

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 – PPGE3M

APROVEITAMENTO DE REJEITOS DE CARVÃO EM SANTA CATARINA, BRASIL

TESE DE DOUTORADO

Juarez Ramos do Amaral Filho

2014

Juarez Ramos do Amaral Filho

**Engenheiro Ambiental, Mestre em Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia
Extrativa**

APROVEITAMENTO DE REJEITOS DE CARVÃO EM SANTA CATARINA, BRASIL

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial à obtenção do título de doutor
em Engenharia – Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia
Extrativa

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider

Porto Alegre, RS.

2014

Este trabalho foi desenvolvido pelo doutorando **JUAREZ RAMOS DO AMARAL FILHO** com o título de **APROVEITAMENTO DE REJEITOS DE CARVÃO EM SANTA CATARINA, BRASIL**, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, área de concentração em Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa, sendo analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovado em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Programa em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider
Orientador
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Laurindo Leal Filho (USP/ITV)

Prof. Dr. Líliliana Amaral Féris (UFRGS)

**Prof. Dr. Rubens Muller Kautzmann
(UNILASALLE/ DNPM)**

AGRADECIMENTOS

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

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela infraestrutura e recursos disponibilizados.

Ao professor Ivo André H. Schneider, pela imprescindível orientação, apoio, tempo disponibilizado, paciência e incentivo incondicional para minha dedicação exclusiva à pesquisa.

Ao professor Jorge Rubio pelo apoio técnico e motivacional para o término do trabalho.

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

Ao CETEM, em especial ao Dr. Cláudio Schneider, pelo apoio técnico na elaboração das simulações de processos de beneficiamento de minérios pertinentes ao trabalho.

Ao SATC/CTCL, pelo auxílio nos ensaios de separação por meio denso Fe-Si e na obtenção dos dados referentes à situação atual dos rejeitos de carvão na bacia carbonífera da região de Criciúma, SC

Ao LAPROM pela disponibilização de materiais e equipamentos, um especial agradecimento ao Dr. Gerson Miltzarek pela paciência, auxílio nas práticas laboratoriais e realização dos ensaios de afunda-flutua e a professora Gelsa pelo auxílio na realização das análises elementares.

Ao LACAPETRO, em especial ao M.Sc. Gustavo Simão, pelo auxílio nas análises petrográficas e poder calorífico.

Ao LACOR pelo auxílio na realização das análises de sulfato por cromatografia iônica.

A todos meus antigos e atuais colegas de LEAmet e LTM pelo apoio, paciência, contribuições e risadas dispensadas.

A Jéssica Weiler pelo fundamental apoio técnico e dedicação na realização dos ensaios de células úmidas durante o meu estágio sanduíche na Universidade de Cape Town.

Ao Centro de Engenharia de Bioprocessos (CeBER) e ao Centro de Pesquisa Mineral (CMR), localizados na Universidade de Cape Town, África do Sul, pelo suporte e tempo disponibilizados durante meu estágio sanduíche. Um agradecimento especial a Dr Jenny L. Broadhurst, a Prof Dr. Sue T. L. Harrison e ao Prof. Dr. J-P Franzidis.

RESUMO

Na região sul do Brasil existe enormes reservas de carvão, bem mineral que exerce um papel fundamental na segurança energética do país. O setor carbonífero tem buscado progredir em relação ao seu comprometimento com o meio ambiente, reduzindo os impactos das atividades de lavra e beneficiamento. Entretanto, pouca atenção vem sendo dada às oportunidades existentes em relação ao aproveitamento dos rejeitos gerados. Estima-se que, na mineração de carvão em Santa Catarina, 60 a 70% do minério ROM beneficiado são descartados em módulos de rejeitos como um material sem valor comercial. O resultado é o comprometimento de áreas e a geração da drenagem ácida de minas (DAM), efluente que precisa ser tratado. Assim, a presente tese teve como objetivo avaliar técnicas e alternativas tecnológicas visando o aproveitamento integral ou parcial dos resíduos gerados na mineração de carvão. Estudos de caracterização de um típico módulo de rejeitos, bem como dos materiais que são dispostos no módulo de rejeitos, foram realizados. Avaliaram-se processos de beneficiamento gravimétrico para a separação do rejeito em três produtos: (i) uma fração contendo matéria carbonosa; (ii) uma fração de materiais inertes com baixo teor de enxofre; e (iii) um concentrado de pirita. Para a caracterização tecnológica dos materiais foram realizados ensaios de classificação de tamanho de partícula, ensaios de afunda-flutua, análise imediata, análise elementar bem como estudos petrográficos e mineralógicos. Análises ambientais também foram conduzidas, os quais seguiram os procedimentos da NBR 10.004, métodos estáticos de contabilização de ácidos e bases e testes cinéticos de predição da geração de acidez. Os resultados obtidos mostraram que, através do comprometimento das partes interessadas e de uma abordagem sistêmica e integrada do beneficiamento, é possível recuperar material energético e pirita; reduzindo ou eliminando a massa de rejeitos disposta. Também é possível minimizar os danos ambientais e os custos relacionados com a geração de DAM. A presente proposta vem ao encontro de novos conceitos na mineração, como a “produção mais limpa” e a busca de “rejeito zero”.

Palavras-chave: rejeito de carvão, beneficiamento, aproveitamento de rejeitos, desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Coal plays a key role in the Brazil energy security and in southern Brazil there are extensive reserves of this mineral. The coal industry has been engaged in relation to its commitment to the environment by reducing the impacts on mining and processing activities. However, very little emphasis has been placed on opportunities related to use or recycling of downstream waste. It is estimated that approximately 60 to 70% of the run-of-mine (ROM) coal extracted from underground mines in the coal Basin of Santa Catarina, Brazil, is discarded as waste in dump deposits. These waste discards contain sulphide minerals, particularly pyrite, which oxidize and give rise to acid mine drainage (AMD) with the well known environmental impacts and economic costs. Thus, this thesis aimed to evaluate alternative technologies and techniques focused on a full recovery of downstream wastes generated in coal mining activities. Characterization of a typical coal dump deposit was performed. Gravimetric beneficiation was carried out for the separation of waste into three products: (i) a fraction containing carbonaceous rocks; (ii) a fraction of inert materials with low sulfur content; and (iii) a pyrite concentrate. Technological characterization was conducted in terms of particle size distribution, sink-and-float tests, proximate and ultimate analysis, petrographic and mineralogical studies. Environmental analysis were conducted by NRB 10004 (waste classification) and static and kinetic acid prediction methods. The results obtained demonstrate that by the involvement of stakeholders and by a systemic and integrated approach to processing, it is possible to recover energetic material and pyrite; reducing or eliminating dump deposits. It can also minimize environmental damage and costs associated with the generation of DAM. This approach is in line with the new concepts in mining, such as "cleaner production" and the searching for a "zero waste mining".

Keywords: coal waste, processing, waste recovery, sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	A) Localização da bacia do paraná. B) Distribuição das regiões carboniferas no RioGrande do Sul e Santa Catarina. C) Mapa mostrando as localizaes dos afloramentos do estrato Rio Bonito nos municípios de Cricma e Lauro Müller em Santa Catarina bem como a localização das minas na região. Legenda: BB = Camada Barro Branco, Camada BO = Bonito, IR = Camada Irapu (Kalkreuth et al. 2010).	21
Figura 2	Perfil petrográfico da camada Barro Branco, na Mina do Verdinho de propriedade da Carbonífera Cricma S.A. (modificado de Kalkreuth et al. 2010).....	22
Figura 3	Representação gráfica das linhas da ferrovia Dona Teresa Cristina.	24
Figura 4	Produção acumulada de rejeitos de carvão até 2012 conforme dados fornecidos por JICA/SIECESC (2013).	26
Figura 5	Vista aérea de um típico módulo de rejeitos da região (cortesia CTCL, 2013).	29
Figura 6	Unidades de mapeamento das áreas no primeiro nível de informação nas campanhas realizadas entre os anos de 2005 e 2011 (Fonte: 7 Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais).....	30
Figura 7	rea recuperada com vegetação introduzida em local onde havia rejeito/estéril exposto (cortesia CTCL, 2013).	31
Figura 8	Expansão urbana residencial em áreas impactadas no bairro (cortesia CTCL, 2013)...	33
Figura 9	Expansão urbana industrial em áreas impactadas no bairro (cortesia CTCL, 2013)....	33
Figura 10	rea com rejeitos ou estéreis expostos na região de Cricma Santa Catarina (cortesia CTCL, 2013).	34
Figura 11	Oxidação da pirita por bactérias acidofílicas; FOB: bactéria oxidante de ferro, SOB: bactéria oxidante de enxofre (Bryan, 2006).....	39
Figura 12	Representação de um fluxo hidrogeológico de um depósito de rejeitos (modificado de Hansen, 2004).....	39
Figura 13	Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria (Tavares e Sampaio, 2005).	56
Figura 14	Efeito do tamanho de partícula na precisão de separação no beneficiamento de carvão (Tavares e Sampaio, 2005).....	56
Figura 15	Exemplo de circuito de beneficiamento de mineral no Estado de Santa Catarina....	58
Figura 16	Diagrama dos produtos e co-produtos da mineração do carvão (Schneider, 2006)..	58
Figura 17	Exemplo de uma curva de separabilidade - carvão (Tavares e Sampaio, 2005).....	59
Figura 18	Curva de partição de um equipamento de beneficiamento gravimétrico de carvões.	61
Figura 19	Diagrama esquemático de um jigue Baum (Tavares e Sampaio, 2005).....	63
Figura 20	Representação esquemática de um separador por meio denso (Sampaio e Tavares 2005).....	65
Figura 21	Representação esquemática de espirais concentradores (Tavares & Sampaio, 2005).	67
Figura 22	Fases de um estudo de avaliação de ciclo de vida conforme NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009).....	75
Figura 23	Vista superior da área ocupada pela unidade mineira II – Verdinho, município de Forquilha, SC: a) módulo B de rejeitos; B) bacias de sedimentação para separação	

