonagem demonstram a existência de dois fenômenos fundamentais: (a) as partículas estratificam-se de acordo com as diferenças de densidades ao longo da parede cônica da seção inferior do ciclone; (b) as partículas entram em fluxo ascendente durante a fase inicial de sua aceleração, na direção radial do ciclone. Em função destes princípios, os ciclones autógenos objetivam aumentar o ângulo cônico, aumentando o tempo de residência das partículas densas e gerando assim um “meio denso”, facilitando o separação das partículas mais pesadas das partículas mais leves. As vantagens do uso dos ciclones autógenos são as seguintes: (a) baixo custo operacional e de investimento; (b) fácil integração com outros processos de beneficiamento de finos de carvão; (c) muito boa eficiência na remoção de pirita; e (d) espaço físico requerido é mínimo (Rubio, 1988). A Figura 9 representa de uma maneira esquemática um ciclone autógeno.

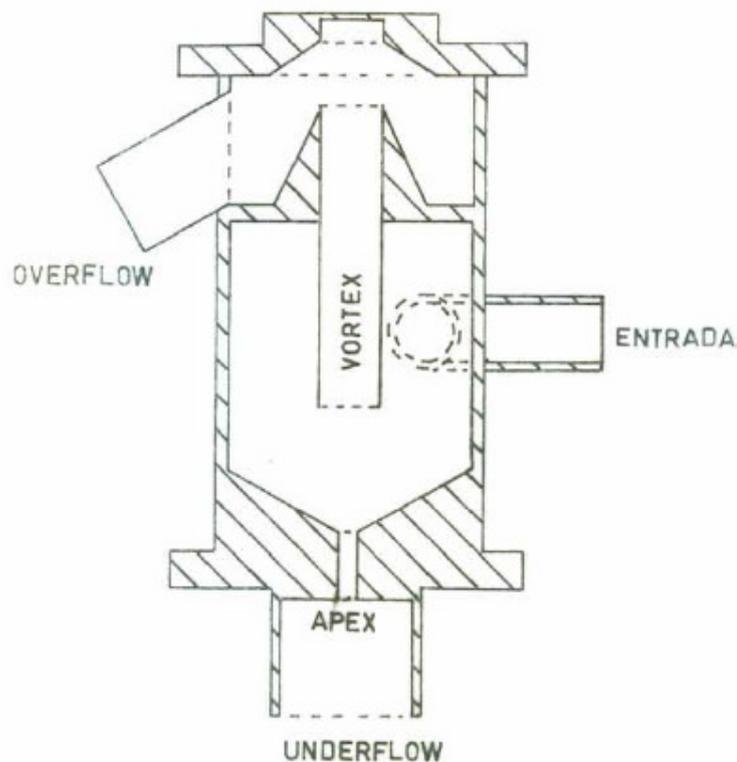


Figura 9: Representação esquemática de um ciclone autógeno (Sampaio, 1983).

Ao contrário dos equipamentos mostrados até o momento, os espirais concentradores não empregam meios mecânicos para auxiliar a separação, somente a força da gravidade.

Esses equipamentos são caracterizados por apresentarem baixos custos de operação e investimento e alta capacidade de recuperação e facilidade de operação e instalação. São principalmente usados para a concentração de materiais finos em película de água. A espiral basicamente consiste de uma calha em forma de helicóide, de seção semicircular e suportada por uma coluna central, na qual uma polpa de alimentação é introduzida por meio de uma caixa de alimentação, posicionada acima do equipamento. A separação das partículas se dá pela ação combinada das forças gravitacional, centrífuga, de arraste, dispersivas e de atrito, à medida que a polpa desce em movimento espiral. Uma vez depositadas na superfície da calha, as partículas formam um leito, o qual estratifica as partículas mais finas e densas se movendo até a base de leito, enquanto as leves e grossas se movem para cima, como resultado da ação dos mecanismos da sedimentação retardada, da consolidação intersticial e das forças de cisalhamento. Essas partículas posicionadas mais próximo da base do leito se deslocarão, juntamente ao fluido naquela região, na direção da coluna central, enquanto aquelas localizadas próximo ao topo, tipicamente as grossas e leves, serão arrastadas na direção da borda externa da calha. O resultado é a segregação das partículas de diferentes tamanhos e densidades radialmente na calha. A separação dos produtos contidos nos diferentes fluxos da espiral é realizada de diferentes maneiras, podendo ser realizada ao longo ou no final da calha com a utilização de desviadores de fluxo ou simples orifícios, conforme apresentado na Figura 10 (Tavares e Sampaio, 2005).

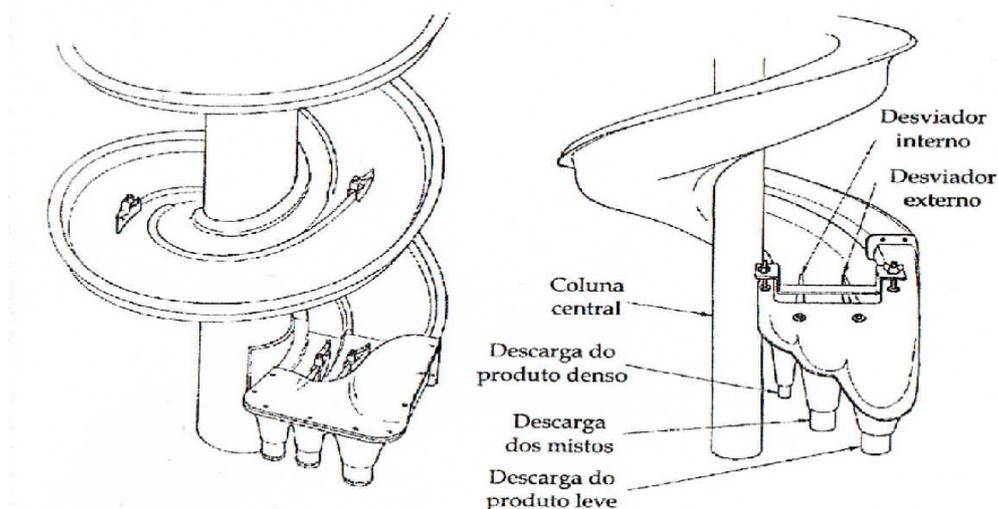


Figura 10: Representação esquemática de espirais concentradoras (Tavares e Sampaio, 2005).

O processo de flotação é utilizado para a separação de frações ultrafinas de carvão, ou seja, que devido a sua baixa granulometria, não é possível seu beneficiamento em circuito de finos com equipamentos de concentração gravimétrica. Segundo Rubio (1988), a flotação consiste na separação de partículas ricas em matéria carbonosa (hidrofóbicas) das partículas de matéria mineral (hidrofílicas) mediante a utilização de bolhas de ar. Estas bolhas de ar aderem-se às partículas ricas em carbono levando-as à superfície. A etapa fundamental da flotação é deslocamento da partícula pelas bolhas de ar. Esta etapa ocorre somente se a força de interação resultante entre a superfície da partícula e a bolha de ar é de caráter atrativo, condição determinada pela hidrofobicidade do carvão. Outra condição importante é que o tempo de residência da bolha de ar deve ser suficiente para que ocorra a adesão. A Figura 11 apresenta um esquema básico de funcionamento de uma coluna de flotação.

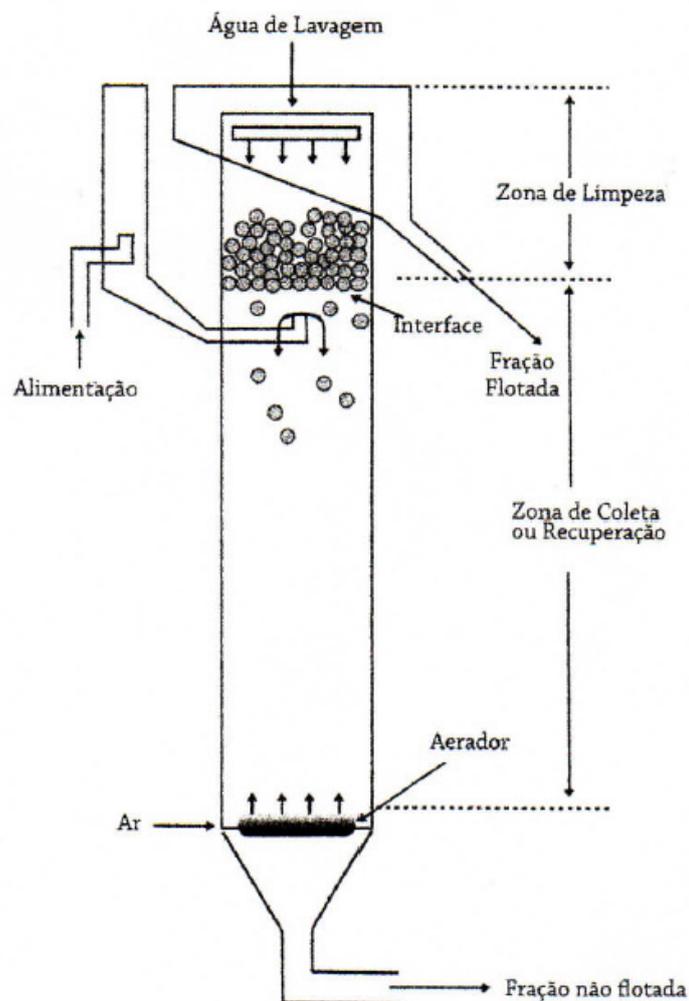


Figura 11: Esquema básico de uma coluna de flotação (Peres, 2007).

2.3. Rejeitos de Carvão e a Drenagem Ácida de Minas

Atividades de mineração normalmente proporcionam à comunidade localizada em sua área de influência um aumento na oferta de emprego e renda, na disponibilidade de bens e serviços e na arrecadação de impostos, mas em contrapartida também podem levar à alterações indesejáveis na paisagem e nas condições ambientais do entorno (Borma e Soares, 2002).

Borma e Soares (2002) classificam os resíduos gerados em dois tipos: (a) estéreis, e (b) rejeitos. Os estéreis são os materiais de cobertura, as camadas intermediárias ou circundantes do mineral de interesse, extraídos fisicamente através do uso de explosivos ou escavadeiras. Enquanto que rejeitos são resíduos sólidos resultantes das operações de beneficiamento e metalurgia extrativa. Em ambos os casos, se dispostos inadequadamente, tornam-se graves problemas ambientais devido aos danos que podem causar aos recursos hídricos, ao solo e ao ar.

Na mineração de carvão no Brasil, do material bruto retirado da mina aproximadamente de 60% são resíduos. Estima-se que já foram beneficiados cerca de 550 milhões de toneladas de carvão ROM nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, gerando aproximadamente 300 milhões de toneladas de resíduos sólidos.

O principal impacto ambiental relacionado à atividade de mineração de carvão é causado pela geração das chamadas drenagens ácidas de minas (DAM), que devido ao seu baixo pH acidificam e contaminam as águas superficiais e subterrâneas, limitando ou impedindo sua utilização. Segundo World Coal Institute (2005), a drenagem ácida de minas é um efluente rico em metais, formado por reações químicas entre água, ar e rochas contendo minerais sulfetados. Provoca graves impactos ambientais, pois, mesmo após o encerramento das atividades, pode continuar a ser gerada durante dezenas de anos ou séculos, nas minas a céu aberto, nas minas subterrâneas e em depósitos de rejeitos causando problemas em um grande raio de influência (Borma e Soares, 2002; Nascimento et al., 2002; Nieto et al., 2007; Nordstrom e Alpers, 1999; Soares e Trindade 2002).

Segundo Féris (2001), após gerada, a DAM provoca um grande número de reações e fenômenos físico-químicos em série durante sua migração no recurso hídrico atingido como: (a) precipitação de hidróxidos metálicos que se depositam ao longo do caminho do fluxo das águas percoladas; (b) adsorção ou bioacumulação de íons de metais pesados; (c) reações de troca iônica; (d) complexação metálica por substâncias húmicas do solo; e (e) precipitação de

sulfetos insolúveis.

Devido ao seu potencial poluidor hídrico, empreendimentos que possam gerar DAM devem monitorar sistematicamente as águas superficiais e subterrâneas em sua área de influência. Para novas instalações, um programa de monitoramento que anteceda a implantação poderá auxiliar na concepção de medidas preventivas ou corretivas ainda na fase de projeto. Para isso, Borma e Soares (2002) propõem a coleta das seguintes informações para águas superficiais e subterrâneas: (a) identificação e quantificação dos usuários das águas potencialmente afetadas pela área de disposição; (b) medidas de fluxo médio e máximo das águas superficiais para as estações, seca e chuvosa; (c) determinação das variações da qualidade da água ao longo do ano para os diferentes fluxos; (d) determinação da configuração do corpo hídrico; (e) medidas de nível d'água subterrânea; (f) medida do volume disponível no aquífero e taxa de recarga; e (g) determinação do coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica do material granular ou rocha fraturada na qual o aquífero se localiza.

A região carbonífera de Santa Catarina, principalmente pelo volume de carvão extraído e as características de suas jazidas, que possuem maior quantidade de enxofre, é a que apresenta maiores transtornos relacionados aos rejeitos de carvão. A descoberta do carvão ocorreu em 1822 e sua extração se dava manualmente, o que possibilitava uma lavra seletiva. A partir da década de 40, com o surgimento da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), a exploração de carvão na região foi intensificada. Na década de 60 foi abandonada a mineração seletiva, quando foram instalados pré-lavadores nas bocas das minas para produzir o chamado "carvão pré-lavado", com o intuito de diminuir o teor de cinzas do carvão ROM. Durante várias décadas, a região carbonífera do Estado de Santa Catarina foi explorada sem os cuidados necessários à preservação do meio ambiente, causando um acúmulo de rejeitos e estéreis em toda a região, e, conseqüentemente, um imenso impacto ambiental comprometendo uma área superior a 5.000 ha. Assim, os Governos Federal e Estadual solidariamente com 22 mineradoras de carvão de Santa Catarina foram condenados em sentença da Justiça Federal, em janeiro de 2000, a promover toda a recuperação ambiental da região afetada pela mineração. Desde então as empresas da região, juntamente com o poder público, vêm investindo na recuperação da área bem como em pesquisa e desenvolvimento para diminuir a quantidade de resíduos gerados e dar um novo destino aos que já foram dispostos (Cassemiro et al., 2004; Farias, 2002; Nascimento et al., 2002; Soares e Trindade, 2002; Vaz, 2003;). Em maio de 2005, a Fundação do Meio Ambiente do Estado de Santa

Catarina (FATMA) e as empresas mineradoras firmaram um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC), visando estabelecer as obrigações mínimas que serão cumpridas pelas empresas, possibilitando a adequação legal de suas atividades de mineração, compreendendo a exploração mineral propriamente, o transporte, o beneficiamento e a deposição dos resíduos sólidos de mineração.

2.4. Sustentabilidade na Mineração

Segundo Araujo (2007), a mineração é a principal atividade provedora de materiais para a humanidade. Os desafios tecnológicos, econômicos, sociais e ambientais que se colocam para a indústria mineral requerem aperfeiçoamento e o contínuo desenvolvimento de novos métodos de mineração e de processamento de minerais que permitam minimizar os impactos e fornecer os produtos necessários para o crescimento econômico mundial. A mineração é fundamental para a manutenção do nível de vida e para o avanço das sociedades modernas.

Conforme Quintanilha (2009), a mineração abrange, em seu ciclo produtivo, basicamente de oito etapas: (a) pesquisa para a localização do minério; (b) prospecção para a determinação da extensão e valor do minério localizado; (c) estimativa dos recursos em termos de extensão e teor do depósito; (d) planejamento, para avaliação da parte do depósito economicamente extraível; (e) estudo de viabilidade para avaliação global do projeto e tomada de decisão entre iniciar ou abandonar a exploração do depósito; (f) desenvolvimento de acessos ao depósito que se vai explorar; (g) exploração com vistas à extração de minério; e (h) recuperação da zona afetada pela exploração.