	sólido-líquido da água de processo; C) planta de beneficiamento mineral; D) esteira de alimentação da mina II – Verdinho; E) pátio de estocagem; F) estação de tratamento de efluentes; G) Administração – Fonte: Google.....	82
Figura 24	Pontos de coleta das amostras utilizadas no trabalho: P1 – amostra representativa do módulo B de rejeitos; P2 – amostra representativa do rejeito proveniente do circuito de finos e ultrafinos; P3 – amostra representativa do rejeito proveniente do circuito de grossos.....	83
Figura 25	Equipamento separador por meio denso de Fe-Si.....	86
Figura 26	Foto das células úmidas para realização dos ensaios cinéticos (colaboração Jéssica Weiler).....	87
Figura 27	Balanco de massa de um típico circuito de beneficiamento mineral da camada Barro Branco na região carbonífera de Santa Catarina (colaboração: CCSA, 2012).	95
Figura 28	Vista superior da área utilizada para disposição final de rejeitos. À esquerda, as bacias de sedimentação utilizadas para a separação sólido-líquido. À direita: módulo B de rejeitos. Fonte: cortesia CCSA.	97
Figura 29	Distribuição granulométrica do material depositado no módulo B de rejeitos da Carbonífera Criciúma S.A (Amaral Filho, 2009).	99
Figura 30	Curvas de separabilidade densimétrica da fração grossa (-50,8+2,0mm) construídas a partir das análises de afunda-flutua com meios densos orgânicos.	103
Figura 31	Curvas de separabilidade densimétrica da fração fina (-2,0+0,1mm) construídas a partir das análises de afunda-flutua com meios densos orgânicos.	103
Figura 32	Distribuição de tamanho de partícula para as amostras coletadas no circuito de finos.	108
Figura 33	Distribuição de tamanho de partícula para as amostras coletadas no circuito de grossos.....	110
Figura 34	Curvas de lavabilidade dos rejeitos provenientes do processo de jigagem da CCSA: Near Gravity Material (NGM) e curva densimétrica; curva dos afundados e dos flutuados para o teor de cinzas e curva dos afundados e dos flutuados para o teor de enxofre total.....	113
Figura 35	Representação esquemática de uma planta de separação por meio denso em dois estágios e três produtos.....	114
Figura 36	Curva de partição para a unidade 01 de separação por meio denso com suspensão de 2,2 g/cm ³	116
Figura 37	Curva de partição para a unidade 01 de separação por meio denso com suspensão de 2,7 g/cm ³	116
Figura 38	Distribuição em massa das frações obtidas no ensaio de separação em dois estágios utilizando meio denso de Fe-Si.....	117
Figura 39	Imagens realizadas em lupa petrográfica para a fração energética obtida nos ensaios de separação por meio denso ferro-silício.....	118
Figura 40	Imagens obtidas através de microscópio petrográfico de luz refletida com a identificação dos grupos dos macerais e matéria mineral encontrada na fração D<2,2.	119
Figura 41	Imagens realizadas em lupa petrográfica para a fração intermediária obtida nos ensaios densimétricos.	121
Figura 42	Difratograma de raios X da fração com densidade intermediária.....	122

Figura 43 Resultados da análise semi-qualitativa de difração de raios-X da fração com densidade intermediária.	122
Figura 44 Comparação entre os resultados de FRX para o rejeito bruto e a fração após a remoção dos sulfetos.	123
Figura 45 Cultura hidropônica de tomate na Espanha utilizando rejeito de carvão como substrato (Canibaño, 1995).	124
Figura 46 Blocos de concreto para pavimentação produzidos com diferentes níveis de substituição de agregado miúdo natural (areia de leitos de rios) por rejeitos de carvão (Santos et al., 2013).	125
Figura 47 <i>Sorgumbicolour</i> de sete semanas de idade: (a) mudas desenvolvidas em solo nativo – controle e (b) mudas desenvolvidas em solo fabricado com rejeito de carvão, lodo e escória (Firpo et al., 2013).	126
Figura 48 Imagens obtidas por observação em lupa petrográfica da fração rica em pirita obtida nos ensaios densimétricos.	127
Figura 49 Difrátograma de raios X da fração pirítica.	127
Figura 50 Resultados da análise semi-qualitativa de difração de raios-X (DRX) da fração com densidade superior a 2,7 g/cm ³	127
Figura 51 Qualidade da água lixiviada em termos de pH, Eh, sulfatos, acidez, metais (Fe total, Al, Mn e Zn) em função do tempo (92 semanas) no ensaio nas células úmidas.	135
Figura 52 Carga lixiviada de sulfato, acidez e metais (Fe total, Al, Mn e Zn) em função do tempo (92 semanas) no ensaio nas células úmidas.	136
Figura 53 Relação Molar Fe:S nos lixiviados das células úmidas.	138
Figura 54 Acidez liberada do rejeito bruto em função da temperatura média semanal durante as 92 semanas monitoradas no ensaio cinético por células úmidas.	139
Figura 55 Acidez liberada do rejeito bruto em função da temperatura no dia de coleta durante as 92 semanas monitoradas no ensaio cinético por células úmidas.	139
Figura 56 Sistema produtivo tradicional (acima) e sistema produtivo alternativo (abaixo) para recuperação de produtos (colaboração Jéssica Weiler).	141
Figura 57 Balanço de massa, em toneladas, utilizado para a avaliação econômica.	143
Figura 58 Tempo de retorno do investimento (payback).	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Perfil das empresas carboníferas de Santa Catarina no ano de 2013.....	25
Tabela 2	Quantidade estimada, em massa, de rejeitos dispostos em módulo ou depósitos de rejeitos nas carboníferas de Santa Catarina (CTCL, 2013).....	29
Tabela 3	Quantificação das classes de cobertura do solo (Fonte: 7º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais)	34
Tabela 4	Alguns importantes sulfetos encontrados em regiões de mineração de carvão (Skousen et al., 1998; Ward, 2002).	37
Tabela 5	Métodos preventivos, métodos de contenção e métodos de remediação utilizados para o controle da drenagem ácida de mineração (Kontopoulos, 1998).....	45
Tabela 6	Comparação entre alguns testes estáticos e cinéticos de predição de drenagem ácida de minas realizados em laboratório.	48
Tabela 7	Volume e normalidade de ácido hidroclorídrico usado por cada intensidade do teste “fizz” (EPA, 1994).	50
Tabela 8	Aplicabilidade de processos de separação densimétrica.....	60
Tabela 9	Terminologia popularizada na literatura de gerenciamento ambiental (adaptado de Van Weenen, 1990; Freeman et al, 1992).....	69
Tabela 10	Critérios propostos para avaliar a eficácia das ferramentas existentes para desenvolvimento sustentável nas fases de um projeto (McLellan et al., 2009).	71
Tabela 11	Estudos desenvolvidos a partir de estratégias focadas nos ganhos ambientais do aproveitamento de resíduos de mineração	78
Tabela 12	Análises efetuadas nos lixiviados e na DAM bruta e tratada.....	93
Tabela 13	Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,8.....	104
Tabela 14	Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,7.....	104
Tabela 15	Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,8.....	105
Tabela 16	Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,7.....	105
Tabela 17	Resultados em base seca das análises imediata, elementar, formas de enxofre e poder calorífico superior para amostra proveniente do circuito de finos.	107
Tabela 18	Resultados dos ensaios de classificação granulométrica e teor de cinzas por tamanho de partícula para amostra proveniente do circuito de finos.....	107
Tabela 19	Resultados das análises imediata, elementar, formas de enxofre e poder calorífico superior para amostra proveniente do circuito de grossos.	109
Tabela 20	Distribuição de tamanho de partícula para amostra proveniente do circuito de grossos.	110
Tabela 21	Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,8.....	113
Tabela 22	Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,7.....	113
Tabela 23	Comparação dos resultados obtidos na separação em meio denso com líquidos orgânicos, simulação e estudos em escala piloto com meio denso de Fe-Si.	115