Hoje em dia há uma intensa discussão cuja pauta versa sobre questões ambientais, como as mudanças climáticas e a escassez de recursos naturais. Neste contexto, surge a necessidade de maximização e otimização do uso de matéria-prima e insumos, bem como de minimização e correção dos impactos de uma atividade mineira em todo seu ciclo de vida. Artigos relatam que o desenvolvimento sustentável na mineração, apesar de seu inerente e elevado potencial poluidor, é possível desde que todas as partes interessadas ou *stakeholders* se envolvam (Blignaut e Hassan, 2001; Buchanan e Brenley, 1994; Chikkatur, 2009; Farias, 2002; Lockie et al., 2009; Machado, 2000; Magena e Brent, 2006).

A Figura 12 demonstra três categorias de “partes interessadas” em uma determinada atividade empresarial (Savitz, 2006). A categoria “Interna” engloba as partes de dentro da

organização (empregados, gerentes, investidores). A “Cadeia de Valor” são os *stakeholders* de fora da organização, mas com ligação direta nos negócios da empresa (clientes, fornecedores). A categoria “Externa” são as partes interessadas externas à organização e sem ligação direta nos negócios da organização (órgãos ambientais, mídia, comunidade).

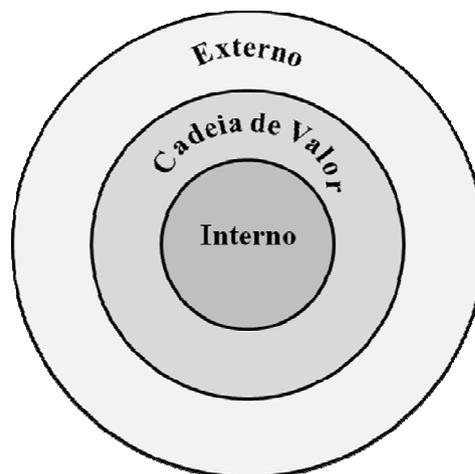


Figura 12: Categorias de partes interessadas (Savitz, 2006).

A Comissão Brundtland realizada no ano de 1987 definiu o “Desenvolvimento Sustentável” como a capacidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazerem suas próprias necessidades. Conforme Savitz (2006), o conceito “sustentabilidade” surgiu na década de 80 com o intuito de fazer as nações acharem caminhos para continuar a crescer economicamente sem destruir o meio ambiente ou a sociedade futura. Neste sentido, a sustentabilidade empresarial, baseada no desenvolvimento sustentável, assegura o sucesso do negócio em longo prazo e ao mesmo tempo contribui para o desenvolvimento econômico e social da comunidade ao longo dos anos, deixando um meio ambiente saudável e uma sociedade estável. Assim, a preocupação dos países em desenvolvimento em como gerir e explorar seus recursos minerais vem crescendo cada vez mais.

A mineração sustentável, não significa manter constantes as reservas já existentes, mas sim fazer com que estas continuem beneficiando a economia e a sociedade no mesmo fluxo que agora. Sem quebra de paradigmas e com a insustentável exploração das fontes minerais exauríveis, a capacidade de gerar a mesmas divisas e empregos no futuro é reduzida (Blignaut e Hassan, 2001). Devido a sua contribuição à degradação ambiental em toda sua cadeia produtiva, a sustentabilidade empresarial em curto prazo será fundamental para que as

empresas mineradoras diminuam seus custos com passivos ambientais e melhorem sua imagem perante a sociedade e poder público. A sustentabilidade pode ainda facilitar a obtenção de crédito através da adoção de boas práticas, investidores passam a analisar as contingências ambientais e sociais impostas às empresas como fatores de risco a serem embutidos nas operações, o que faz elevar ou cair à taxa de investimentos nessas empresas. Algumas instituições financeiras nos últimos anos têm cortado relações com empresas que tenham um risco socioambiental elevado assim como têm criado linhas de crédito facilitado para empresas que apresentem um bom desempenho socioambiental.

O clássico modelo de sustentabilidade, “*Triple Botton Line*” ou “Tripé da Sustentabilidade”, sugere três critérios fundamentais para a avaliação do desempenho empresarial: o social, o econômico e o ambiental. Este modelo mede o impacto no mundo, das atividades de uma empresa. Um *Triple Botton Line* positivo é refletido em um aumento no valor da organização incluindo o valor de mercado e lucros e seu capital humano, social e ambiental. A Tabela 2 mostra de maneira bem simplificada alguns indicadores que podem ser usados para mensurar o grau de comprometimento ou o índice de sustentabilidade de uma organização (Savitz, 2006).

Tabela 2: “Tripé da sustentabilidade” (Savitz, 2006).

Indicadores	Econômico	Ambiental	Social
	Vendas, lucros	Qualidade do ar	Práticas laborais
Pagamentos de impostos	Qualidade da água	Impactos na comunidade	
Fluxo monetário	Uso de energia	Direitos humanos	
Trabalhos criados	Geração de resíduos	Produto responsável	
TOTAL	TOTAL	TOTAL	

No Brasil, os principais problemas oriundos da mineração podem ser englobados em cinco categorias: poluição da água, poluição do ar, poluição sonora, poluição do solo e subsidência do terreno. Estes problemas também chamados de externalidades, se agravam a partir do momento que a mineradora não se preocupa com uma das principais “partes interessadas” envolvidas no processo, a comunidade. Para evitar que isto ocorra, diversas empresas estão promovendo os estudos necessários à implantação da ISO 14.001, tendo importantes empresas já implantado essa norma assim como sistemas de gestão integrados (qualidade, meio ambiente e segurança). Em geral, as empresas de mineração já vêem a necessidade de serem internalizados os custos de recuperação ambiental e, já reconhecem como legítimas as reivindicações das comunidades, incorporando em suas práticas a

responsabilidade social (Farias, 2002; Quintanilha, 2009). Como ferramenta para assegurar o cumprimento dos requisitos das normas (ISO 14.001, OSHAS 18.001, AS 8000, ISO 26.000), e conseqüente aumento dos índices de sustentabilidade da empresa a aplicação dos conceitos de Prevenção da Poluição e Produção mais Limpa podem auxiliar a atividade. Conforme SENAI (2003), entre os benefícios da implantação de P+L em atividades industriais estão a eliminação de desperdício, a redução de resíduos e emissões, a redução nos custos de gerenciamento dos resíduos, a minimização dos passivos ambientais, a valorização da imagem da empresa, o aumento de produtividade, a conscientização dos funcionários e a redução de gastos com penalidades.

Assim, de acordo com Chikkatur (2009), os principais desafios para que a sustentabilidade no setor carbonífero ocorra em países em desenvolvimento são: (a) os sistemas de exploração, extração e processamento de carvão; (b) as conseqüentes preocupações sócio-ambientais com o setor, devido principalmente a disposição dos rejeitos e impacto nos recursos hídricos; (c) o aumento da demanda de carvão no setor de geração de energia, devido principalmente à poluição atmosférica e conseqüente aumento na taxa de emissão de CO₂.

Conforme *Energy Information Administration* (2008), a participação total projetada do carvão como fonte de combustível para produção de energia no mundo vai continuar crescendo ou pelo menos se manterá constante até 2030. Como mostra a Tabela 3, o consumo mundial de carvão para eletricidade aumentará cerca de 8% até 2030, em relação à 2005, e o consumo para fim industrial ficará praticamente estável.

Tabela 3: Participação do carvão na energia mundial (*Energy Information Administration, 2008*).

Setor	Participação em %		
	2005	2015	2030
Eletricidade	42,3	44,6	45,6
Industrial	24,2	24,1	24,4
Outros setores	3,8	3,8	3,1
Total	26,5	28,0	29,1

Segundo Balanço Energético Nacional, o consumo de carvão mineral no Brasil para a geração de energia elétrica, cresceu 16% no ano de 2008 em relação ao ano de 2004. Demonstrando uma tendência na manutenção no consumo de carvão mineral para os próximos anos para fins de energia elétrica, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Consumo anual de carvão mineral para a geração de energia elétrica no Brasil

Descrição	Consumo (ton x 1000)					
	2004	2005	2006	2007	2008	$\Delta\%$ (2004-2008)
Geração de energia elétrica	4.575	4.994	5.500	5.074	5.441	16

Fonte: Balanço energético nacional – BEN (2006-2009)

Por fim, sabe-se que o carvão mineral é um recurso natural abundante e barato, mas historicamente é um recurso inerentemente poluidor e basicamente utilizado para a produção de energia (CCICED, 2003). Portanto, com a perspectiva de expansão do parque termoeletrico a carvão no Brasil, a sustentabilidade no setor carbonífero nacional, torna-se de fundamental importância para o meio ambiente, para a sociedade, para a economia e para os negócios de uma mineradora, sendo pré-requisito para garantir a capacidade de sustentar o aumento da produção de carvão no país e fazê-lo de uma forma ambientalmente e socialmente aceitável.

Neste sentido, trabalhos vêm sendo desenvolvidos com a intenção de promover o desenvolvimento sustentável no setor buscando a reinserção dos rejeitos de carvão no mercado, através da maximização do seu aproveitamento e da minimização de seu potencial poluidor.

Feil (2007) demonstrou através da avaliação pelo teor de cinzas dos rejeitos produzidos nas operações de beneficiamento, que é possível o reaproveitamento de até 15% dos resíduos gerados nas minas do Faxinal e Butiá Leste localizadas no estado do Rio Grande do Sul, podendo aumentar a recuperação através da “blendagem” de carvões.

A DAM gerada por pilhas de carvão, contendo consideráveis teores de enxofre, ácido sulfúrico, sulfato férrico e metais, serviu de base para diversos estudos.

Barbosa et al.(2002), com a caracterização tecnológica dos rejeitos demonstra a possibilidade de geração de enxofre através eletroxidação de sulfetos a enxofre elementar a partir de concentrados com teores de 20% de pirita, observando a oportunidade de redução na importação de enxofre e conseqüente redução da massa de resíduos disposta.

Menezes e Schneider (2007) desenvolveram uma rota hidrometalúrgica para a produção de uma solução concentrada de sulfato férrico a partir de rejeitos de carvão. O processo consistiu na recirculação de água em uma coluna de leito empacotado preenchida com rejeito de carvão, em circuito fechado, sob condições oxidantes e presença de bactérias acidofílicas. O resultado foi a obtenção de um concentrado rico em sulfato férrico, sulfato de alumínio e algumas impurezas. O lixiviado foi aplicado como coagulante no tratamento de

esgoto, com resultados equivalentes aos coagulantes comerciais. Vigânico et al.(2009), apresentou uma rota inovadora para a produção cristais de sulfato ferroso n-hidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) através de rejeitos piritosos com um concentrado contendo cerca de 40% de enxofre total, através de processos hidrometalúrgicos e fotoquímicos. Ainda, a geração de nanopartículas de óxido de ferro (Wei e Viadeiro, 2007) e de pigmentos inorgânicos (Marcello et al., 2008) foram observadas.

Assim, com a utilização dos rejeitos para a geração de energia elétrica e para a fabricação de co-produtos, os teores de enxofre e metais são reduzidos nos depósitos, diminuindo a DAM e reduzindo os níveis de poluentes lixiviados. Aumentando assim os índices de sustentabilidade no setor carbonífero: (a) no âmbito ambiental, com a redução da pressão sob os recursos naturais; (b) no âmbito social, com a movimentação da economia local e redução do impacto na comunidade; e (c) no âmbito econômico, com a abertura de novos mercados (agricultura, saneamento, alimentação, indústria química).

3. EXPERIMENTAL

3.1. Materiais

O rejeito empregado no presente trabalho, equipamentos e reagentes estão detalhados a seguir.

3.1.1. Rejeito de carvão

O rejeito utilizado neste estudo é oriundo do módulo B de rejeitos da Carbonífera Criciúma S/A e é tratado como um resíduo de beneficiamento, sem utilização comercial, caracterizado segundo NBR 10.004 (ABNT, 2004b) como um “resíduo não perigoso” – Classe II – “não inerte”. O módulo B está inserido na Unidade de Mineração II – Verdinho, Município de Forquilha, SC, em uma área de 1.200.000 m² compreendida pelas coordenadas geográficas 651400 a 653500 Leste e 6814850 a 68113600 Sul (Sistema Universal Transverso de Mercator - UTM), hidrologicamente posicionada na bacia hidrográfica do rio Araranguá, drenada pelo Rio Sangão, afluente do rio Mãe Luiza (Schneider, 2006). As operações de lavra em escala industrial na UM II – Verdinho, tiveram início em junho de 1982, considerando instalações e equipamentos dimensionados para produzir 2.760.000 de toneladas anuais de carvão ROM (Schneider, 2006). Hoje em dia, estão dispostos especificamente no módulo B cerca de 11 milhões de toneladas de rejeitos oriundos das etapas de beneficiamento do carvão mineral. A Figura 13 mostra a vista superior na unidade mineira II da CCSA, seus limites, identificados pela linha tracejada, assim como a localização do módulo B no complexo industrial.



Figura 13: Vista superior da Carbonífera Criciúma

3.1.2. Equipamentos

Os equipamentos empregados no presente trabalho estão listados a seguir:

- a) agitador magnético Fisatom, modelo 752A;
- b) amostrador;
- c) analisador de enxofre Leco, modelo SC 432;
- d) balança analítica Leco, modelo Leco 250;
- e) chapa de aquecimento jung, modelo 400;
- f) conjunto de peneiras;
- g) dessecador
- h) difratômetro de raios X Siemens, modelo D5000.
- i) estufa Quimis, modelo Q. 318-24;
- j) forno-mufla Quimis;
- k) lupa petrográfica Olympus SZ X7;
- l) moinho de disco orbital;
- m) pHmetro digital Digimed, modelo DMPH-2, com eletrodo DME-CV1;
- n) termômetro de mercúrio Incoterm, modelo 5003
- o) vibrador de peneira Plangg S.A.;

3.1.3. Reagentes

Os reagentes empregados no presente trabalho foram:

- a) ácido clorídrico, marca Merck, P.A.;
- b) álcool etílico, marca Ecibra, P.A.;
- c) hidróxido de sódio, marca Nuclear, P.A.;
- d) oxigênio industrial, marca AGA.
- e) percloroetileno, marca Vetec, P.A.;
- f) tribromometano, marca Vetec, P.A.;
- g) xileno, marca Vetec, P.A.;

3.2. Métodos

A Figura 14 apresenta um fluxograma da metodologia experimental. As amostras para a realização deste estudo foram enviadas pela Carbonífera Criciúma S/A. As amostras foram homogeneizadas e quarteadas. Após realizou-se a separação manual do lodo do restante dos rejeitos, realizou-se a classificação granulométrica, ensaios de afunda-flutua e análises do material em termos do teor de cinzas e enxofre. Ainda, avaliou-se o potencial de geração de acidez as amostras pelo método de contabilização de ácidos e bases tradicional (método ABA). Por fim, visualizou-se o carvão em uma lupa com 50 vezes de aumento.

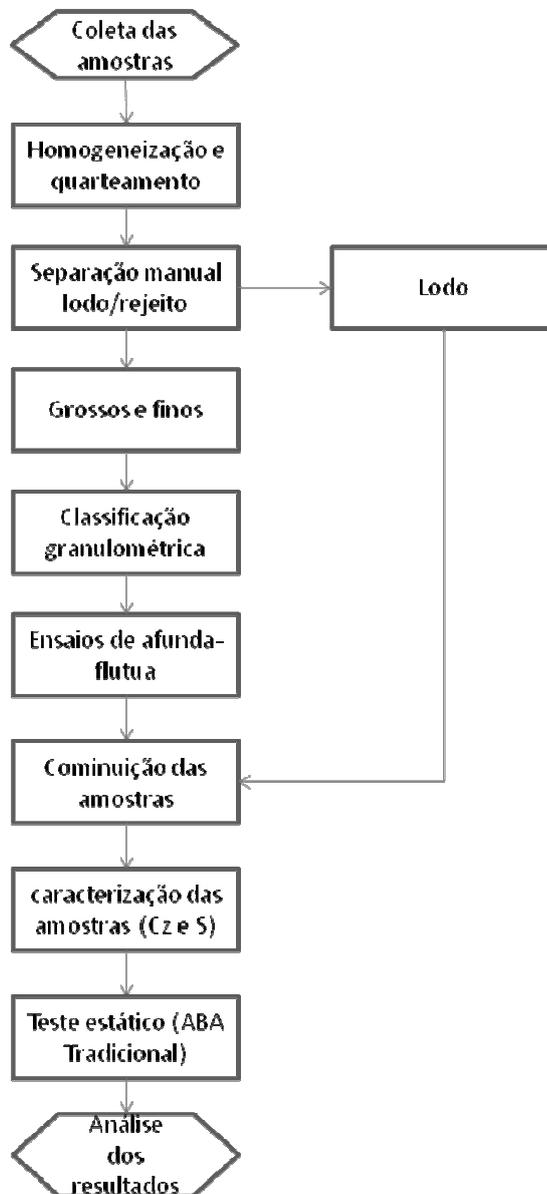


Figura 14: Fluxograma da metodologia experimental da pesquisa.

3.2.1 Amostragem

Com o intuito de avaliar a capacidade de aproveitamento dos rejeitos dispostos no Módulo B de rejeitos da CCSA, duas sondagens nomeadas, “A” e “B”, foram realizadas nos pontos situados conforme a Figura 15. Os pontos amostrados foram perfurados através de trado mecânico, com diâmetro de 40 centímetros. As perfurações ocorreram até o aparecimento de água. A partir deste momento a sondagem cessava devido ao desmoronamento da base do poço, o que inviabilizava a continuação da perfuração sem revestimento.



Figura 15: Localização dos pontos amostrados no módulo B.

A cada 5 metros de profundidade foi coletada uma amostra. Observa-se na Tabela 05 que o ponto A foi perfurado até 10 metros gerando 2 amostras nomeadas “A(0,0 - 5,0)” e “A(5,0 -10,0)”. O ponto B foi sondado até 8,5 metros e foram formadas, 2 amostras nomeadas de “B(0,0 - 5,0)” e “B(5,0 - 8,5)”. Assim as quatro amostras foram encaminhadas para avaliação das características dos rejeitos dispostos no módulo.

Tabela 5: Descrição das amostras analisadas.

Sondagem	Profundidade amostrada (m)	Nome das amostras	Provável ano de disposição
A	5,0	A(0,0 - 5,0)	2008
A	10,0	A(5,0 - 10,0)	2007
B	5,0	B(0,0 - 5,0)	2008
B	8,5	B(5,0 - 8,5)	2007

Conforme informações da Carbonífera Criciúma S.A., as amostras mais profundas foram dispostas na pilha de rejeitos no ano de 2007 e as mais próximas à superfície no ano de 2008. Estas amostras são representativas dos 10 m superiores da pilha, que apresenta atualmente 30 m de altura, com tempo de disposição do material não superior a 2 anos.

3.2.2 Caracterização das amostras

Para caracterização das amostras, foram realizados os procedimentos analíticos descritos a seguir.

3.2.2.1 Homogeneização e quarteamento

Cada uma das quatro amostras recebidas foram homogeneizadas e quarteadas conforme NBR 10007(ABNT, 2004b), para se obter a melhor mistura e representatividade possível do material a ser analisado. Após o quarteamento os rejeitos foram colocados para secar à 60°C em uma estufa, durante 24 horas, para retirar o excesso de umidade e facilitar a separação manual.

3.2.2.2 Separação manual “lodo/rejeito”

Após o processo de beneficiamento, os rejeitos graúdos e finos são encaminhados diretamente para o módulo B. A água do processo, contendo uma grande quantidade de sólidos suspensos e sedimentáveis, é dirigida para bacias de decantação como operação de separação sólido/líquido para o descarte ou reuso da água. O lodo formado nestas bacias é encaminhado para o módulo B para ser dispostos juntamente com os demais rejeitos. Este material, extremamente fino, é colocado intercalado entre as camadas de rejeito para diminuir o número de vazios na pilha, com o objetivo de limitar a percolação de água e atenuar a geração de DAM. Entretanto, no módulo de rejeito, esse material apresenta-se em forma de torrões, não se mostrando viável para o beneficiamento gravimétrico. Assim, esse material foi separado manualmente das frações particuladas e preparado para análise de cinzas e enxofre.

3.2.2.3 Classificação granulométrica

Para a realização da classificação granulométrica do material foram utilizadas peneiras e um “agitador mecânico de peneiras”. O rejeito foi peneirado e dividido nas frações “-50,8 mm +2,0 mm”, chamados de “grossos do rejeito”, e “-2,0 mm +0,1 mm”, chamados de “finos do rejeito”, o passante na peneira de 0,1 mm, foi incorporado ao lodo. As faixas granulométricas foram escolhidas de acordo com as especificações utilizadas na planta de beneficiamento mineral da UM-II, Verdinho, da Carbonífera Criciúma S.A. A Figura 16 apresenta a metodologia experimental aplicada para a avaliação granulométrica das amostras analisadas.

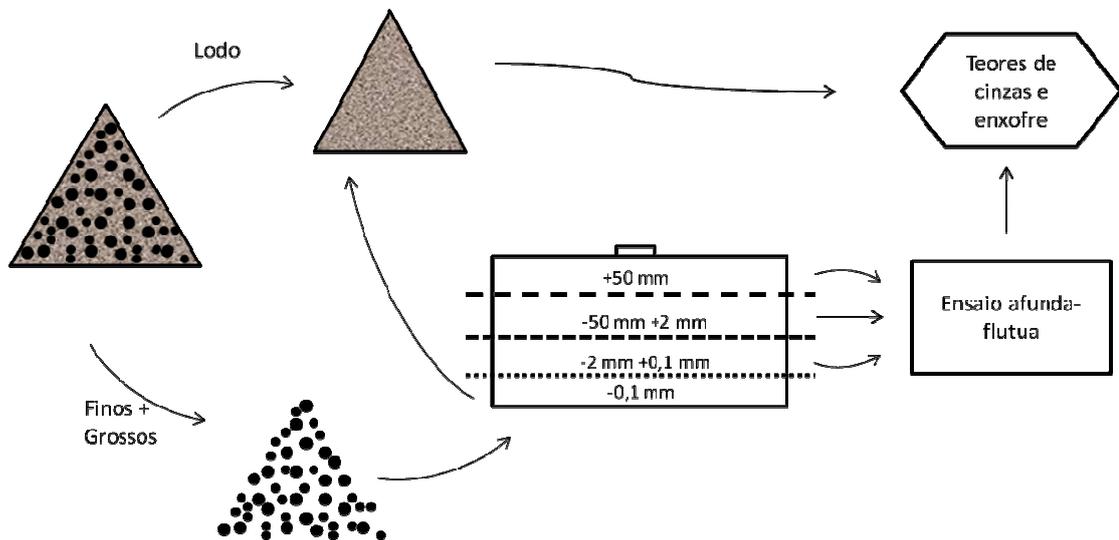


Figura 16: Metodologia experimental para classificação granulométrica.

A Tabela 6 apresenta as peneiras utilizadas na pesquisa classificadas de acordo com seu diâmetro aproximado. Com a intenção de se verificar um maior grau de liberação das amostras foram realizadas britagens do material para “-19,0 mm +2,0 mm” e “-12,7 mm +2,0 mm”.

Tabela 6: Diâmetro aproximado das peneiras utilizadas na pesquisa.

ASTM	TYLER	Abertura máxima (mm)
2"	----	50,8
3/4"	----	19,0
1/2"	----	12,7
10	9	2,0
140	150	0,106

3.2.2.4 Ensaios de Afunda-flutua

Após a classificação granulométrica dos finos e dos grossos dos lotes quarteados (A e B), realizou-se ensaios de separação por meios densos (afunda-flutua), conforme NBR 8738 – Carvão Mineral – Ensaios Densimétricos (ABNT, 1985), nas densidades relativas de 1,5, 1,7, 2,0, 2,2, 2,4 e 2,8. O objetivo dos testes foi obter as curvas de separabilidade densimétrica dos pontos “A(0,0 - 5,0)”, “A(5,0 - 10,0)”, “B(0,0 - 5,0)” e “B(5,0 - 8,5)”, no intervalos granulométricos de “-50,8 mm +2,0 mm” (grossos) e de “-2,0 mm +0,1 mm” (finos). E posteriormente para “-19,0 mm +2,0 mm” e “-12,7 mm +2,0 mm”,

Os líquidos densos orgânicos utilizados para os ensaios foram o tribromometano, também denominado bromofórmio, com densidade relativa de 2,81 e fórmula química CHBr_3 e o tetracloroetileno (ou percloroetileno), com densidade relativa 1,62 e fórmula C_2Cl_4 . Para diluição dos líquidos densos com a intenção de se obter as densidades relativas desejadas foi utilizado o solvente orgânico xileno (C_8H_{10}), de densidade relativa 0,86. A preparação dos meios densos se dava, quando necessário, através de uma mistura destes líquidos. Para a densidade relativa de 1,5 utilizaram-se apenas tetracloroetileno diluído com xileno e a mistura desses com o tribromometano para as densidades relativas entre 1,8 e 2,4. Para a densidade relativa 2,8 foi utilizado somente o tribromometano. A Tabela 7 apresenta a relação dos reagentes utilizados.

Tabela 7: Reagentes usados para o ensaio de afunda-flutua.

<i>Nome</i>	<i>Líquidos densos</i>		<i>Solvente</i>
	<i>Tribromometano</i>	<i>Tetracloroetileno</i>	<i>Xileno</i>
<i>Sinônimo</i>	<i>Bromofórmio</i>	<i>Percloroetileno</i>	<i>Xilol</i>
<i>Fórmula molecular</i>	<i>CHBr_3</i>	<i>C_2Cl_4</i>	<i>C_8H_{10}</i>
<i>Densidade</i>	<i>2,81</i>	<i>1,62</i>	<i>0,86</i>
<i>Frações de aplicação</i>	<i>1,7 – 2,8</i>	<i>1,5 – 2,4</i>	<i>1,5 – 2,4</i>
<i>Fornecedor</i>	<i>Vetec Química Fina</i>	<i>Vetec Química Fina</i>	<i>Vetec Química Fina</i>
<i>n° CAS</i>	<i>75-25-2</i>	<i>127-18-4</i>	<i>95-47-6</i>

Após a preparação do meios densos foram realizados os ensaios de afunda-flutua isoladamente em todas as amostras. Para a realização destes ensaios foram utilizados os seguintes materiais: béquer (de polipropileno e de vidro), papel filtro, funil, escumadeira, bastão de vidro e balança com capacidade para 5 kg. A Figura 17 representa um exemplo dos equipamentos utilizados nos testes densimétricos.

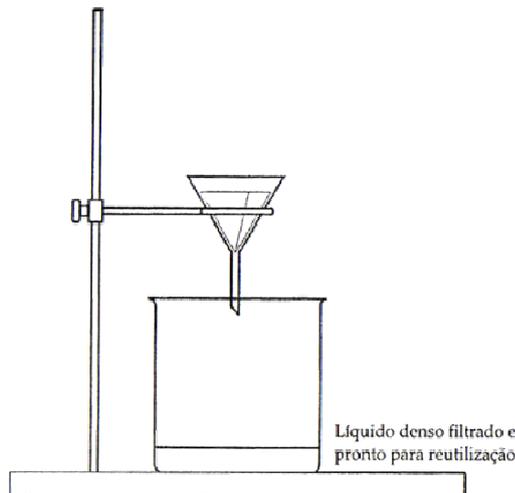


Figura 17: Fracionamento densimétrico de partículas utilizando um funil de separação (modificado de Tavares e Sampaio, 2005).

A massa total de cada amostra foi imersa inicialmente no recipiente contendo o meio denso de menor densidade, neste caso o meio com densidade relativa de 1,5. Um bastão de vidro foi usado para auxiliar na separação e liberar as partículas aderidas na parede do béquer. A fração que flutuou foi retirada com o auxílio de uma escumadeira da superfície do líquido, e despejada em um funil forrado com papel filtro. A seguir a parcela afundada era removida do recipiente seguindo a metodologia anterior. Ambas as frações (flutuadas e afundadas) foram secas à temperatura ambiente para evaporação do líquido orgânico. O meio denso é deixado escorrer em um papel filtro podendo ser reutilizado. O material afundado na densidade anterior (inferior) foi mais uma vez imerso em novo recipiente contendo o líquido denso na densidade imediatamente superior, neste caso a densidade relativa de 1,7. O material flutuado foi removido como no procedimento anterior e seco. O afundado foi retirado do fundo do recipiente e posteriormente seco. Esse procedimento foi repetido nas demais densidades até atingir a densidade relativa máxima do ensaio: 2,8, conforme esquema da Figura 18.

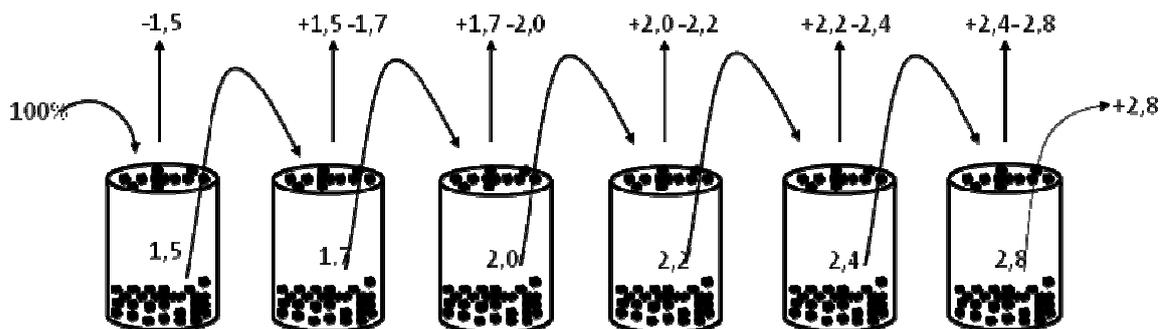


Figura 18: Procedimento experimental do ensaio afunda-flutua.

As frações flutuadas nas densidades relativas de 1,5 a 2,8, juntamente com a porção afundada em 2,8 foram pesadas, sendo calculadas suas participações na massa total. Os resultados obtidos foram colocados em planilhas eletrônicas do programa Microsoft Excel para posterior avaliação.

3.2.2.5 Avaliação dos teores de cinzas e enxofre

Para a avaliação dos teores de cinzas e enxofre, o lodo e as amostras de rejeito “grossas” e “finas”, já devidamente peneiradas e separadas por densidade, foram cominuídas em um moinho de disco orbital e peneiradas em uma peneira de diâmetro máximo de 0,25 mm (Tyler #60). O passante, aproximadamente 8 g, foi acondicionado para as posteriores análises.

Para caracterização dos resíduos em relação ao teor de cinzas, foi utilizada a NBR 8289 – Carvão mineral – Determinação do teor de cinzas (ABNT, 1983a). Aproximadamente 1 g de amostra, em um cadinho de porcelana, era pesada, em uma balança analítica, e colocada em forno-mufla frio. Após atingir a temperatura de 850°C, aguardava-se 1 hora. Na seqüência as amostras foram retiradas e colocadas em um dessecador. Depois de atingir a temperatura ambiente eram pesadas novamente para avaliar o teor de cinzas em base úmida. Para a determinação do teor de cinzas base seca, os resultados eram corrigidos de acordo com o teor de umidade da amostra, medido pela secagem de 1 g de amostra, por 1 hora a 110°C até a estabilização do peso da amostra, conforme a norma NBR 8293 (ABNT, 1983b) – Carvão mineral – Determinação de umidade. O material utilizado para a determinação de umidade foi: placa de Petry, balança analítica, estufa e dessecador.