Tabela 24	Resultados das análises imediata , elementar e formas de enxofre realizadas no rejeito bruto e nas frações obtidas nos ensaios de separação por meio-denso ferro silício.	117
Tabela 25	Proporção volumétrica de macerais e matéria mineral na fração D<2,2.	119
Tabela 26	Poder calorífico de resíduos de diversas atividades industriais que podem ser utilizados na co-combustão com carvão mineral.	120
Tabela 27	Dados do Sumário Mineral 2013 (DNPM, 2014) e um cenário projeto com a recuperação da pirita contida no carvão ROM no estado de Santa Catarina.	129
Tabela 28	Estudos desenvolvidos buscando a aplicação de pirita em diversos setores produtivos.....	130
Tabela 29	Composição química do resíduo (laudo técnico número LCR 11591/11).	132
Tabela 30	Resultados do Ensaio de Lixiviação conforme a NBR 10.005:2004 (laudo técnico número LCR 11591/11).	132
Tabela 31	Resultados do Ensaio de Solubilização conforme a NBR 10.006:2004 (laudo técnico número LCR 11591/11).	133
Tabela 32	Resultados dos ensaios estáticos ABA tradicional e modificado realizados com a amostra de rejeito bruto e fração intermediária.	133
Tabela 33	Comparação dos resultados das análises de lixiviado acumuladas do rejeito bruto (pré-intervenção) e fração intermediária (após remoção de sulfetos).....	137
Tabela 34	Características físicas e químicas do material antes e após 92 semanas de lixiviação	137
Tabela 35	Características químicas dos efluentes tratados pelo neutralização/precipitação.	140
Tabela 36	Custo atual e projetado em reagente alcalino - (CaOH) ₂ - considerando a disposição exclusiva dos rejeitos com densidade entre 2,2 e 2,7.	141
Tabela 37	Investimentos necessários para implantação do projeto.	143
Tabela 38	Despesas mensais da planta de beneficiamento de rejeitos.	143
Tabela 39	Receitas mensais da planta de beneficiamento de rejeitos.....	144
Tabela 40	Receita total da planta de beneficiamento de rejeitos.....	144

LISTA DE ABREVIações

ABA: Contabilização de Ácidos e Bases
ABCM: Associação Brasileira de Carvão Mineral
ABCM: Associação Brasileira do Carvão Mineral
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP: Ação Civil Pública
ANC: Capacidade de Neutralização Ácido
ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
AP: Potencial de Acidez
APHA: American Public Health Association
ASTM: American Society for Testing and Materials
AWWA: American Water Works Association
BEN: Balanço Energético Nacional
CCSA: Carbonífera Criciúma S.A.
CE: Carvão Energético
CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Núcleo Criciúma.
CSN: Companhia Siderúrgica Nacional
CT: Centro de Tecnologia
CTCL: Centro Tecnológico do Carvão Limpo
DAM: Drenagem Ácida de Minas
DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral
EAE-FP: Escória de Aciaria Elétrica do Forno Panela
EPA: Environmental Protection Agency
EPE: Empresa de Pesquisa Energética
EPM: Ecárte Probable Moyen
EPRI: Electric Power Research Institute
FATMA: Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina
FT: Fator de Toxicidade
GTA: Grupo Técnico de Assessoramento
ICCP: International Committee for Coal And Organic Petrology
IEA: Energy Information Administration
INAP: International Network For Acid Prevention
ISO: International Organization for Standardization
LEAmet: Laboratório de Estudos Ambientais para a Metalurgia

LTM: Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental
MME: Ministério de Minas e Energia
MW/h: Megawatts por hora
n/d: não detectado
NAG: Geração Líquida de Ácido
NBR: Norma Brasileira Registrada
NGM: Near Gravity Material
NNP: Potencial de Neutralização Líquido
NP: Potencial de neutralização
NPR: Razão do Potencial de Neutralização
OECD: Organization for Economic Co-Operation and Development
pH: Potencial Hidrogeniônico
RC: Rejeito de Carvão
ROM: Rom-of-Mine
SATC: Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SIECESC: Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina
TAC: Termo de ajustamento de Conduta
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UM-II: Unidade Mineira II
WCI: World Coal Institute

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. Cadeia produtiva do carvão mineral em Santa Catarina.....	20
2.2. Panorama atual dos rejeitos de carvão em SC.....	25
2.3. Formação de Drenagem Ácida de Minas (DAM) e suas implicações	35
2.4. Controle da Drenagem Ácida de Minas	44
2.5. Predição de DAM.....	47
2.5.1. Testes estáticos de predição de drenagem ácida de minas.....	49
Método de contabilização de ácido e base (ABA) – Sobek 1978.....	49
Método de contabilização de ácido e base modificado (ABA modificado) - Lawrence 1989.....	50
2.5.2. Testes cinéticos de predição de Drenagem Ácida de Minas.....	51
Teste de células úmidas (ASTM D5744/2007)	53
2.6. Processamento de minérios e o beneficiamento de carvões	54
2.6.1. Curvas de Lavabilidade/Separabilidade e Curva de Partição.....	58
2.6.2. Equipamentos para o beneficiamento de frações grosseiras	63
2.6.3. Equipamentos para o beneficiamento de frações finas.....	65
2.7. Ferramentas e metodologias para o desenvolvimento sustentável na mineração.....	68
2.8. Barreiras e limitações na indústria mineral	79
3. EXPERIMENTAL.....	81
3.1. Descrição do empreendimento alvo	81
3.2. Amostragem do rejeito de carvão.....	82
3.3. Processos.....	84
3.3.1. Separação granulométrica	84
3.3.2. Separação densimétrica em meios orgânicos.....	84
3.3.3. Elaboração das curvas de lavabilidade.....	85
3.3.4. Simulação de circuito de beneficiamento mineral.....	85
3.3.5. Processamento em meio denso de ferro-silício.....	86
3.3.6. Ensaio de lixiviação em células úmidas	87
3.3.7. Tratamento da DAM.....	88
3.4. Análises	88
3.4.1. Imediata	88
3.4.2. Elementar	88
3.4.3. Formas de enxofre	89

3.4.4.	Petrográfica dos macerais	89
3.4.5.	Poder calorífico superior	89
3.4.6.	Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX)	90
3.4.7.	Elementar por Fluorescência de Raios-X (FRX)	90
3.4.8.	Periculosidade – NBR 10.004	91
3.4.9.	Testes estáticos de contabilização de ácidos e bases	91
3.4.10.	Análise de efluentes líquidos – lixiviados e DAM bruta e tratada	92
3.5.	Avaliação preliminar de Custos	93
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
4.1.	Caracterização de um módulo de rejeitos	96
4.2.	Caracterização dos resíduos do processamento do carvão mineral.....	106
4.2.1.	Provenientes do circuito de finos.....	106
4.2.2.	Provenientes dos circuitos de grossos	109
4.3.	Beneficiamento de grossos	114
4.3.1.	Caracterização da fração carbonosa	118
4.3.2.	Caracterização da fração com densidade intermediária	121
4.3.3.	Caracterização da fração pirítica	126
4.4.	Avaliação ambiental do rejeito bruto e da fração com densidade intermediária.	131
4.4.1.	Periculosidade conforme NBR 10.004:2004	131
4.4.2.	Contabilização de ácidos e bases	133
4.4.3.	Ensaio cinéticos em células úmidas	134
4.4.4.	Tratamento do efluente	140
4.5.	Considerações técnicas e econômicas	140
4.5.1.	Custos no tratamento de efluentes	140
4.5.2.	Pré-avaliação de investimentos em uma planta beneficiamento de rejeitos	142
5.	Barreiras, limitações e vantagens para reaproveitamento de rejeitos de carvão.	145
6.	CONCLUSÕES.....	147
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	149
	REFERÊNCIAS.....	150

1. INTRODUÇÃO

No cenário mundial, cerca de 40% da energia elétrica mundial é gerada por termoeletricidade oriunda da queima de carvão mineral. Em contraste, conforme descrito no Balanço Energético Nacional – 2012 (EPE, 2012), o Brasil possui apenas 2,3% da sua matriz energética elétrica dependente do carvão mineral. As operações de lavra, beneficiamento e uso deste recurso mineral ocorrem nos três Estados da Região Sul - Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Segundo a ANEEL (2014), são 12 usinas termoelétricas à carvão em operação.

O carvão também desempenha um papel complementar, sendo utilizado como uma fonte combustível alternativa. As usinas termoelétricas nacionais aumentam sua geração somente quando há uma redução no nível dos reservatórios das centrais hidroelétricas, responsáveis por cerca de 65% da matriz energética no país. Neste cenário, este combustível fóssil é fundamental para a segurança energética do país em uma perspectiva de longo prazo.

Entretanto, conforme Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007) e Plano Nacional de Mineração 2030 (MME, 2011), é previsto um aumento na participação do carvão na matriz elétrica nacional para 4% até 2030, principalmente em função: i) do aumento das técnicas de “queima limpa” para carvões mais pobres; ii) do aumento do preço de outros combustíveis fósseis (gás natural e petróleo) e iii) das dificuldades no aproveitamento dos recursos para fins hidrelétricos no país.

A indústria de extração e produção mineral gera grandes quantidades de resíduos sólidos e pode ser responsável por significativos impactos de abrangência local e regional, alterando a qualidade do solo, da água e do ar. No caso da mineração de carvão, os aspectos ambientais estão principalmente vinculados à disposição final de resíduos oriundos dos processos de lavra e beneficiamento (Monteiro, 2004). Estando as empresas, atuantes no setor, cientes da necessidade de um gerenciamento adequado dos resíduos.

Em particular, no Estado de Santa Catarina, praticamente toda a produção é obtida em operações de lavra em minas subterrâneas totalmente mecanizadas, onde o método empregado é o de câmaras e pilares. Há a necessidade de beneficiamento do

minério extraído para que o carvão seja comercializado, na maior parte como insumo para geração termelétrica. Após o processamento mineral, aproximadamente 60-70% do material é descartado e disposto em módulos ou depósitos de rejeitos. Esses depósitos contêm carvão (deslocado por ineficiência da operação de liberação e do processo beneficiamento), folhelhos carbonosos, folhelhos, siltitos e nódulos de pirita (Kalkreuth et al., 2010). Os módulos de rejeitos ocupam grandes áreas e possuem aproximadamente 6-8% de enxofre, predominantemente na forma do mineral pirita (FeS_2). A pirita se oxida na presença de oxigênio e água, gerando a Drenagem Ácida de Minas (DAM).

Muitas ações têm sido estudadas e tomadas para minimizar os impactos ambientais decorrentes de depósitos de rejeitos, incluindo a implantação sistemas de gestão ambiental e investimentos em desenvolvimento de tecnologias para o controle da poluição. Por exemplo, no caso do Módulo de Rejeitos da Unidade Mineira II da Carbonífera Criciúma S.A., um dos procedimentos adotados foi a adição de finos, coletados nas bacias de sedimentação da água do beneficiamento. O intuito foi minimizar a transferência de ar e a percolação de água pelo módulo de rejeitos. O processo foi parcialmente efetivo, sendo ainda necessário a contenção e o tratamento da DAM (Schneider, 2006). Outras ações também foram investigadas. Uma delas é método de coberturas secas, que demonstrou excelentes resultados (Soares et al., 2009). Contudo, essa técnica acarreta em elevados custos para as mineradoras e exige o contínuo monitoramento ambiental da área. Nesta mesma linha, existe o método de aditivos alcalinos (Machado, 2013). Porém, essa técnica também acarreta em custos e proporciona um aumento no volume de rejeitos dispostos. Assim, a solução ainda tem sido o emprego de técnicas de final de tubo, como o tratamento ativo da DAM, com custos em energia, reagentes, operação e disposição de lodos (Silveira et al, 2009).

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 tecnologias para a maximização do uso energético do carvão mineral. Ainda, componentes minerais presentes nos rejeitos podem ser processados, transformando-os em co-produtos com valor agregado. Tais procedimentos podem auxiliar na

redução do consumo de recursos naturais em outros setores e na minimização dos custos relacionados às ações de controle da poluição.

Assim, esta tese está focada em estudos de processos e no gerenciamento integrado de resíduos com a intenção de se recuperar produtos vendáveis e minimizar os riscos e passivos associados aos rejeitos de carvão na região de Santa Catarina. O trabalho visa comprovar a viabilidade técnica e ambiental em relação à redução no volume de rejeitos levados para depósitos, ou até mesmo a não geração de resíduos, diminuindo as áreas ocupadas para a disposição final. Busca, desta maneira, a eliminação do problema na fonte e não o tratamento das consequências com o foco apenas para o cumprimento de requisitos legais. Para isso, foram conduzidos estudos de caracterização dos rejeitos, processamento mineral, avaliação da qualidade dos produtos, avaliação ambiental de resíduos e análise técnica/econômica/ambiental de possíveis cenários.

Os benefícios do aproveitamento parcial ou integral dos rejeitos do beneficiamento de carvão mineral são vários. Pode-se citar o aumento da eficiência energética do setor, o aproveitamento econômico de materiais, redução do volume de rejeitos de carvão dispostos no meio ambiente, redução no tamanho das áreas ocupadas, melhoria da qualidade ambiental dos recursos hídricos, redução das despesas de tratamento ativo da DAM, diversificação de produtos, geração de empregos e de renda, conservação de recursos naturais no setor carbonífero e em outros setores industriais. Todavia, estas ações exigirão investimento em processos, recursos humanos e, principalmente, na mudança da concepção de um modelo de produção mineral estabelecido há muitas décadas.

Assim, o objetivo geral desta tese foi avaliar técnicas e alternativas tecnológicas visando o aproveitamento dos resíduos gerados na mineração de carvão:

Os objetivos específicos foram:

- caracterizar um módulo de rejeitos do beneficiamento de carvão;
- caracterizar os materiais finos e grossos que alimentam o módulo de rejeitos;

- estudar o rebeneficiamento de rejeitos de carvão para obtenção de uma fração com maior quantidade de matéria carbonosa, uma fração com alto teor de matéria mineral e um concentrado de pirita;

- caracterizar e apontar alternativas de uso das diferentes frações obtidas após o processamento mineral dos rejeitos de carvão;

- avaliar, de forma comparativa, através de ensaios estáticos e cinéticos o potencial e a evolução da geração da DAM pelo rejeito de carvão bruto e após o processamento do mesmo para a remoção da fração energética e da fração rica em pirita;

- avaliar os impactos econômicos e ambientais e comparar possíveis cenários de gestão dos resíduos do beneficiamento de carvão mineral.

Como delimitação da pesquisa pode-se dizer que o estudo é válido para a mineração de carvão da Camada Barro Branco de Santa Catarina e na contextualização tecnológica da primeira década do Século XXI. Os procedimentos e sugestões poderão ser aplicados durante a vida útil e, principalmente, após o fechamento das minas; sendo mais efetiva se adotados na fase de planejamento e projeto e empregados durante todo o período do empreendimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é apresentar de forma sucinta o estado da arte da cadeia produtiva do carvão e os aspectos ambientais correlacionados na região carbonífera de Santa Catarina. Revisam-se aspectos teóricos e práticos referentes à geração, previsão e controle da drenagem ácida de minas. São apresentados também conceitos e técnicas de beneficiamento mineral, assim como de ferramentas para auxiliar as empresas nas tomadas de decisão em relação à gestão sustentável de resíduos na mineração. Os dados referentes ao atual cenário na região foram obtidos através de pesquisa bibliográfica, pesquisa de campo e consultas à equipe técnica (GTA) que esteve diretamente envolvida na elaboração da minuta do 7º relatório dos indicadores ambientais na região carbonífera de Santa Catarina, Ação Civil Pública Nº 2000.72.04.002543-9/SC (ACP do carvão). Os técnicos são integrantes do Centro Tecnológico de Carvão Limpo (CTCL), da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), do Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC) e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) – Núcleo Criciúma.

2.1. Cadeia produtiva do carvão mineral em Santa Catarina

A descoberta do carvão em Santa Catarina ocorreu em 1822, na Região de Lauro Muller. A 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. A produção de carvão alcançou seu auge na década de 80. Contudo, no início da década de 90, com a suspensão dos subsídios ao setor, reduziu abruptamente. A partir de então, a produção anual de carvão praticamente se estabilizou entre 5 e 6 milhões de toneladas (Trindade e Soares, 2002; SIECESC, 2014).