O teor de enxofre total foi medido em um analisador de enxofre Leco SC-432. A umidade das amostras foi retirada, conforme procedimento acima, e, aproximadamente 0,1 g de amostra foi pesada em uma balança analítica acoplada ao equipamento, para a realização dos ensaios.

Todas as análises referentes aos teores de cinzas e enxofre foram realizadas em duplicata. Em caso de incoerência nos resultados a metodologia experimental era repetida. Os resultados obtidos foram colocados em planilhas eletrônicas do programa Microsoft Excel para posterior avaliação.

3.2.2.6 Ensaios estáticos de contabilização de ácidos e bases

Os ensaios estáticos foram realizados pelo método tradicional de contabilização de ácidos e bases (ABA). O objetivo foi determinar o balanço entre a produção de acidez (AP) e consumo de acidez – neutralização (NP), pelos componentes minerais da amostra (Sobek et al, 1978; EPA, 1994).

Pelo método ABA a determinação do potencial de acidez (AP) foi realizada a partir da análise de enxofre total, realizada via instrumental no equipamento LECO SC 432. O cálculo foi realizado pela seguinte equação:

$$AP = \left(\frac{1000}{32} \right) \times \%S_{total} \quad (1)$$

Para a determinação do potencial de neutralização (NP), inicialmente procedeu-se um teste *fizz*, que teve por finalidade definir o volume e a concentração (normalidade) de ácido clorídrico empregado na análise. O desenvolvimento deste teste é o seguinte: duas gotas de HCl 25 % é adicionado em 0,5 g de amostra. O objetivo da adição do ácido é verificar a presença de carbonatos na amostra, o qual pode ser reconhecido pelo borbulhamento ou pelo som efervescente. Dependendo da intensidade do som, as amostras foram padronizadas segundo a Tabela 8.

Tabela 8: Volume e normalidade de HCl a ser adicionado na determinação do NP.

Teste fizz	HCl (mL)	HCl (N)
Nenhum	20	0,1
Fraco	40	0,1
Moderado	40	0,5
Forte	80	0,5

Fonte: Sobek et al. (1978)

Conhecido o volume e a normalidade do HCl, mediu-se o potencial de neutralização. O procedimento consistiu em submeter 2 g de amostra a uma solução ácida (com o volume e

normalidade (N) determinados pelo teste *fizz*) e aquecer a 90°C para consumir os minerais neutralizantes. Após, titulou-se a solução ácida com NaOH (com a mesma normalidade do ácido) até pH 7. O potencial de neutralização, em kg CaCO₃/t de amostra, foi calculado com as seguintes equações:

$$C = \frac{mlHCl(PB)}{mlNaOH(PB)} \quad \dots(2)$$

$$Eq. \text{ác. consumido} = (ml \text{ác. ad.}) - (ml \text{base ad.}) \times C \quad \dots(3)$$

$$NP = (Eq. \text{ác. consumido}) \times 25,0 \times (N \text{ácido}) \quad \dots(4)$$

Onde: C = constante; PB = prova em branco; N = normalidade; ad.= adicionado;

Todos os ensaios ABA foram realizados em duplicata. Os dados obtidos permitiram também calcular os seguintes índices:

$$NNP = NP - AP \quad \dots(5)$$

$$NPR = NP/AP \quad \dots(6)$$

Os critérios ABA para identificação do potencial de geração de acidez dos materiais são (NNP e NPR):

- valores de NNP menores que - 20 indicam que haverá a formação de ácido;
- valores de NNP maiores que + 20 indicam que não haverá a formação de ácido;
- valores de NNP entre -20 e + 20 indicam que é difícil prever a formação ou não de ácido.

- valores do NPR menores 1:1 indicam a provável geração de DAM;
- valores de NPR entre 1:1 e 2:1 indicam a possível geração de DAM;
- valores de NPR entre 2:1 e 4:1 indicam que a DAM não é esperada;
- valores de NPR maiores que 4:1 indicam que não será gerada a DAM.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos em cada um dos pontos de amostragem bem como um cenário levando em consideração a utilização final da pilha. Os resultados serão interpretados de acordo com as propriedades, a granulometria e a profundidade do material no módulo de rejeitos. Por fim, alguns cenários para o aproveitamento do material depositado serão avaliados.

Foi verificado que é possível dividir o módulo B de rejeitos da CCSA em três frações distintas para possível aproveitamento a partir de seu re-beneficiamento. Nas menores densidades obtém-se uma fração para uso como matéria prima em termoelétricas, enquanto que na fração mais densa, com alto teor de pirita, se obtém um material para ser utilizado na geração de produtos comercializáveis desenvolvidos a partir de rejeitos de carvão, podendo atingir diversos mercados (agricultura, saneamento, alimentação, indústria química). Por fim nas densidades intermediárias encontra-se um subproduto que pode servir como base para estudos que visem o desenvolvimento de novas tecnologias (materiais alternativos para construção civil ou para preenchimento da mina no seu encerramento).

Para a avaliação do potencial de aproveitamento energético do rejeito em termoelétricas que utilizem carvões com altos teores de cinzas e enxofre, foram utilizadas as especificações da Usina Termoelétrica do Extremo Sul Catarinense – USITESC (combustão em leito fluidizado circulante), que, a partir de sua implantação, aceitará, para queima, carvões com até 67,0% de cinzas e 3,2% de teor de enxofre total.

As especificações da usina termoelétrica de Jorge Lacerda foram utilizadas para a verificação do potencial de aproveitamento do rejeito em usinas termoelétricas convencionais (combustão em leito pulverizado). Localizada no município de Capivari de Baixo, estado de Santa Catarina, esta usina recebe carvões energéticos produzidos na região, incluindo os oriundos da UM II - Verdinho, e aceita um produto com até 43,0% de cinzas e 2,3% de teor de enxofre.

Em relação à geração de produtos comercializáveis a partir da pirita, estudos demonstram que com valores a partir de 20,0% de pirita é possível produzir enxofre, sulfato férrico e sulfato ferroso utilizando como matéria-prima rejeitos de carvão (Barbosa et al., 2002; Colling et Al., 2009; Menezes e Schneider, 2007; Vigânico et Al., 2009).

4.1. Caracterização Granulométrica e Densimétrica das Amostras Coletadas

Após a segregação manual e peneiramento das seis amostras observou-se que não houve material retido pela peneira de 50,8 mm. De acordo com a metodologia experimental os resultados mostraram três faixas granulométricas: uma de grossos ou graúdos (-50,8 mm +2,0 mm), uma fração de finos (-2,0 mm +0,1 mm) e uma fração muito fina (-0,1 mm) referente ao lodo das bacias de decantação. A seguir os resultados analíticos de cada um dos pontos serão apresentados isoladamente.

No ponto de amostragem A, atingiu-se a profundidade de 10 metros, proporcionando duas amostras chamadas de “A(0,0 - 5,0)” e “A(5,0 - 10,0)”.

A Figura 19 mostra a distribuição granulométrica obtida após as etapas de segregação manual e peneiramento da amostra “A(0,0 - 5,0)”. As Tabelas 09 e 10 apresentam os resultados das análises de cinzas e enxofre total obtidos para cada faixa densimétrica, respectivamente para a fração grossa e para a fração fina. A Tabela 11 apresenta os resultados das análises de cinzas e enxofre para o lodo das bacias de decantação. Pode-se observar que esta amostra é composta por 72% de grossos, 14% de finos e 14% do lodo. Na fração grossa, o teor de cinzas acumulado é de 75,9% e o teor de enxofre total acumulado é de 8,1%. Na fração fina, o teor de cinzas acumulado é de 73,9% e o teor de enxofre total acumulado é de 5,9%. O lodo apresenta 69,1% de cinzas e 3,0% de enxofre total.

A Figura 20 representa a distribuição granulométrica do material da amostra “A(5,0 - 10,0)”. As Tabelas 12 e 13 mostram os resultados analíticos de cinzas e enxofre obtidos para as sete faixas de densidade relativa analisadas. A Tabela 14 apresenta os resultados das análises de cinzas e enxofre total para o lodo das bacias de decantação. Observa-se que 50% da massa da amostra mais profunda do ponto A é composta de grossos, enquanto que 10% são de finos e em torno de 40% são referentes ao lodo. Na fração grosseira o teor de cinzas acumulado é de 81,8% e o teor de enxofre total acumulado é de 4,9%. Os finos apresentaram um teor de cinzas acumulado de 72,2% e 4,4% de enxofre total. Para o lodo das bacias de decantação os resultados demonstraram um teor de cinzas de 64,0% e um teor de enxofre total de 2,3%.

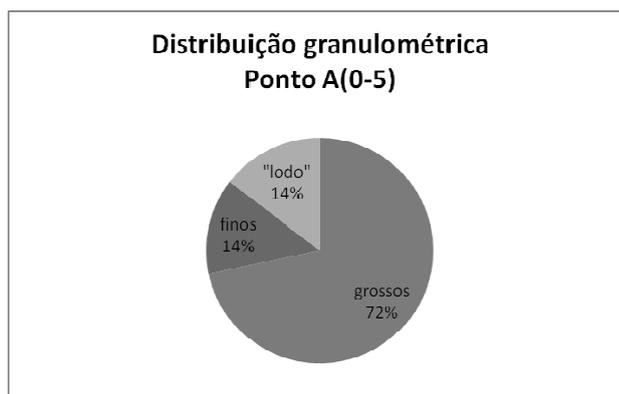


Figura 19: Distribuição granulométrica do ponto A(0,0 - 5,0)

Tabela 9: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “grossa”, granulometria de -50,8 mm +2,0 mm, do ponto A(0,0 - 5,0).

Ponto A (0,0 - 5,0)						
Granulometria: -50,8 mm +2,0 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
FI 1,5	0,2	20,8	1,8	0,2	20,8	1,8
FI 1,7	1,6	34,3	1,8	1,8	32,8	1,8
FI 2,0	4,5	57,0	2,9	6,4	50,0	2,6
FI 2,2	8,2	69,0	2,5	14,6	60,7	2,5
FI 2,4	18,0	79,6	2,3	32,6	71,1	2,4
FI 2,8	53,4	82,0	3,9	86,0	77,9	3,3
Af 2,8	14,0	63,4	37,6	100,0	75,9	8,1

Tabela 10: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “fina”, granulometria de -2,0 mm +0,1 mm, do ponto A(0,0 - 5,0).

Ponto A (0,0 - 5,0)						
Granulometria: -2,0 mm +0,1 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
FI 1,5	2,3	17,4	1,9	2,3	17,4	1,9
FI 1,7	4,7	33,3	2,5	7,0	28,0	2,3
FI 2,0	8,6	59,9	4,0	15,7	45,6	3,2
FI 2,2	13,8	70,5	4,7	29,4	57,2	3,9
FI 2,4	36,8	78,8	4,6	66,2	69,2	4,3
FI 2,8	28,4	82,7	6,1	94,6	73,2	4,8
Af 2,8	5,4	71,6	24,5	100,0	73,2	5,9

Tabela 11: Análises de cinzas e enxofre total do “lodo”, granulometria de -0,1 mm, do ponto A(0,0 - 5,0)

Ponto A(0,0 - 5,0)		
Granulometria: -0,1 mm		
massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)
100,0	69,1	3,0

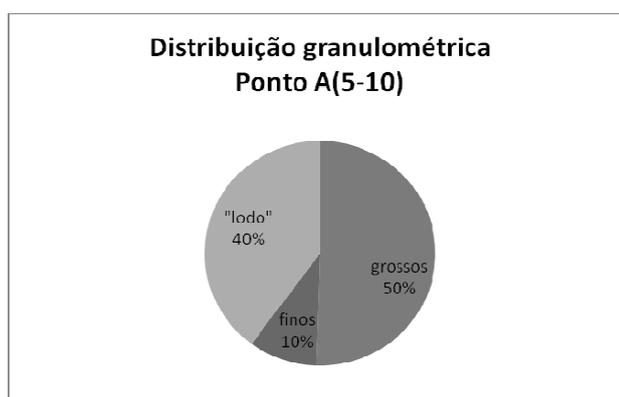


Figura 20: Distribuição granulométrica do ponto A(5,0 - 10,0).

Tabela 12: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “grossa”, granulometria de -50,8 mm +2,0 mm, do ponto A(5,0 - 10,0).

Ponto A (5,0 - 10,0)						
Granulometria: -50,8 mm +2,0 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
FI 1,5	0,1	20,4	1,6	0,1	20,4	1,6
FI 1,7	0,5	33,2	1,6	0,6	30,3	1,6
FI 2,0	5,9	59,5	1,8	6,6	56,6	1,8
FI 2,2	7,2	66,4	2,7	13,8	61,7	2,3
FI 2,4	16,0	76,9	2,5	29,7	69,9	2,4
FI 2,8	61,7	90,2	0,7	91,5	83,6	1,3
Af 2,8	8,5	63,6	43,4	100,0	81,8	4,9

Tabela 13: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “fina”, granulometria de -2,0 mm +0,1 mm, do ponto A(5,0 - 10,0) .

Ponto A (5,0 - 10,0)						
Granulometria: -2,0 mm +0,1 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
FI 1,5	2,1	15,0	1,6	2,1	15,0	1,6
FI 1,7	3,7	30,7	2,1	5,8	25,0	1,9
FI 2,0	12,8	57,7	2,1	18,6	47,4	2,0
FI 2,2	11,3	65,5	3,1	29,9	54,3	2,4
FI 2,4	15,5	75,5	4,2	45,4	61,5	3,0
FI 2,8	31,6	85,2	3,2	77,0	71,2	3,1
Af 2,8	23,0	75,5	8,9	100,0	72,2	4,4

Tabela 14: Análises de cinzas e enxofre total do “lodo”, granulometria de -0,1 mm, do ponto A(5,0 - 10,0).

Ponto A (5,0 - 10,0)		
Granulometria: -0,1 mm		
massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)
100,0	64,0	2,3

A amostragem no ponto B atingiu a profundidade de 8,5 metros, proporcionando duas amostras chamadas de “B(0,0 - 5,0)” e “B(5,0 - 8,5)”.

A Figura 21 mostra a distribuição granulométrica obtida após as etapas de segregação manual e peneiramento da amostra “B(0,0 - 5,0)”. As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados das análises de cinzas e enxofre obtidos para cada faixa densimétrica, respectivamente para a fração grossa (-50,8 mm +2,0 mm) e para a fração fina (-2,0 mm +0,1 mm). A Tabela 17 apresenta os resultados das análises de cinzas e enxofre para o lodo das bacias de decantação. Pode-se observar que esta amostra é composta por 68% de grossos, 17% de finos e 15% do lodo. Na fração grossa, o teor de cinzas acumulado é de 85,1% e o teor de enxofre total acumulado é de 8,0%. Na fração fina, o teor de cinzas acumulado é de 75,6% e o teor de enxofre total acumulado é de 6,6%. O lodo apresenta 66,1% de cinzas e 3,1% de enxofre total.

A Figura 22 representa a distribuição granulométrica do material da amostra “B(5,0 - 8,5)”. As Tabelas 18 e 19 mostram os resultados analíticos de cinzas e enxofre obtidos para as sete faixas de densidade analisadas. A Tabela 19 apresenta os resultados das análises de cinzas e enxofre para o lodo das bacias de decantação. Observando os dados da amostra mais profunda do ponto B percebe-se que 83% da massa do material são de granulometria grosseira e 17% é de granulometria fina. Especificamente no ponto “B(5,0 - 8,5)” não houve presença do lodo oriundo das bacias de decantação. A fração de maior granulometria dos rejeitos desta amostra apresentou um teor de cinzas acumulado de 82,3% e um teor de enxofre total acumulado de 6,2%, enquanto que os dados da fração de finos demonstram um teor de cinzas acumulado de 74,9% e um teor de enxofre total acumulado de 3,9%.

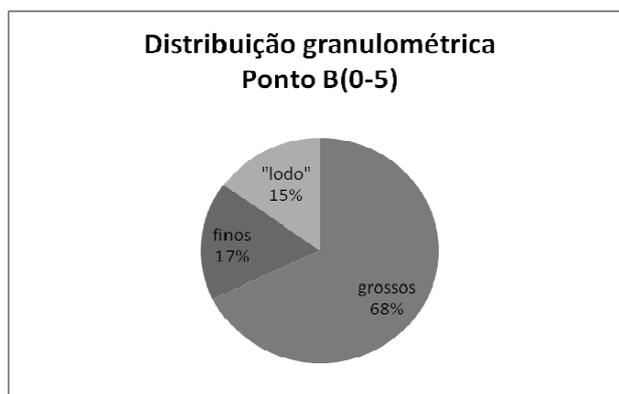


Figura 21: Distribuição granulométrica do ponto B(0,0 - 5,0).

Tabela 15: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “grossa”, granulometria de -50,8 mm +2,0 mm, do ponto B(0,0 - 5,0).

Ponto B (0,0 – 5,0)						
Granulometria: -50,8 mm +2,0 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
FI 1,5	0,2	21,2	1,4	0,2	21,2	1,4
FI 1,7	0,6	36,4	1,5	0,8	33,2	1,5
FI 2,0	3,9	60,6	1,9	4,7	56,0	1,8
FI 2,2	5,8	70,4	2,5	10,5	64,0	2,2
FI 2,4	11,6	82,0	2,0	22,1	73,5	2,1
FI 2,8	60,2	93,9	1,8	82,2	88,4	1,9
Af 2,8	17,8	69,5	36,5	100,0	85,1	8,0

Tabela 16: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “fina”, granulometria de -2,0 mm +0,1 mm, do ponto B(0,0 - 5,0)

Ponto B (0,0 - 5,0)						
Granulometria: -2,0 mm +0,1 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
FI 1,5	2,0	15,9	1,7	2,0	15,9	1,7
FI 1,7	3,0	29,6	1,9	5,1	24,1	1,8
FI 2,0	14,8	59,8	2,2	19,9	50,7	2,1
FI 2,2	13,1	70,5	3,0	33,0	58,6	2,5
FI 2,4	18,6	79,0	3,3	51,6	66,0	2,8
FI 2,8	36,0	87,5	3,9	87,6	74,8	3,2
Af 2,8	12,4	81,6	30,1	100,0	75,6	6,6

Tabela 17: Análises de cinzas e enxofre total do “lodo”, granulometria de -0,1 mm, do ponto B(0,0 - 5,0)

Ponto B (0,0 - 5,0)		
Granulometria: -0,1 mm		
massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)
100,0	66,1	3,1

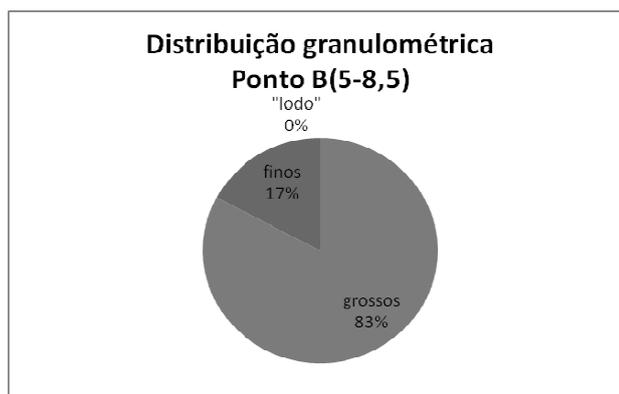


Figura 22: Distribuição granulométrica do ponto B(5,0 - 8,5).

Tabela 18: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “grossa”, granulometria de -50,8 mm +2,0 mm, do ponto B(5,0 - 8,5).

Ponto B (5,0 - 8,5)						
Granulometria: -50,8 mm +2,0 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
F1 1,5	0,3	23,5	1,5	0,3	23,5	1,5
F1 1,7	0,4	32,8	2,4	0,7	29,0	2,1
F1 2,0	3,6	56,5	2,1	4,3	52,0	2,1
F1 2,2	9,0	68,4	2,8	13,3	63,1	2,6
F1 2,4	14,0	79,1	3,4	27,3	71,3	3,0
F1 2,8	63,1	89,8	2,7	90,4	84,2	2,8
Af 2,8	9,6	64,2	38,5	100,0	82,3	6,2

Tabela 19: Análises de cinzas e enxofre total por faixa densimétrica da fração “fina”, granulometria de -2,0 mm +0,1 mm, do ponto B (5,0 - 8,5)

Ponto B (5,0 - 8,5)						
Granulometria: -2,0 mm +0,1 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
F1 1,5	4,4	25,1	2,5	4,4	25,1	2,5
F1 1,7	6,9	45,6	3,2	11,3	37,7	3,0
F1 2,0	5,2	54,5	3,1	16,5	42,9	3,0
F1 2,2	9,3	70,4	4,4	25,8	52,9	3,5
F1 2,4	20,7	80,5	5,1	46,5	65,1	4,2
F1 2,8	45,5	85,8	2,5	92,0	75,4	3,4
Af 2,8	8,0	69,4	9,5	100,0	74,9	3,9

4.2. Análise por Faixa Granulométrica das Amostras

A Tabela 20 resume os resultados analíticos para teor de cinzas e enxofre total nas três frações granulométricas estudadas das quatro amostras coletadas conforme metodologia experimental.

Tabela 20: Teor acumulado de cinzas e enxofre total por faixa granulométrica.

Fração	Análise	Ponto de Amostragem			
		A (0,0 - 5,0)	A (5,0 - 10,0)	B (0,0 - 5,0)	B (5,0 - 8,5)
Grossa	Cz (%)	75,9	81,8	85,1	82,3
	S (%)	8,1	4,9	8,0	6,2
Fina	Cz (%)	73,2	72,2	75,6	74,9
	S (%)	5,9	4,4	6,6	3,9
Lodo	Cz (%)	69,1	64,0	66,1	-
	S (%)	3,0	2,3	3,1	-

A partir dos dados da Tabela 20, alguns aspectos podem ser observados. O teor de cinzas é menor para as frações mais finas. Essa tendência foi observada em todos os pontos amostrados (Figura 23). Os resultados demonstram que há um menor conteúdo de material inorgânico incombustível nas faixas de menores granulometrias, indicando a possibilidade de maior quantidade de carbono nas frações mais finas. Este fato pode estar relacionado há uma maior eficiência no processo de beneficiamento da fração grosseira se comparado à fração de finos de carvão mineral, conforme é demonstrado na Figura 6, onde se obtém uma maior eficiência na separação gravimétrica das frações de maiores diâmetros.

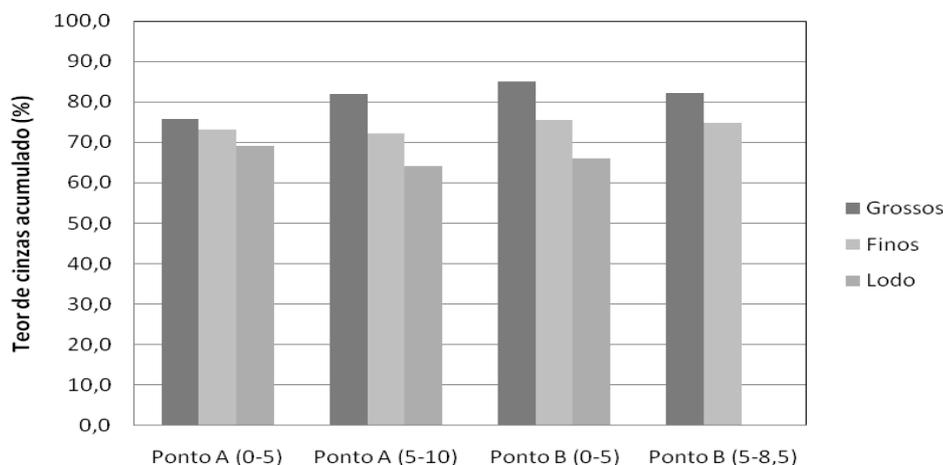


Figura 23: Teor de cinzas acumulado por faixa granulométrica.

Em relação ao teor de enxofre, verificou-se uma tendência de redução à medida que a granulometria diminui. Esta tendência foi observada em todos os pontos amostrados (Figura 24). Esse fato pode ser explicado pela maior área superficial exposta dos grãos de pirita na partículas mais finas. À medida que a área superficial de contato aumenta, a oxidação da pirita pela ação da água, oxigênio (catalisado por bactérias acidofílicas) é mais eficiente, proporcionando uma maior lixiviação do enxofre (Kontopoulos, 1998).

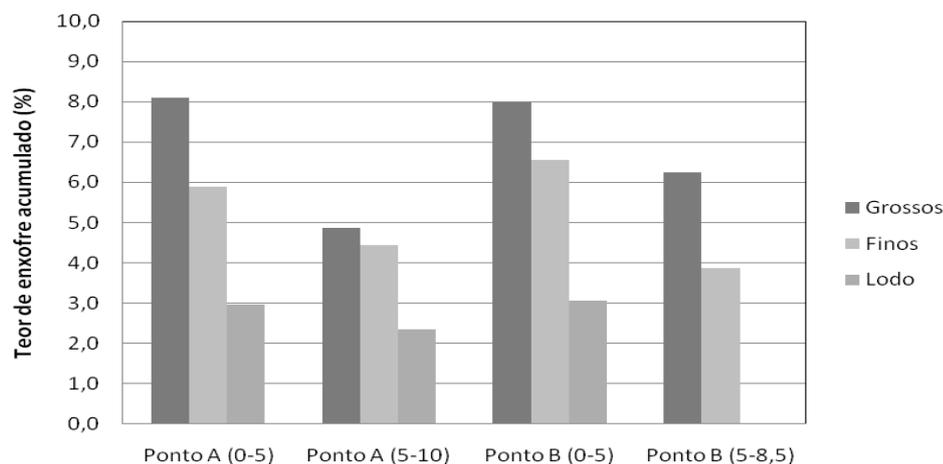


Figura 24: Teor de enxofre total acumulado por faixa granulométrica.

Ainda, em relação ao enxofre total, os teores foram menores nas amostras mais profundas (Figura 25). Esta observação pode ser explicada pelo fato de o material estar a mais tempo sendo submetido à ação do intemperismo, propiciando a oxidação da pirita e geração DAM.

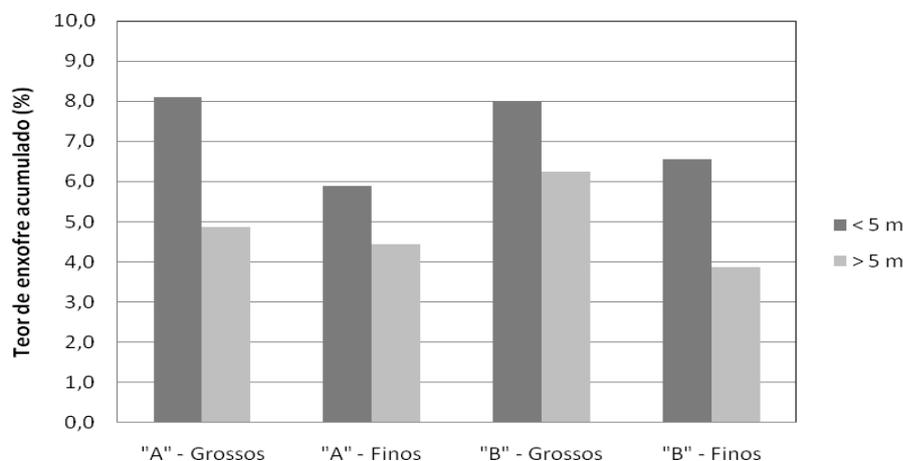
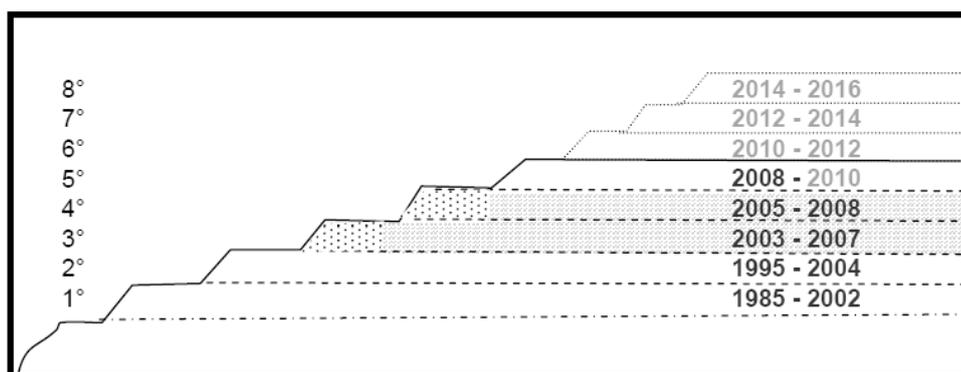


Figura 25: Teor de enxofre acumulado em relação a profundidade da amostra

A Figura 26 mostra uma esquematização do tempo de disposição dos resíduos na pilha. Cada camada do módulo possui aproximadamente 5 metros de altura. De acordo com informações fornecidas pela CCSA, estima-se que as partes superiores dos pontos amostrados foram dispostas no ano de 2008, enquanto que as amostras mais profundas foram depositadas no módulo no ano de 2007. Observa-se que os teores de enxofre acumulados nos pontos mais profundos são menores que nos pontos mais próximos à superfície. Assim, conclui-se que quanto maior o tempo de material no módulo de rejeito, menor é seu teor de enxofre.



PROVAVEL IDADE DOS REJEITOS AMOSTRADOS

A(0-5) = 2008 / A(5-10) = 2007

B(0-5) = 2008 / B(5-8,5) = 2007

Fonte: CCSA, 2009.

Figura 26: Estimativa do tempo de disposição no módulo B dos rejeitos amostrados

4.3. Análise por Faixa Densimétrica das Amostras

Para auxiliar na análise densimétrica, realizou-se uma ponderação dos resultados obtidos nas análises granulométricas de cada amostra. A Figura 27 mostra a massa dos resultados ponderados obtidos na classificação granulométrica considerando as 4 amostras estudadas. Assim, as frações na pilha como um todo são: 68% grossos, 15% finos e 17% lodo.

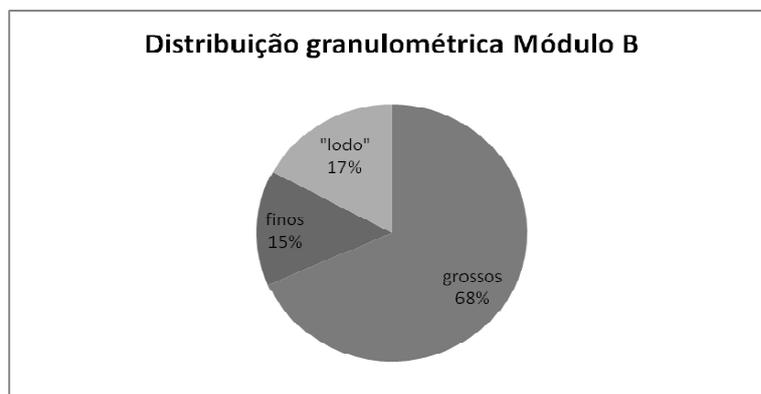


Figura 27: Distribuição granulométrica das amostras analisadas.