Atualmente, na região sul do estado de Santa Catarina, toda a produção é obtida em operações de lavra em minas subterrâneas, totalmente mecanizadas, onde o método empregado é o de câmaras e pilares sem a recuperação dos pilares. A mineração a céu aberto foi desativada. Alguns depósitos de rejeitos estão sendo

rebeneficiados com o intuito único de concentrar carvão. Assim, a região possui importantes centros de mineração nos municípios de Lauro Müller, Urussanga, Siderópolis, Treviso, Criciúma, Forquilha, Içara, Morro da Fumaça e Maracajá, existindo 12 minas subterrâneas de carvão mineral em atividade, com uma produção de 200.000 ton/mês e empregando diretamente mais de 5.000 pessoas somente nas atividades de lavra e beneficiamento. A Figura 1 mostra a localização da bacia do Paraná, as principais jazidas de carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e a localização das minas no Estado de Santa Catarina.

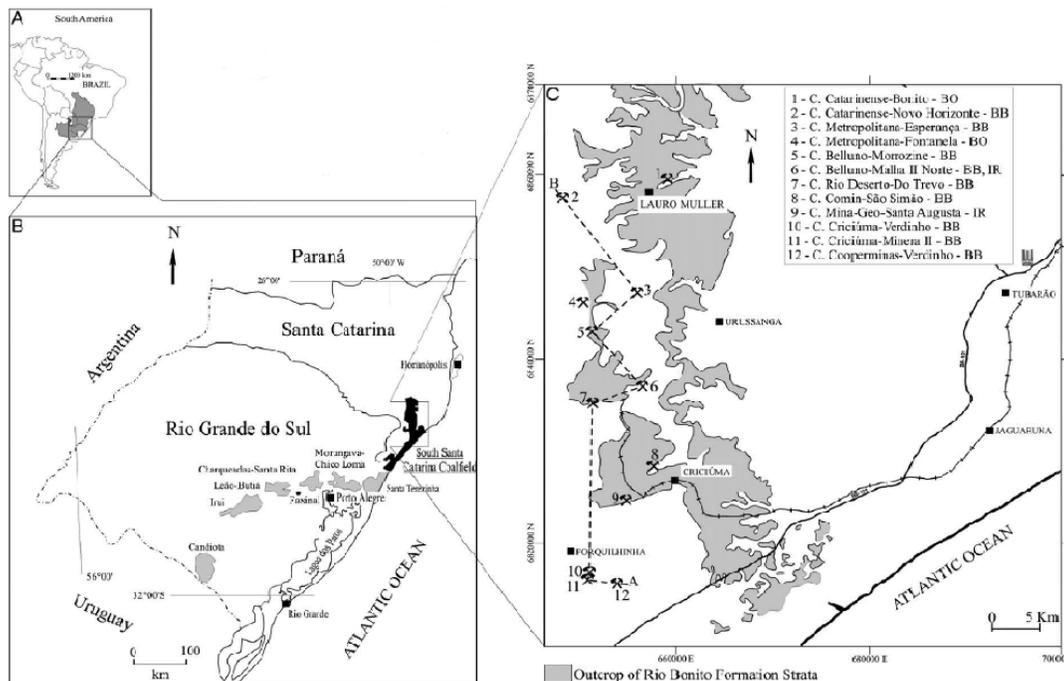


Figura 1 A) Localização da bacia do paraná. B) Distribuição das regioes carboniferas no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. C) Mapa mostrando as localizaoes dos afloramentos do estrato Rio Bonito nos municípios de Criciúma e Lauro Müller em Santa Catarina bem como a localização das minas na regio. Legenda: BB = Camada Barro Branco, Camada BO = Bonito, IR = Camada Irapu (Kalkreuth et al. 2010).

Mais de 90% do carvão produzido em Santa Catarina é encaminhado para a queima nas termoetricas do complexo Jorge Lacerda, localizado em Capivari de Baixo. O complexo termoetrico possui três usinas com capacidade total instalada de 857 MW, sendo considerado o maior da América Latina. Estas usinas operam através de um sistema convencional de gerao de energia por leito pulverizado e a especificação do carvão é de no máximo 42% de cinzas e 2,3% de enxofre total.

Os carvões de Santa Catarina são caracterizados por elevado teor de matéria mineral. As camadas de carvão são intercaladas no perfil litológico por folhelhos carbonosos, folhelhos, siltitos e tem em média entre 50 e 65% de cinzas, o que acarreta em um carvão de baixo poder calorífico. A Figura 2 ilustra essa situação, mostrando o perfil da Camada Barro Branco na Região de Forquilha. Os carvões do sul de Santa Catarina são em sua maior parte de classificados em relação ao *rank* como betuminoso alto volátil e as principais camadas mineradas são a Barro Branco, a Bonito e a Irapuá. Contudo, Kalkreuth et al. (2010) afirmam que o carvão *run-of-mine* (ROM) catarinense não se enquadra em nenhuma classificação internacional, sendo classificado como uma rocha carbonosa e possuindo considerável poder calorífico de acordo com a classificação internacional (International Classification of In-Seam Coals, 1998).

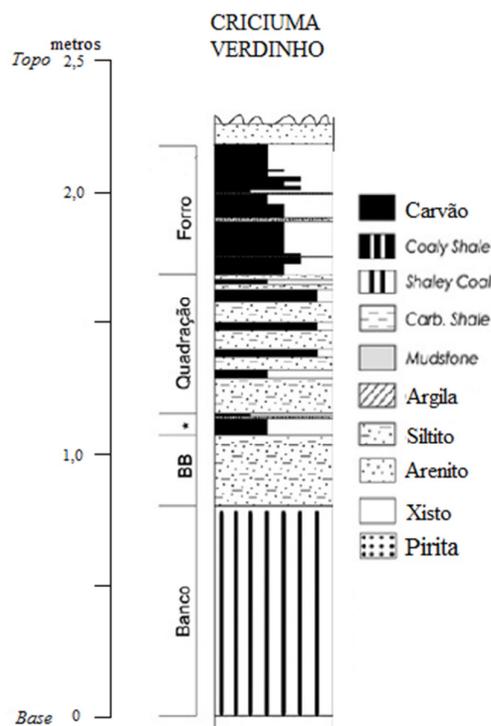


Figura 2 Perfil petrográfico da camada Barro Branco, na Mina do Verdinho de propriedade da Carbonífera Criciúma S.A. (modificado de Kalkreuth et al. 2010).

Apesar da baixa qualidade, se comparado a outros carvões, o carvão Brasileiro é uma matéria-prima importante para o desenvolvimento e pode ser aplicada, principalmente, em duas finalidades: (a) geração de energia elétrica e térmica (carvão energético); e (b) fundição e redução de minérios (carvão metalúrgico).

Em termos de energia, desempenha um importante papel na segurança energética nacional; principalmente em períodos de escassez de chuvas. O seu valor reside no seu poder calorífico. Quanto menor o teor de cinzas e água, maior será o seu poder calorífico.

A produção de energia pela queima de carvão mineral sempre foi visto como uma tecnologia antiga e poluente (Monteiro, 2004). Contudo, houve muitos progressos na prevenção e recuperação dos danos ambientais em toda sua cadeia produtiva, desde a mineração até queima. As tecnologias de combustão limpa de carvão (*Clean Coal Technologies*) evoluíram muito, entre as quais se destacam: a combustão em leito fluidizado (atmosférico, circulante e pressurizado), gaseificação integrada (com ciclo combinado ou célula combustível) e combustão direta (turbina ou diesel). Estes avanços permitiram o aumento da eficiência das usinas e do aproveitamento energético, contribuindo para a redução das emissões de CO₂, um dos “vilões” do efeito estufa. Em paralelo, pesquisas no controle de emissões gasosas bem como na captura do dióxido de carbono avançaram consideravelmente.

Segundo o Atlas de Energia Elétrica (ANEEL, 2005), a tecnologia de gaseificação integrada do carvão consiste na reação do carvão com vapor de alta temperatura e um oxidante (processo de gaseificação), dando origem a um gás combustível sintético de médio poder calorífico. Esse gás pode ser queimado em turbinas a gás, onde o calor residual dos gases de exaustão pode ser recuperado e aproveitado por meio de uma turbina a vapor (ciclo combinado). A gaseificação do carvão é praticada desde a primeira metade do século XIX e tem a finalidade de converter o carvão mineral em combustível sintético de aplicação direta na produção de energia. A grande vantagem é a baixa emissão de enxofre (5% quando comparada à queima tradicional)

De acordo com Kesting et al. (2013), existem diversos processos industriais de gaseificação do carvão, e o Brasil já domina essa tecnologia. O processo de gaseificação é considerado uma das tecnologias limpas promissoras para geração de energia e, dependendo da composição do gás produzido, pode ser utilizado como fonte de energia térmica ou como matéria prima para síntese de outros combustíveis. Ainda, Muniz et al. (2013) apresentaram um estudo mostrando que a gaseificação de carvões brasileiros é preferível à combustão devido à uma maior eficiência na queima.

Os carvões brasileiros apresentam, do norte para o sul, um acréscimo no conteúdo de material mineral e um decréscimo no teor de enxofre (Rubio, 1988). Os carvões do Paraná e Santa Catarina possuem altos teores de enxofre devido à presença do mineral pirita intercalado nas camadas de carvão.

O processamento da pirita já foi realizado no passado com o intuito de trazer benefícios econômicos e ambientais para a região. Entre as décadas de 70 e 90 funcionou, no município de Imbituba, a Indústria Carboquímica Catarinense (ICC), que produzia o ácido sulfúrico a partir de concentrados de pirita obtidos a partir de rejeitos de carvão. Entretanto, a planta foi desativada na década de 90, deixando de cumprir assim o papel socioambiental a qual foi destinada.

Atualmente, a cadeia produtiva do carvão mineral de SC é composta pelas empresas carboníferas, as quais são responsáveis pela extração e pelo beneficiamento do carvão; pela ferrovia Tereza Cristina, que passa por 12 municípios catarinenses, transportando o carvão; e, no final da cadeia, pelo Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda em Capivari de Baixo (Figura 3).



Figura 3 Representação gráfica das linhas da ferrovia Dona Teresa Cristina. Disponível em: <http://www.cdiport.com.br/index.html>

As cinzas das termoelétricas são aproveitadas integralmente na produção de cimentos e materiais cerâmicos. Portanto, os resíduos sólidos gerados na cadeia produtiva do carvão mineral em Santa Catarina são gerados nas atividades de extração e beneficiamento.

Neste contexto, o principal problema ambiental dentro da cadeia produtiva do carvão mineral de Santa Catarina diz respeito aos rejeitos do beneficiamento. Com exceção dos carvões oriundos da camada Irapuá – que na data desta tese é minerada somente por uma empresa – os carvões da região (camadas Barro Branco e Bonito) necessitam passar por um processo de beneficiamento para atingirem as especificações da usina Jorge Lacerda. O circuito de grossos predominante nas plantas de processamento mineral da região é a jigagem, o qual realiza a separação gravimétrica do material. O circuito de finos é geralmente composto por hidrociclones, espirais e flotação. O produto da flotação é o de melhor qualidade e geralmente é vendido para fins metalúrgicos. A Tabela 1 traz uma relação das Mineradoras, valores quantitativos de produção e os processos de beneficiamento empregados com dados do ano de 2013. Observa-se que 65% do carvão ROM minerado foram depositados em módulos de rejeitos. Assim, no próximo item, será apresentado um panorama atual dos depósitos de rejeitos na região carbonífera de SC.

Tabela 1 Perfil das empresas carboníferas de Santa Catarina no ano de 2013.

Empresa	carvão ROM (t) ¹	Carvão vendável ¹	Rejeitos gerados ¹		Contribuição por empresa ¹ (%)	Processamento mineral ²		
			(t)	(%)		grossos	finos	ultrafinos
Metropolitana	1.227.803	489.227	738.576	60,1	17,1	jigue, meio denso	N/A	N/A
Criciúma	1.287.001	503.745	783.256	60,8	18,2	jigue	espirais	flotação
Comin*	-	46.726	-	-	-	jigue	N/A	N/A
Catarinense	669.334	215.501	453.833	67,8	10,5	jigue, meio denso	espirais	N/A
Rio Deserto	727.623	306.400	421.223	57,9	9,8	meio denso	espirais, mesas	flotação
Cooperminas	965.243	370.162	595.081	61,7	13,8	jigue	espirais	flotação
Belluno	1.045.701	311.142	734.559	70,2	17,0	meio denso	N/A	flotação
Gabriella	251.127	21.804	229.323	91,3	5,3	Jigue	N/A	N/A
Siderópolis	396.461	40.710	355.751	89,7	8,3	jigue	N/A	N/A
Minageo**	-	39.806	-	-	-	N/A	N/A	N/A
Total	6.570.292	2.356.626	4.311.602	65,6	100,0			

*empresa beneficiadora de rejeitos; **venda direta de carvão ROM da camada Irapuá; N/A – não aplicável.

Fonte: ¹SIECESC, 2014 – estatísticas; ²Dados solicitados junto às empresas locais.

2.2. Panorama atual dos rejeitos de carvão em SC

Os resíduos gerados nas atividades de extração mineral são classificados em dois tipos: (a) estéreis, e (b) rejeitos. Os estéreis são os materiais de cobertura, as camadas intermediárias ou circundantes que são extraídos na intenção de se ter

acesso ao produto mineral de interesse. Os rejeitos são resíduos sólidos resultantes das operações de beneficiamento. 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. No caso da mineração de carvão de Santa Catarina, ambos resíduos são gerados. Contudo, pelo motivo da lavra ser subterrânea, os rejeitos de beneficiamento compõe uma massa muito maior do que estéreis. Segundo dados fornecidos pelo SIECESC, estima-se que já foram beneficiadas no Brasil, desde o ano de 1925, cerca de 550 milhões toneladas de carvão ROM com uma massa estimada de rejeitos de 320 milhões de toneladas (Figura 4).

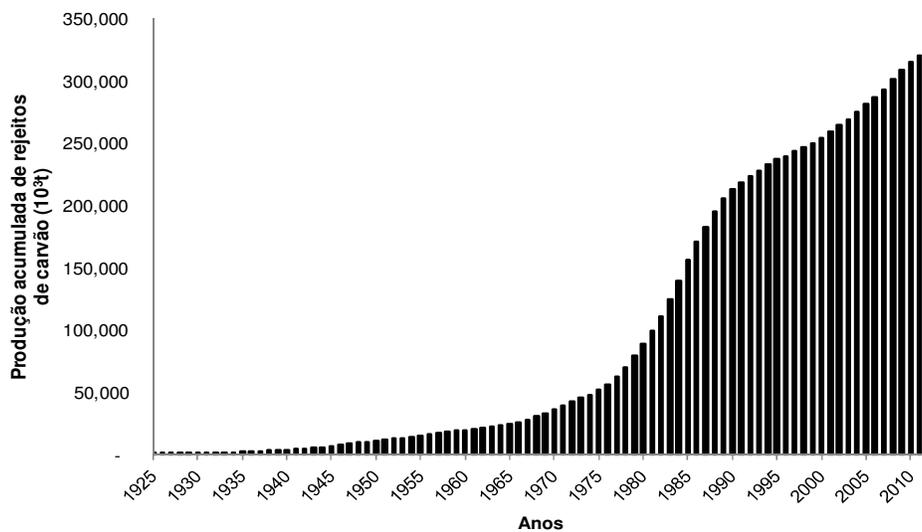


Figura 4 Produção acumulada de rejeitos de carvão até 2012 conforme dados fornecidos por JICA/SIECESC (2013).

A região carbonífera de Santa Catarina é a que apresenta maiores transtornos relacionados aos rejeitos de carvão. Isto se deve as seguintes razões: mineração subterrânea mecanizada, grande volume de produção e as características de suas jazidas (grande quantidade de rochas intercaladas com carvão e o elevado teor de enxofre). Do total de minério ROM beneficiado, uma média de 60-70% da massa original é disposta em módulos de rejeito. Esse material é composto por matéria carbonosa (deslocada por ineficiência da operação de liberação e/ou do processo beneficiamento), rochas sedimentares associadas e pirita (FeS_2).

Os rejeitos provenientes da etapa de processamento mineral são considerados um grande passivo ambiental, gerando DAM e conseqüentemente custos ambientais e econômicos. Segundo dados estatísticos da Associação Brasileira de Carvão Mineral –

ABCM (2013) – estima-se que em 2012 foram gerados 5 milhões de toneladas de rejeitos no Brasil, sendo Santa Catarina responsável por 80% desta geração. Atualmente estes rejeitos são depositados em módulos; que, em outras palavras, são aterros controlados, com sistemas de drenagem que encaminham as águas de percolação para lagoas de contenção e/ou estações de tratamento de efluentes. Os efluentes, após o tratamento, são lançados em um corpo d'água receptor.