Realizando-se a ponderação dos resultados da granulometria grosseira, se obtém os valores apresentados na Tabela 21, a partir dos quais foram construídas as curvas de separabilidade densimétrica mostrados na Figura 28. Esses dados permitem uma análise teórica, considerando uma eficiência de 100% na operação de beneficiamento gravimétrico. Para a venda de carvão energético para as termoelétricas atualmente em operação, o corte deve ser realizado na faixa densimétrica de 1,9. Neste caso, a recuperação em massa será de somente 3,1%, com um produto com 43,0% de cinzas e 1,8% de enxofre. Para a venda em termoelétricas que operam com alto teor de cinzas, o corte pode ser realizado na densidade relativa de 2,3. A recuperação mássica será de aproximadamente 17,2%, com um produto com 67,0% de cinzas e 2,4% de enxofre total. A fração com densidade intermediária (Fl 2,4 e Fl 2,8) representa 74,5% do material. O teor de cinzas é da ordem de 87,2% e o teor de enxofre de 2,3%. A fração com densidade acima de 2,8, que poderia ser comercializada, por exemplo, para a produção de ácido sulfúrico, tem uma recuperação mássica teórica de 12,5% com um teor de enxofre de 38,4%, (que corresponde a aproximadamente 72% de pirita).

Tabela 21: Resultados da ponderação dos dados da fração “grossa”.

Ponderação fração “grossa” Granulometria: -50,8 mm +2,0 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	enxofre acumulado (%)
Fl 1,5	0,2	21,8	1,6	0,2	21,8	1,6
Fl 1,7	0,8	34,3	1,8	1,0	31,8	1,8
Fl 2,0	4,5	58,5	2,2	5,5	53,7	2,1
Fl 2,2	7,6	68,5	2,6	13,1	62,3	2,4
Fl 2,4	14,9	79,2	2,5	27,9	71,3	2,5
Fl 2,8	59,6	89,2	2,2	87,5	83,5	2,3
Af 2,8	12,5	65,7	38,4	100,0	81,3	6,8

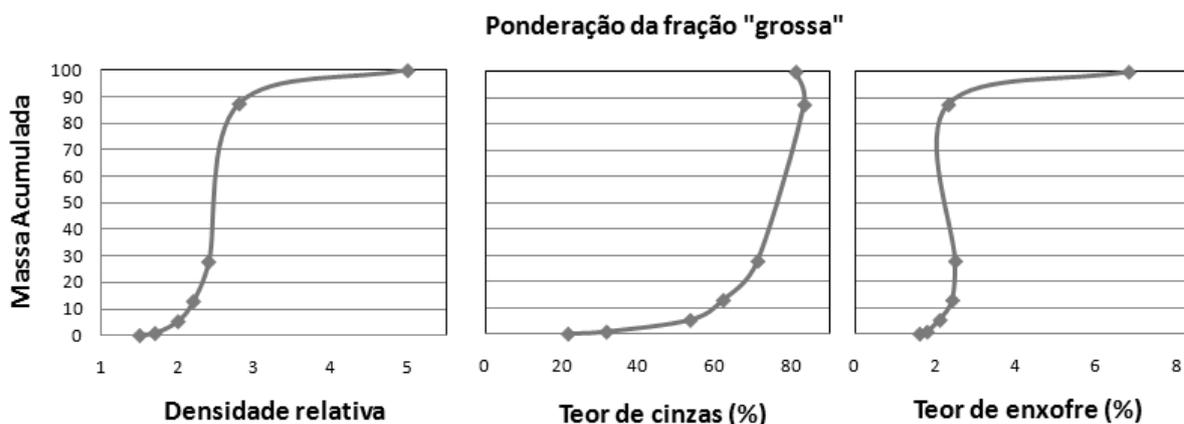


Figura 28: Curvas de separabilidade densimétrica da fração “grossa”.

Realizando-se a ponderação dos resultados do material fino, se obtêm os valores apresentados na Tabela 22, a partir dos quais foram construídas as curvas de separabilidade densimétrica mostrados na Figura 29. Estes dados permitem uma avaliação teórica da recuperação do rejeito levando em consideração 100% de eficiência nos equipamentos. Para a venda em termoelétricas, com as especificações da Jorge Lacerda, através de um corte densimétrico em 1,6, obtêm-se uma recuperação em massa de 5,9%, com teores de cinzas e enxofre correspondentes à 26,2% e 2,3%, respectivamente. Para a venda em termoelétricas que operam com alto teor de cinzas, o corte pode ser realizado na densidade relativa de 2,3. A recuperação mássica será de aproximadamente 34,1%, com um produto com 58,5% de cinzas e 3,2% de enxofre total. A fração com densidade intermediária (FI 2,4 e FI 2,8) representa 58,3% do material. O teor de cinzas é da ordem de 82,8% e o teor de enxofre de 4,0%. A fração com densidade acima de 2,8, tem uma recuperação mássica teórica de 12,2% com um teor de enxofre total de 16,1% (aproximadamente 30% de pirita).

Tabela 22: Resultados da ponderação dos dados da fração “fina”.

Ponderação da fração fina						
Granulometria: -2,0 mm +0,1 mm						
densidade relativa	massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)	massa acumulada (%)	cinzas acumulada (%)	Enxofre acumulado (%)
FI 1,5	2,7	19,8	2,1	2,7	19,8	2,1
FI 1,7	4,6	36,8	2,6	7,3	30,5	2,4
FI 2,0	10,3	58,5	2,6	17,7	46,9	2,5
FI 2,2	11,9	69,3	3,8	29,5	55,9	3,0
FI 2,4	22,9	78,6	4,4	52,4	65,8	3,6
FI 2,8	35,4	85,5	3,7	87,8	73,7	3,7
Af 2,8	12,2	75,6	16,1	100,0	74,0	5,2

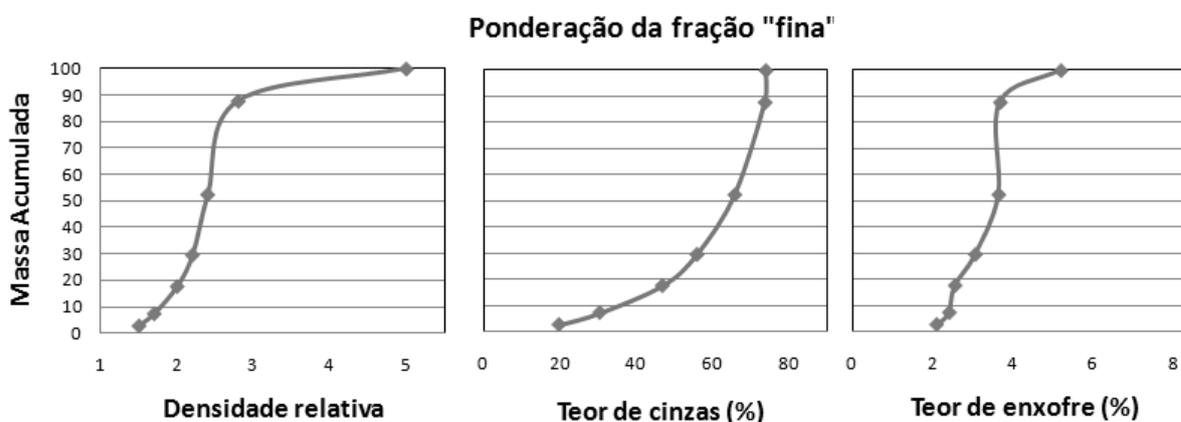


Figura 29: Curvas de separabilidade densimétrica da fração “fina”.

São mostrados na Tabela 23 os resultados obtidos com a ponderação dos dados analíticos do lodo oriundo das bacias de decantação. Observa-se que a totalidade do lodo pode ser utilizada como matéria prima em termoelétricas que aceitem carvões com altos teores de cinzas e enxofre com uma recuperação teórica de 17% da massa total do módulo B com 65,5% de cinzas e 2,6% de enxofre.

Tabela 23: Resultados da ponderação dos dados da fração “lodo”.

Ponderação do lodo		
Granulometria: -0,1 mm		
massa (%)	cinzas (%)	enxofre (%)
100	65,5	2,6

A Figura 30 apresenta, em um mesmo gráfico, a massa recuperada em função da densidade relativa para o material grosso e fino. Observa-se que nas menores densidades relativas, a recuperação teórica de massa acumulada das frações mais finas é consideravelmente maior que nas frações grosseiras de rejeito. Por exemplo, a recuperação mássica dos finos flutuados na densidade relativa de 2,0 é de 18%, enquanto que nos grossos a recuperação mássica é de somente 5%.

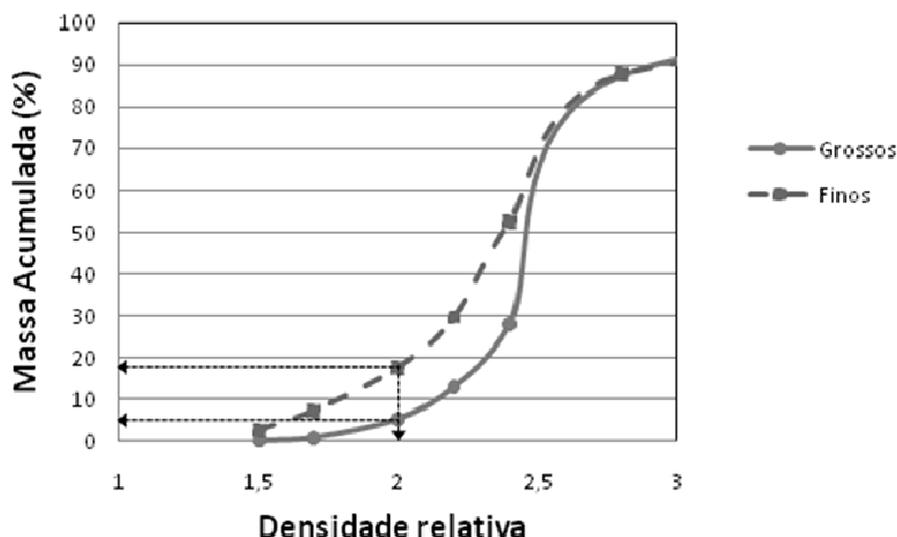


Figura 30: Massa acumulado em função da densidade de corte para as frações “grossas” (+50,8 mm -2,0 mm) e para as frações “finas” (-2,0 mm +0,1 mm) do material presente no módulo de rejeito.

A Figura 31 mostra, em gráfico de colunas, o teor de cinzas para cada fração densimétrica. Observa-se que à medida que a densidade relativa aumenta os teores de cinza também se elevam. Essa tendência somente não se observa na fração mais densa, uma vez que esta fração apresenta maior quantidade de pirita, que é degradada na operação de queima. A Figura 32 apresenta o teor de enxofre total para cada fração densimétrica. Verifica-se que o teor de enxofre varia de 1,6 a 2,6% nas frações grossas e de 2,1 a 4,4% nas frações finas, passando para 38,4 e 16,1%, respectivamente, para a fração com densidade superior a 2,8.

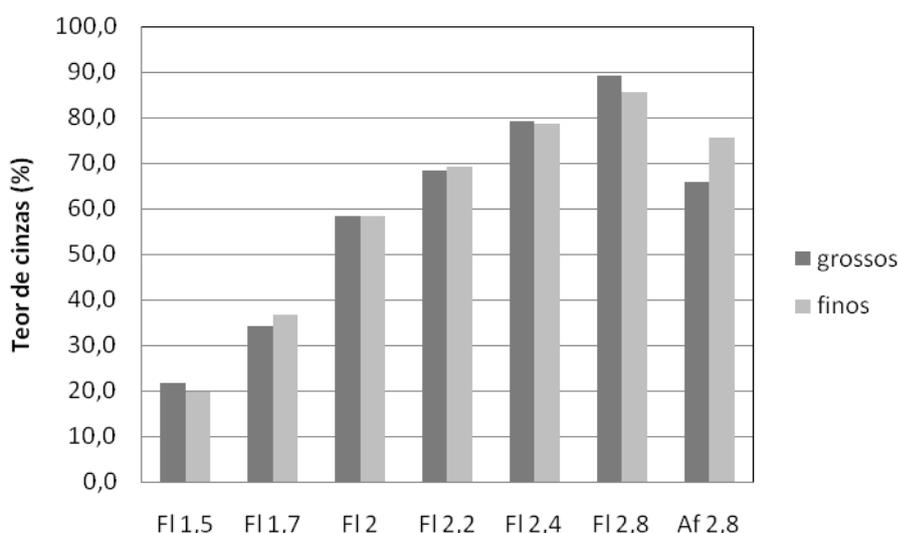


Figura 31: Resultados do teor de cinzas por faixa densimétrica.

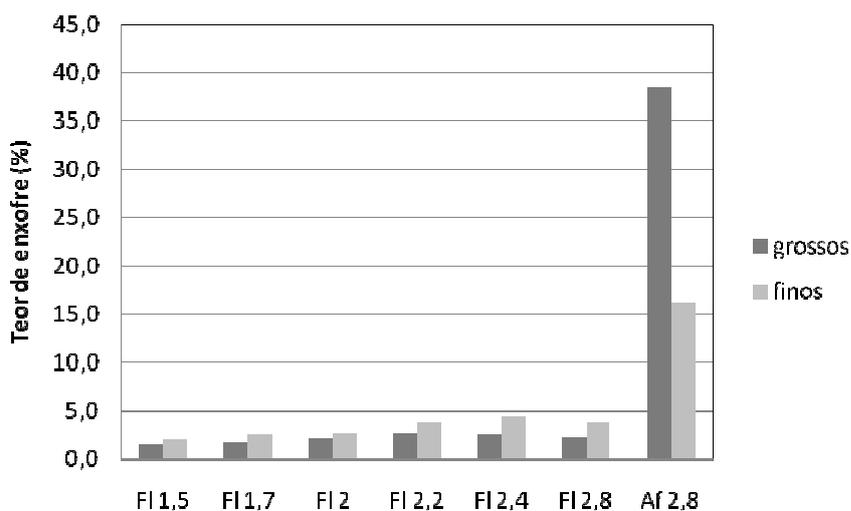


Figura 32: Resultados do teor de enxofre por faixa densimétrica.

Por fim, procurou-se avaliar a possibilidade de rebitagem do material grosso a fim de se aumentar a liberação do carvão dos minerais com maior densidade relativa. O material de

granulometria “-50,8 mm +2,0 mm” foi britado para a fração entre “-19,0 mm +2,0 mm” e para a fração “-12,7 mm +2,0 mm”. Pode-se observar que as três curvas ficaram sobrepostas, não sendo observada liberação nenhuma do material após a britagem. Isto deve-se ao fato na de uma maior eficiência no processamento mineral das partículas com diâmetro maior em relação aos finos de carvão, conforme demonstrado na Figura 6.

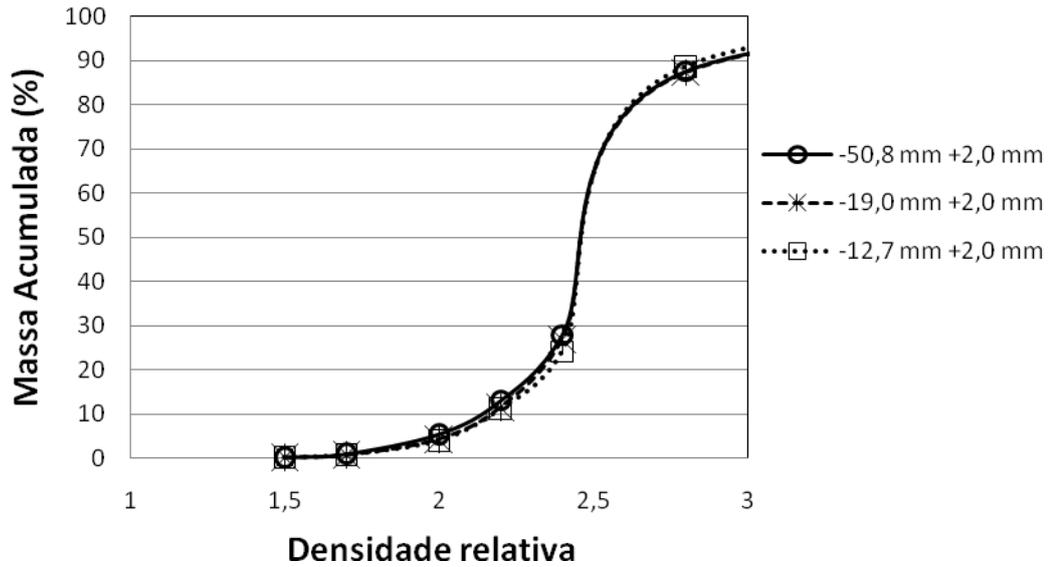


Figura 33: Massa acumulada em função da densidade de corte para a fração grossa original e após a rebritagem do material presente no módulo de rejeito.

4.4. Características das Frações Densimétricas

Nas Figuras 34 a 39 são apresentadas imagens obtidas das amostras em uma lupa petrográfica.



Figura 34: Flutuado em 1,5 (-50,8 mm +2,0 mm)



Figura 35: Flutuado em 1,5 (-2,0 mm +0,1 mm)



Figura 36: Flutuado em 2,8 (-50,8 mm +2,0 mm)

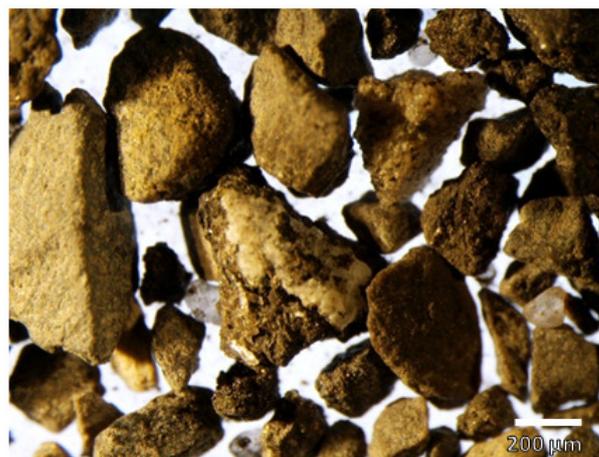


Figura 37: Flutuado em 2,8 (-2,0 mm +0,1 mm)

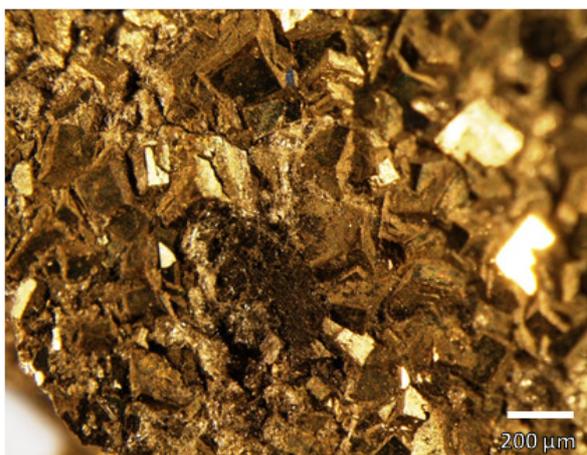


Figura 38: Afundado em 2,8 (-50,8 mm +2,0 mm)

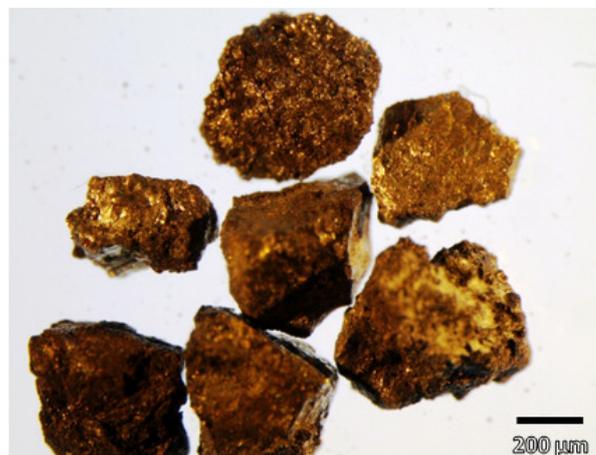


Figura 39: Afundado em 2,8 (-2,0 mm +0,1 mm)

Observa-se que nas faixas menos densas (Figura 34 e Figura 35) o material apresenta uma coloração mais escura, devido a presença de matéria orgânica. A matéria orgânica, no entanto, apresenta-se de forma disseminada. Nas frações intermediárias (Figura 36 e Figura 37), flutuadas em 2,8, a coloração já é amarronada e fosca e o material apresenta-se quebradiço, demonstrando uma alta quantidade de minerais inorgânicos. Em densidade superior a 2,8 (Figura 38 e Figura 39), o material apresenta claramente uma elevada concentração de pirita.

Nas figuras 40 a 45 são apresentados os resultados das análises de difração de raios-X. A amostra da fração leve foi formada por materiais de densidades flutuadas de 1,5 a 2,2, a amostra da fração intermediária foi formada pelos flutuados em 2,4 e 2,8 e, por fim, a fração densa foi formada pelos afundados na densidade relativa de 2,8. Os principais compostos cristalinos estão apresentados na Tabela 24.

Pode-se verificar que na fração leve o componente majoritário é o quartzo. Na fração intermediária o componente majoritário é o quartzo. E, na fração densa os componentes majoritários encontrados foram a pirita e o quartzo.

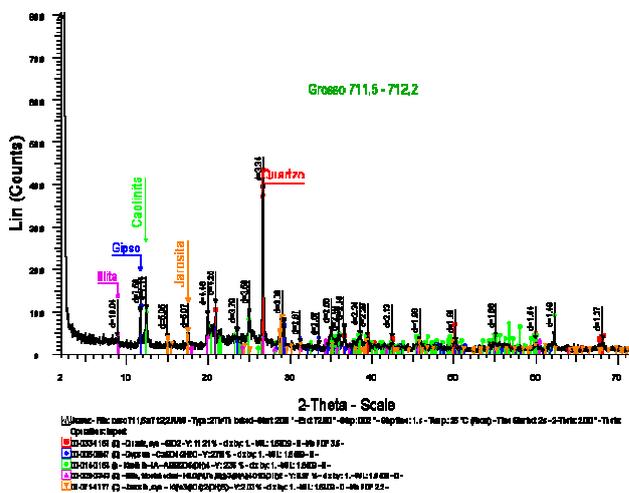


Figura 40: Fração leve (-50,8 mm +2,0 mm)

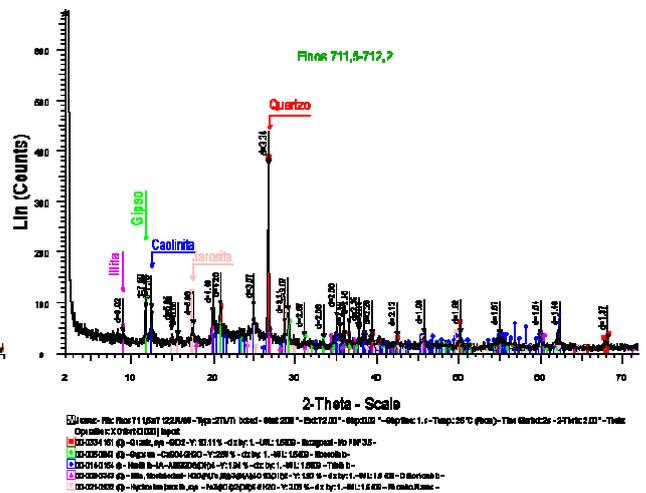


Figura 41: Fração leve (-2,0 mm +0,1 mm)

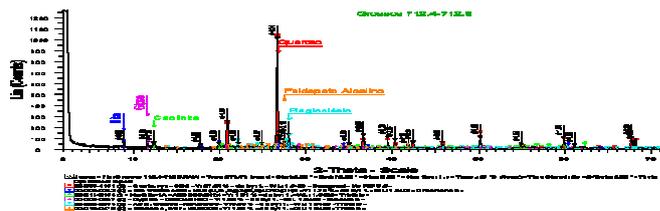


Figura 42: Fração Intermediária (-50,8 mm +2,0 mm)

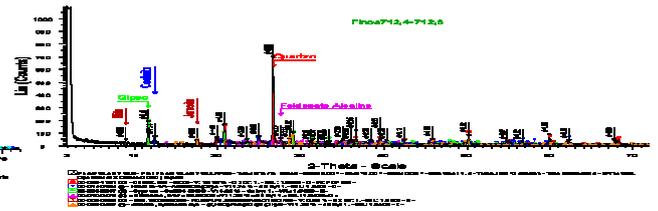


Figura 43: Fração Intermediária (-2,0 mm +0,1 mm)

4.5 Cenários de Aproveitamento do Material

Os resultados demonstram que para se tornar viável o aproveitamento de materiais no módulo de rejeitos será necessário o emprego de técnicas de beneficiamento de minérios, como a classificação granulométrica e a concentração gravimétrica. Como opções para a recuperação de materiais grossos estão os jigues, enquanto que para os finos podem ser empregados circuitos com espirais, mesas ou ainda outros equipamentos apropriados para o processamento de finos. O aproveitamento do lodo originado na operação de separação sólido-líquido nas lagoas de decantação poderá ser realizado “in natura” ou em um circuito de beneficiamento de “ultrafinos”.

A Figura 46 apresenta a recuperação mássica teórica obtida para cada possibilidade de reaproveitamento dos rejeitos em relação ao total disposto atualmente no módulo B da UM-II da Carbonífera Criciúma S/A.

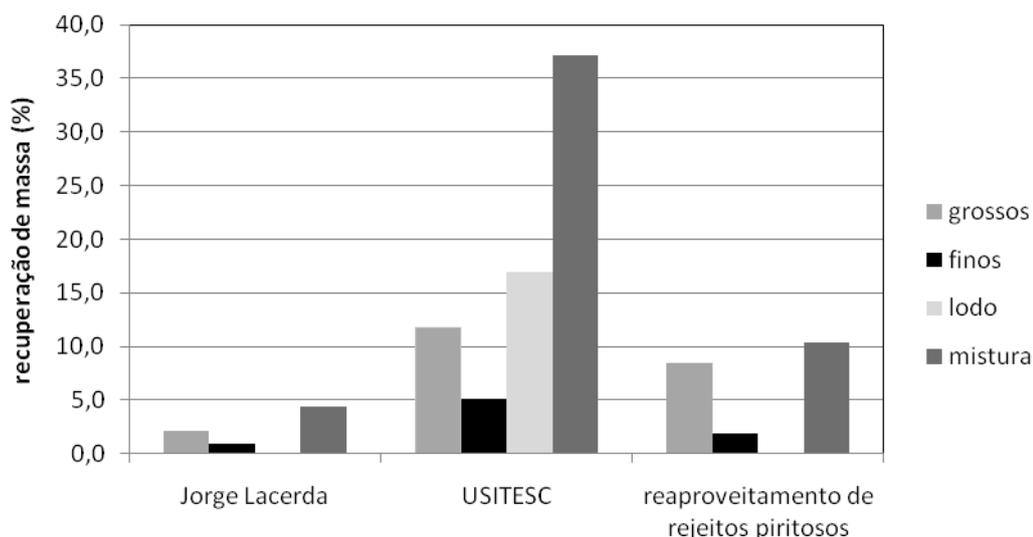


Figura 46: Recuperação de massa considerando diferentes possibilidades de aproveitamento do material disposto no módulo B de rejeitos da Carbonífera Criciúma S/A.

A primeira opção avaliada foi o aproveitamento do material para a produção de energia na termoelétrica Jorge Lacerda, que exige um teor máximo de 43,0% de cinzas e uma concentração máxima de 2,3% de enxofre. Pelos resultados dos ensaios de afunda-flutua, considerando cada fração granulométrica em separado, seria necessário efetuar um corte na densidade de 1,9 para os grossos e um corte na densidade 1,6 para os finos, conforme figuras 28 e 29 respectivamente. O material grosso apresentaria 43,0% de cinzas e 1,8% de enxofre

total, com uma recuperação de 2,1% da massa. O material fino apresentaria 26,2% de cinzas e 2,3% de enxofre, com uma recuperação de 0,9%. Somando ambas, a recuperação seria de 3,0%. Outra possibilidade seria efetuar o corte de ambas as frações na densidade de em 1,9 e após realizar a mistura de ambos. O baixo teor de enxofre dos grossos compensaria o teor mais elevado da fração fina. Neste caso, o produto final apresentaria 43,0% de cinzas e 2,2% de enxofre total, com uma recuperação teórica consideravelmente baixa de 4,4%.

A segunda opção avaliada foi a utilização do material para o abastecimento da Usina Termoelétrica do Extremo Sul Catarinense, cuja exigência é um teor máximo de 67,0% de cinzas e uma concentração máxima de 3,2% de enxofre. A densidade de corte a ser utilizada seria de 2,3, para ambos grossos e finos (figuras 28 e 29). Neste caso, o valor teórico esperado para os grossos seria de 67,0% de cinzas e 2,4% de enxofre, com uma recuperação de 11,7%. Para os finos, o teor de cinzas seria 58,5% de cinzas e 3,2% de enxofre, com uma recuperação de 5,1%. Conseguindo-se assim uma recuperação de 16,8%. Entretanto de for realizado em corte na densidade relativa de 2,3 para os grossos e 2,5 para os finos (figuras 28 e 29) e estes forem misturados com o lodo, que apresenta 65,5% de cinzas e 2,6% e enxofre, é possível recuperar 37,1% da pilha, com um material possuindo um teor de 66,3% de cinzas e 2,9% de enxofre total.

Ainda, 10,3% do material poderão ser aproveitados para a comercialização de um concentrado com 65% de pirita. Assim, a massa de rejeitos depositada poderia ser reduzida em torno de 47,5%. Estimando-se que a massa de rejeitos no módulo seja de 11.000.000 t, 5.225.000 t poderiam serem aproveitadas. O restante do material, 52,5% (ou 5.775.000 t) consistiria em um material ambientalmente menos agressivo.

Conforme apresentado na Tabela 25, o material remanescente apresentaria um teor consideravelmente menor de enxofre, diminuindo assim o potencial de geração de DAM. O enxofre dos grossos passaria de 6,8% para 2,3% e dos finos de 5,2% para 3,7%. O teor de enxofre total do módulo que era de 5,8% passaria para 2,4%. Os valores de NNP iniciais passariam de -181,3 kg CaCO₃/t para -75,0 kg CaCO₃/t, redução de 60%. A consequência seria uma redução na concentração de acidez e metais na DAM, diminuindo significativamente os custos no tratamento do efluente. Ainda, investigações poderiam ser iniciadas com o intuito de reaproveitamento do material para a construção civil.

Tabela 25: Comparação entre os cenários com e sem reaproveitamento dos rejeitos.

	massa (t)	enxofre (t)	NP (kg CaCO₃/t)	AP (kg CaCO₃/t)	NNP (kg CaCO₃/t)
Cenário atual	11.000.000	638.000	zero	181,3	-181,3
Cenário previsto	6.160.000	147.840	zero	75,0	-75,0

Deve-se enfatizar que um aproveitamento do módulo de rejeito pode ainda ser maior aplicando-se o recurso da “blendagem”, que nada mais é que uma mistura do rejeito fora da especificação com um carvão de melhor qualidade. Por exemplo, realizando um corte na fração de densidade relativa de 2,8 para os “finos” e “grossos”, e misturando-os com o lodo, se obtém um produto com 78,6% de teor de cinzas e 2,6% de teor de enxofre total. Assim, obter-se-ia um concentrado rico em pirita e um material a ser blendado com carvões de melhor qualidade, de forma a atingir as especificações de projeto exigidas pela USITESC. Com esta estratégia, poderia se aproveitar totalmente, ou quase que totalmente, o material disposto no módulo de rejeitos da UM-II – Verdinho.