Em contraste ao atual sistema de produção, 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. A consequência foi um imenso impacto ambiental, comprometendo uma área superior a 6.000 ha e os recursos hídricos locais. Estudos demonstraram uma considerável contaminação nas águas superficiais das bacias dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga, com valores de pH reduzidos e altas concentrações de metais e sulfatos (Trindade e Soares, 2002; Gomes et al. 2011). A gravidade da situação e a extensão do impacto levaram a Região Carbonífera do Sul de Santa Catarina a ser enquadrada pelo Decreto Federal 86.206 de 1980 como a 14ª Área Crítica para efeito do “Plano Nacional para Controle da Poluição Ambiental”.

O Governo Federal, o Governo Estadual e 22 empresas 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 carboníferas do estado, 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 (Farias, 2002, Nascimento et al., 2002; Soares e Trindade, 2002; Vaz, 2003; Cassemiro et al., 2004). 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). O objetivo foi estabelecer as obrigações que devem ser cumpridas pelas empresas para adequação de suas atividades de mineração (compreendendo as operações de lavra, beneficiamento, transporte e disposição dos resíduos) com agressões mínimas ao meio ambiente.

Com a ação conjunta das empresas carboníferas, instituições de pesquisa e órgãos governamentais, houve uma significativa melhoria nas condições. Os rejeitos de mineração não são mais dispostos inadequadamente e as ocorrências de combustão espontânea não existem mais. A drenagem ácida de minas gerada é captada e tratada. Muitas empresas mineradoras possuem sistemas de gestão ambiental e algumas inclusive certificadas pelas normas ISO 14.000.

Para fins de classificação e monitoramento, as áreas impactadas foram classificadas em dois níveis: (i) o primeiro nível refere-se à identificação e limitação de áreas que sofreram interferência da atividade carbonífera (áreas impactadas), que abrange a mineração a céu aberto, depósitos de rejeitos, áreas mineradas a céu aberto que foram posteriormente utilizadas para deposição de rejeitos e; (ii) o segundo nível consiste na identificação e limitação de áreas que retratam as alterações das glebas mapeadas pela primeira camada, que são representadas pelas classes: remanescentes florestais, vegetação introduzida, vegetação espontânea, argila, áreas residenciais, áreas industriais, lagoas ácidas internas, lagoas ácidas externas e rejeito ou estéril exposto. As informações referentes à situação (em hectares) atual de rejeitos estão disponíveis no 7º relatório de monitoramento e indicadores ambientais (<https://www.jfsc.jus.br/acpdocarvao>).

i) Primeiro nível de informação (áreas impactadas)

Pátio operacional: o pátio operacional de uma empresa é identificado como a área de desenvolvimento das atividades de cada empresa, sob a égide de licenciamento ambiental, onde estão instaladas unidades como: módulo ou depósito de rejeito, planta de beneficiamento, bacias de decantação, ETE's (Estações de Tratamento de Efluentes), escritórios e benfeitorias em geral, mecânicas, borracharias, oficinas, etc. Estas áreas são relevantes, pois elas permanecerão por certo período em atividade. A partir da década de 90, com a pressão da sociedade e do poder público, as empresas se viram obrigadas a gerenciar os rejeitos gerados nas etapas de beneficiamento. Existem 15 unidades de tratamento de drenagem ácida em operação, localizadas em 8 empresas na região. A tecnologia utilizada para o tratamento varia conforme as características do efluente e do volume tratado; mas geralmente se dá por neutralização do efluente e precipitação dos metais na forma de hidróxidos. Em

2011 foram tratados nestas unidades 11.925.343 m³ de DAM, oriundas das unidades mineiras em operação. A Figura 5 apresenta a vista aérea de um típico módulo de rejeitos da região. Na Tabela 2 se encontram a quantidade de rejeitos dispostos em módulos ou depósitos nas empresas da região.

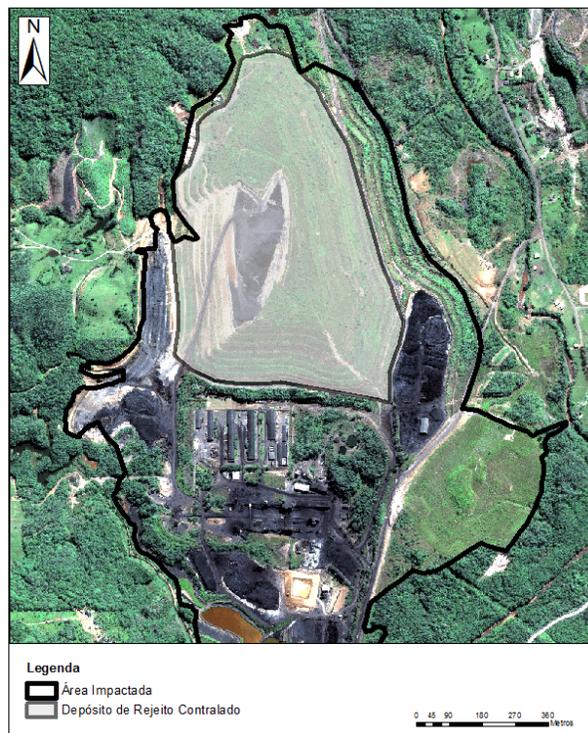


Figura 5 Vista aérea de um típico módulo de rejeitos da região (cortesia CTCL, 2013).

Tabela 2 Quantidade estimada, em massa, de rejeitos dispostos em módulo ou depósitos de rejeitos nas carboníferas de Santa Catarina (CTCL, 2013).

Empresa	Quantidade de rejeito em depósitos controlados
Metropolitana	40 milhões de toneladas
Criciúma	15 milhões de toneladas
Comin	N/I
Catarinense	N/I
Rio Deserto	N/I
Cooperminas	N/I
Belluno	N/I
Gabriella	1 milhão de toneladas
Siderópolis	N/I
Minageo	N/I
Total	56 milhões de toneladas

N/I – não informado.

Céu aberto: refere-se às áreas onde ocorreu o método de extração do carvão diretamente na superfície, geralmente com a remoção prévia de uma camada superior, denominada de cobertura. A mineração a céu aberto em Santa Catarina já não ocorre mais, e era usada quando depósitos de minerais ou rochas comercialmente úteis são encontradas perto da superfície, isto é, onde o *overburden* (material de superfície que cobre o depósito) é relativamente pequeno ou, ainda, quando o material do interesse é estruturalmente inapropriado para à mineração em subsolo.

Depósitos de rejeitos: correspondem àquelas áreas que abrigaram estruturas que tinham a finalidade de reter os resíduos sólidos originados nas etapas de descobertura (mineração a céu aberto), emborcação ou abertura de poços (mineração subterrânea) e de beneficiamento (céu aberto e subterrâneo).

Depósito de rejeito em cava a céu aberto: são aquelas áreas onde ocorreram, em épocas distintas, ambas as atividades descritas acima.

São apresentados na Figura 6 os resultados, em hectares, de três campanhas realizadas para mapeamento das áreas no primeiro nível de informação. Observa-se que praticamente não houve variação no total de áreas impactadas monitoradas entre os anos de 2005 e 2011.

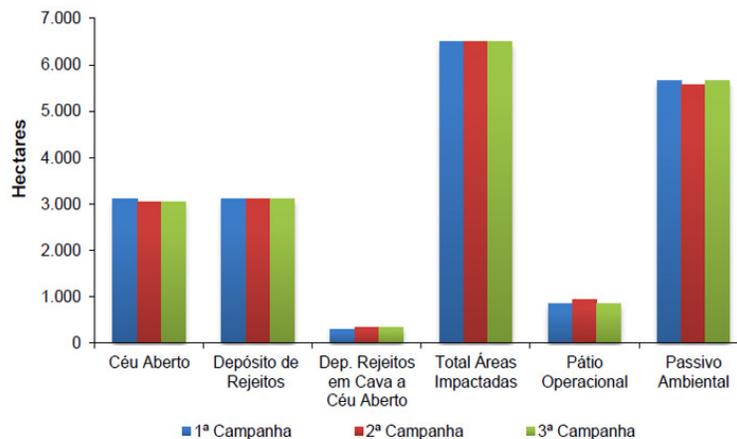


Figura 6 Unidades de mapeamento das áreas no primeiro nível de informação nas campanhas realizadas entre os anos de 2005 e 2011 (Fonte: 7º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais).

ii) Segundo nível de informação

Vegetação espontânea: comunidade vegetal que teve desenvolvimento de forma espontânea, sem o plantio de espécies visando à recomposição florestal. Nesta

classe podem ser incluídas tanto espécies nativas quanto espécies exóticas pertencentes a comunidades vegetais herbáceas, arbustivas ou arbóreas, havendo uma predominância das comunidades herbáceas e arbustivas. Esta classe pode ser reconhecida pela fisionomia desigual da vegetação considerando as características básicas do substrato como a existência de rejeitos e de estéreis ou, ainda, se foi realizada alguma atividade de reconstrução do solo a partir da adição de argila. Esta classe de cobertura indica que não foram realizadas atividades de recomposição florestal e que o a comunidade vegetal estabeleceu-se sobre áreas onde o substrato não foi total ou parcialmente reconstruído. Estudos conduzidos por dos Santos et al. (2008) demonstraram a existência de 83 espécies de 28 famílias vegetais em 35 pilhas de rejeito monitoradas.