Os resultados obtidos permitem concluir que, a Carbonífera Criciúma S.A., a partir do re-beneficiamento de rejeitos, pode reduzir significativamente a quantidade total de rejeitos dispostos no módulo B, atenuando o passivo ambiental relacionado com a disposição final de resíduos sólidos de mineração. Para isso, é fundamental a instalação da Usina Termoelétrica do Extremo Sul Catarinense – USITESC, prevista para 2012, que permitirá a utilização dos rejeitos nas proximidades da unidade mineira e facilitará a logística de transporte do produto. Ainda, nos últimos anos estudos vêm sendo conduzidos para o aproveitamento econômico dos concentrados de pirita. De acordo com Menezes e Schneider (2007), a pirita pode ser utilizada para a fabricação de sulfato férrico, produto químico muito usado como coagulante em operações de tratamentos de efluentes industriais e sanitários. Outras possibilidades de aproveitamento estariam relacionados a produção de enxofre, ácido sulfúrico, sulfato ferroso e pigmentos (Barbosa et al., 2002; Colling et al., 2009; Marcello et al., 2008; Vigânico et al., 2009).

Assim, consegue-se obter uma nova perspectiva para o destino final dos resíduos gerados pela indústria carbonífera nacional, transformando um rejeito sem valor agregado em um subproduto que poderá ser utilizado a geração de energia e produção de matéria prima para indústria química, reduzindo na fonte um dos maiores passivos ambientais do setor carbonífero. Este trabalho visou apresentar uma potencial ferramenta para que as empresas

possam verificar a capacidade de reutilização dos rejeitos de carvão dispostos em pilhas.

Deve-se ressaltar aqui a importância do setor carbonífero na economia dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e a necessidade da produção de energia para as próximas décadas. Neste sentido, os melhores procedimentos em termos de desempenho ambiental das atividades de mineração envolvem a prevenção, ou, no mínimo, a minimização dos impactos dessas operações sobre o meio ambiente. Assim o estudo mostrou que é possível a diminuição do passivo ambiental da CCSA com a reutilização dos rejeitos dispostos no módulo B da Unidade Mineira II – Verdinho, fazendo com que, mesmo após o encerramento das operações no local, a Carbonífera Criciúma continue suas atividades com a fabricação de subprodutos oriundos da pirita e forneça matéria-prima para geração de energia, diminuindo a quantidade dos resíduos sólidos já dispostos atenuando o risco de impactos ambientais, contribuindo para a economia da região e melhorando os índices de sustentabilidade da empresa.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

- A massa de rejeitos dispostos no módulo B possui a seguinte distribuição granulométrica: 68% de grossos (-50,8 mm +2,0 mm), 15% de finos (-2,0 mm +0,1 mm) e 17% de lodo das bacias de decantação (-0,1 mm).
- A fração grosseira (-50 mm +2 mm) apresenta 81,3% de cinzas e 6,6% de enxofre, a fração fina (-2 mm +0,1 mm) possui 74,0% de cinzas e 5,2% de enxofre total e o lodo (-0,1 mm) de 65,5% de cinzas e 2,6% de enxofre total.
- O teor de cinzas diminui e de enxofre total diminui para as granulometrias mais finas. As amostras coletadas em pontos mais profundos no módulo de rejeito apresentam um menor teor de enxofre total.
- O beneficiamento dos rejeitos de carvão para queima termoelétricas convencionais deve ser realizado na densidade de corte de 1,9. Nesta situação, misturando-se as frações grossas e finas, pode-se obter um produto com 43,0% de cinzas e 2,2% de enxofre total, porém a recuperação é de apenas 4,4%.
- Um material apto para emprego em termoelétricas que aceitam carvões com alto teor de cinzas pode ser realizado pela mistura do material grosso flutuado na densidade de 2,3, do material fino flutuado em 2,5 e o lodo. Esse produto apresenta 66,3,0% de cinzas, 2,9% de enxofre, com uma recuperação teórica de aproximadamente 37,1%.
- Um produto rico em pirita pode ser obtido a partir dos afundados na densidade de corte de 2,8. É possível obter, misturando as frações grossas e finas, um produto com 65% de pirita, com uma recuperação de 10,3%.
- Após a separação de material com potencial de produção de energia e da fração rica em pirita, permanecerá com rejeito um material com densidade intermediária, entre 2,3 e 2,8. Essa fração corresponde a aproximadamente 52,5% do massa original do módulo de rejeitos e apresentará um potencial e geração de acidez (AP) 60% menor em relação ao cenário atual, passando de 181,3 kg CaCO₃/t para 75,0 kg CaCO₃/t.

- Com a implantação da USITESC nas proximidades da UM-II, é possível a redução do passivo ambiental da CCSA com o reaproveitamento de rejeitos para a geração de energia, facilitando ainda a logística de transporte do material.
- A caracterização de pilhas de rejeito pode servir como ferramenta de auxílio para as indústrias carboníferas aumentarem seus índices de sustentabilidade empresarial, proporcionando uma nova abordagem para o reaproveitamento de resíduos sólidos da mineração de carvão.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, observa-se a oportunidade dos seguintes trabalhos futuros:

- Projeto e implantação de uma planta de beneficiamento para o aproveitamento de rejeitos de carvão.
- Estudos de caracterização tecnológica da fração energética recuperada bem com das cinzas geradas na queima em termoelétricas.
- Estudos para o aproveitamento da fração com densidade intermediária em agregados para aterros e pavimentação, agregados para a construção civil, finos para compostos cerâmicos e rochagem.

7. REFERÊNCIAS

- Araújo, A.C. Introdução. Em: Valadão, G.E.S; Araújo, A.C. (Org). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: editora UFMG, cap. 1., p.11-16, 2007.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Amostragem de resíduos sólidos. NBR 10.007. Rio de Janeiro, 21, 2004a.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Carvão Mineral – Determinação do teor de cinza. NBR 8289. Rio de Janeiro, 4p., 1983a.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Carvão Mineral – Determinação de umidade. NBR 8293. Rio de Janeiro, 6p., 1983b.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Carvão Mineral – Ensaio Densimétrico. NBR 8738. Rio de Janeiro, 9p., 1985.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Resíduos Sólidos – Classificação. NBR 10.004. Rio de Janeiro, 77p., 2004b.
- Barbosa, L.A.D.; Sobral, L.G.S.; Alcover-Neto, A.; da Silva, P.F.R. Caracterização tecnológica de rejeitos da indústria carbonífera visando seu aproveitamento sustentado. Anais do XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Recife, Pernambuco, 2002.
- Blignaut, J.N.; Hassan, R.M. Assessment of the performance and sustainability of mining sub-soil assets for economic development in South Africa. *Ecological Economics*, v.40, p.89-101, 2001.
- Borma, L.S.; Soares, P.S.M. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. Em: Extração de Ouro – Princípios, tecnologia e meio ambiente., Trindade, B.E.; Barbosa Filho, O. (Eds), CETEM, p.243 - 266, 2002.
- Brandão, P.R.G.; Cançado, R.Z.L.; Santos, L.D.; Vasconcelos, O.R. Caracterização Mineralógica e Tecnológica. Em: Valadão, G.E.S; Araújo, A.C (org.). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: editora UFMG, cap.3, p.27-60, 2007.
- Brasil. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2007.
- Buchanan DJ, Brenkley D. Green coal mining. In: Hester RE, Harrison RM, editors. *Issues in environmental science and technology 1: mining and its environmental impacts*. Royal Society of Chemistry, p.71-95, 1994.
- Casemiro, E.; Rosa L.; Neto, J.L.C.; “O passivo ambiental da região carbonífera do sul de Santa Catarina”, XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção – ENEGEP, Florianópolis, SC, Brasil, p.5257-5263, 2004.

CCICED – China Council for International Cooperation on Environment and Development. Transforming coal for sustainability: a strategy for China. Report by the Task Force on Energy Strategies and Technologies to the China Council for International Cooperation on Environment and Development. Energy for Sustainable Development, Volume 7, N°4, p. 5-14, 2003.

Chikkatur, A.P. et al., Sustainable development of the Indian coal sector, Energy, p.12, 2009. doi:10.1016/j.energy.2008.12.014

Colling, A.V.; Menezes, J.C.S.S.; Hidalgo, G.E.N.; Schneider, I.A.H. Desenvolvimento de tecnologia alternativa para a produção do coagulante sulfato férrico. Anais do III Seminário sobre Tecnologias Limpas, CD ROM, Porto Alegre, RS., 2009.

Departamento Nacional de produção mineral - DNPM, Anuário mineral Brasileiro 2006.

Energy Information Administration - EIA. International Energy Outlook 2008. Washington, DC, USA. 260p. 2008.

Environmental Protection Agency - EPA. EPA 530-R-94-036: Acid Mine Drainage Prediction., 1994. Technical Document

Farias C.E.G. Mineração e Meio Ambiente no Brasil. Relatório para CGEE-PNUD, 40p., 2002.

Feil, N.F. Obtenção de Carvões a partir de Rejeitos Carbonosos Produzidos no Beneficiamento das Minas do Faxinal e Butiá Leste, RS. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 144p., 2007.

Féris, L.A. Aproveitamento de subprodutos do beneficiamento de carvão mineral na remoção de poluentes por sorção-flotação FAD. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 176p., 2001.

Galatto, S.L.; Lopes, R.P.; Back, A.J.; Bif, D.Z.; Santo, E.L. Emprego de coberturas secas no controle da Drenagem Ácida de Mina – Estudos em campo. Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol.12, n°2, p.229-236, 2007.

Galery, R.; Valadão, G.E.S.; Viana, P.R.M.V.; Araujo, C.A. Fragmentação. Em: Valadão, G.E.S; Araújo, A.C (org.). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: editora UFMG, cap.5, p.85-104, 2007.

Kontopoulos, A. Acid Mine Drainage Control. In: Effluent treatment in the mining industry. Castro, S.H.; Vergara, F.; Sánchez, M.A (Editors), University of Concepción, p. 57-118, 1998.

Leonard, J.W., et al. Coal Preparation. Leonard, J.W. (ed.). The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., Nova York, EUA, cap.9-10, 1979

Lockie S., Franettovich M., Petkova-Timmer V., Rolfe J., Ivanova G. Coal mining and the resource community cycle: A longitudinal assessment of the social impacts of the Coppabella coal mine. *Environmental Impact Assessment Review*, 29, p.330-339, 2009.

Machado, I.F. A mineração sob a óptica social. In: Lins, F.A.F.; Loureiro, F.E.V.L.; Albuquerque, G.A.S.C. (Ed.), *Brasil 500 anos – A construção do Brasil e da América Latina pela mineração 2000*. Rio de Janeiro, CETEM, p. 65-74, 2000.

Machado, L.A., Ensaio estático e cinético para a prevenção da geração de drenagem ácida de minas na mineração de carvão com cinzas de termoelétrica e escória de aciaria. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 86p. 2007.

Magen, S.J.; Brent, A.C., Application of a Life Cycle Impact Assessment framework to evaluate and compare environmental performances with economic values of supplied coal products. *Journal of Cleaner Production*, 14, p.1071-1084, 2006.

Marcello, R.R., Galato, S., Peterson, M., Riella, H.G., Bernardin, A.M. Inorganic Pigments Made from the Recycling of Coal Mine Drainage Treatment Sludge. *Journal of Environmental Management*, v. 88, p.1280-1284, 2008.

Menezes, J. C. S. S.; Schneider, I. A. H. Produção de um coagulante a base de ferro ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) a partir de rejeito de mineração de carvão (pirita). *Anais do XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, CD ROM, Ouro Preto, MG, 2007.

MME/ANEEL, Ministério das Minas e Energia, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>, Acesso em: 02 de março de 2009.

Nascimento, F.M.F.; Mendonça, R.M.G.; Macêdo, M.I.F.; Soares, P.S.M. Impactos ambientais nos recursos hídricos da exploração de carvão em Santa Catarina. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 12 p., 2002.

Nieto, J.M.; Sarmiento, A.S.; Olías, M.; Canovas, C.R.; Riba, I.; Kalman, J.; Delvalls, T.A. Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva Estuary. *Environmental International*, v.33, p.445-455, 2007.

Nordstrom, D.K.; Alpers, C.N. Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund site, California. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, v.96, p.3455-3462, 1999.

Peres, A.E.C.; Salum, M.J.G.; Valadão, G.E.S.; Araujo, A.C. Métodos de Concentração. Em: Valadão, G.E.S.; Araújo, A.C. (org.). *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: editora UFMG, cap.6, p.105-140, 2007.

Possa, M.V.; Santos, M.D.C. Tratamento de drenagem ácida de mina por processo de neutralização controlada. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 21 p., 2003.

Quintanilha, L. A quebra de paradigmas através da gestão socioambiental no setor de mineração. *Revista Meio Ambiente Industrial*, Ed. 78, p. 26-34, 2009.

Rubio, J. *Carvão Mineral Caracterização e Beneficiamento*, V. 1. Porto Alegre: Nova Linha Artes Gráficas, 240p., 1988.

Sampaio, C.H. *Caracterização para o beneficiamento do carvão candiota*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 208p., 1983

Savitz, A.W., *The triple botton line: how today’s best-run companies are achieving economic, social, and environmental success – and how you can too*, John Wiley & Sons, Inc. USA. 320p., 2006.

Schneider C.H. *Caracterização do Impacto Ambiental e Tratamento da Drenagem Ácida de Minas com Resíduos Alcalinos na Mineração de Carvão de Santa Catarina: Mina Um II Verdinho, Criciúma*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 128p. 2006.

SENAI.RS. *Implementação de Programas de Produção mais Limpa*. Porto Alegre, Centro Nacional de Tecnologias Limpas SENAI-RS/UNIDO/ENEP, 2003. 42 p.

Silveira, A.N.; Silva, R.; Rubio, J. *Treatment of Acid Mine Drainage (AMD) in South Brazil: Comparative active processes and water reuse*. *Internacional Journal of Mineral Processing*, 7p., 2009, doi:10.1016/j.minpro.2009.06.005.

Soares, P.S.M.; Trindade, R.B.E.; *Recuperação ambiental de áreas mineradoras: uma experiência de gestão*. XIX ENTMH, Recife, Pernambuco, 2002.

Sobek, A.A., et al. *Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils*, EPA 600/2-78-054, 1978.

Tavares, L.M.M. e Sampaio, C.H. *Beneficiamento Gravimétrico*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 601p., 2005.

Vaz, P.A.B. *Reparação do dano ambiental – caso concreto: mineração em Santa Catarina e o meio ambiente*. *Revista CEJ*. Brasília. n°22, p.42-48, 2003.

Vigânico, E.M.; Silva, R.A.; Lopes, F.A.; Schneider, I.A.H. *Desenvolvimento de tecnologia para produção de sulfato ferroso a partir da drenagem ácida de mina*. *Anais do III Seminário sobre Tecnologias Limpas*, CD ROM, Porto Alegre, RS., 2009.

Wei, X.; Viadero, Jr, R.C. *Synthesis of Magnetite Nanoparticles with Ferric Iron Recovered from Acid Mine drainage: Implications for Environmental Engineering*. *Colloids and Surfaces, A, Physicochem. Eng. Aspects*, v.294, p.280-286, 2007.

World Coal Institute – WCI. *The coal resource: a comprehensive overview of coal*. World Coal Institute, Londres, Inglaterra, 44p., 2005.