Vegetação introduzida: comunidade vegetal que foi estabelecida visando obter a recomposição florestal da área sendo identificada por meio de características fisionômicas da vegetação como o plantio homogêneo e/ou sistematizado. Nesta classe de cobertura podem ter sido realizadas atividades visando à reconstrução do solo a partir da remoção e/ou estabilização dos materiais contaminantes. No entanto, em alguns casos o plantio de espécies vegetais é realizado sobre o substrato alterado sem a realização de atividades de reconstrução do solo. Embora esta classe de cobertura não possa ser considerada típica de áreas em processo de recuperação ambiental pode ser considerada indicativa do processo (Figura 7).

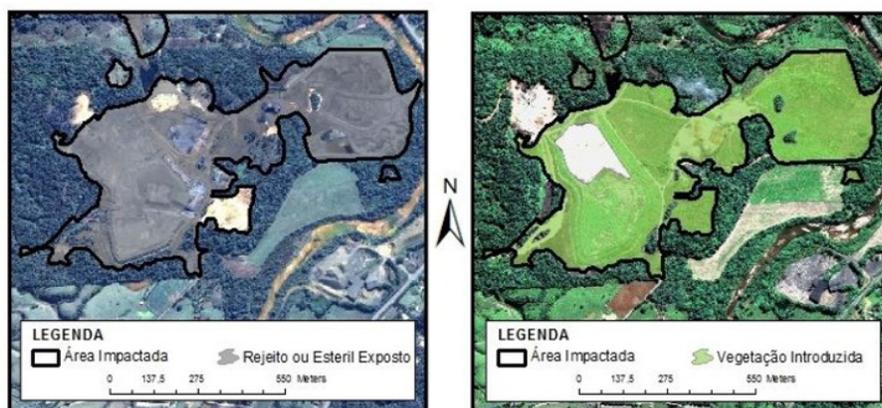


Figura 7 Área recuperada com vegetação introduzida em local onde havia rejeito/estéril exposto (cortesia CTCL, 2013).

Remanescente florestal: classe de cobertura composta por fragmentos de vegetação nativa que não foram totalmente suprimidos ou que estão em processo

avançado de regeneração natural. Além disso, o solo desta área precisa apresentar características semelhantes às naturais, como a presença de serapilheira, a cor e a textura. Esta classe de cobertura geralmente é representada por pequenos remanescentes florestais alterados e intensamente fragmentados pertencentes a estádios iniciais de regeneração natural. Funcionam como núcleos de dispersão de propágulos e podem ser utilizados por animais como abrigo, potencializando o processo de recuperação ambiental de áreas adjacentes.

Argila: indica que a área pode estar em processo de recuperação ambiental, pois a argila compõe parte da reconstrução do solo para introdução de novas espécies vegetais. Outra possibilidade de utilização da argila é de impermeabilização do solo, uma vez que este material possui características de atenuação da infiltração e percolação das águas meteorológicas nas pilhas de estéreis ou rejeitos, diminuindo assim a lixiviação e a geração de drenagem ácida de mina. Ela também é usada em taludes dos depósitos de rejeitos e em bacias de decantação para impermeabilização da base e das laterais, para evitar o desencadeamento de processos erosivos ou infiltrações.

Lagoas ácidas internas: são lagoas impactadas pela mineração de carvão que estão dentro dos limites das áreas impactadas por depósitos de rejeito ou mineração a céu aberto. Estas lagoas surgem a partir cavas de mineração ou em bacias de decantação e uma de suas características é que são formadas pelo próprio material estéril ou de rejeito.

Lagoas ácidas externas: são lagoas que recebem a contribuição de drenagens ácidas de áreas impactadas próximas, não estando inseridas, entretanto, no limite destas. De origem natural, essas áreas vêm sofrendo influência do escoamento superficial de drenagem ácida.

Urbanizada residencial: são áreas urbanizadas que possuem uma densidade de construções composta principalmente por moradias residenciais (Figura 8). Essas urbanizações estão inseridas em áreas que possuem depósitos de rejeito ou que foi minerada a céu aberto no passado. A diferenciação desta classe é importante do ponto de vista ambiental, pois muitas destas áreas são zonas frágeis, propícias a invasões, e

cuja ocupação desordenada (muitas vezes por segmentos sociais de baixa renda) dificultam ou inviabilizam quaisquer ações de recuperação.

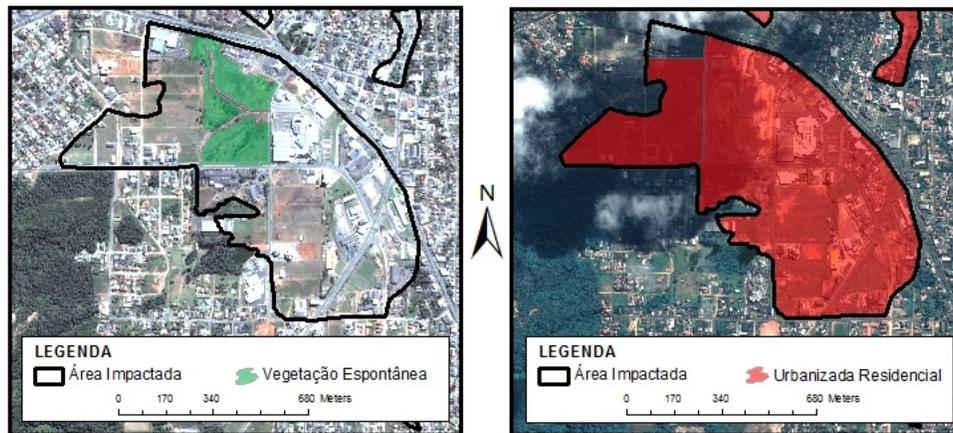


Figura 8 Expansão urbana residencial em áreas impactadas no bairro (cortesia CTCL, 2013).

Urbanizada industrial: são áreas urbanizadas que possuem atividades industriais em dentro de seus limites de áreas impactadas, além daquelas onde estão as construções das atividades mineiras, nos seus respectivos pátios operacionais (Figura 9).

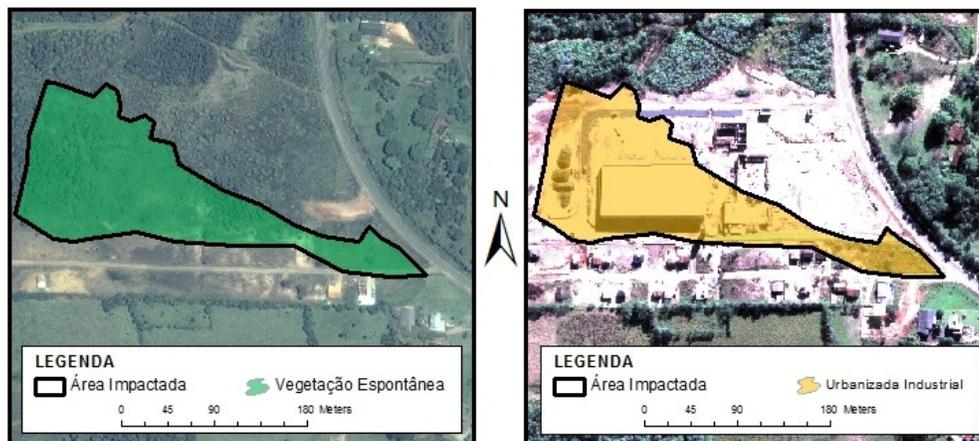


Figura 9 Expansão urbana industrial em áreas impactadas no bairro (cortesia CTCL, 2013).

Rejeitos ou estéreis expostos – Estas áreas correspondem às áreas de maior potencial de impacto ao meio ambiente local e regional. São áreas onde os rejeitos de estéreis foram depositados ao longo do tempo sem nenhum cuidado em relação ao gerenciamento dos resíduos (Figura 10).

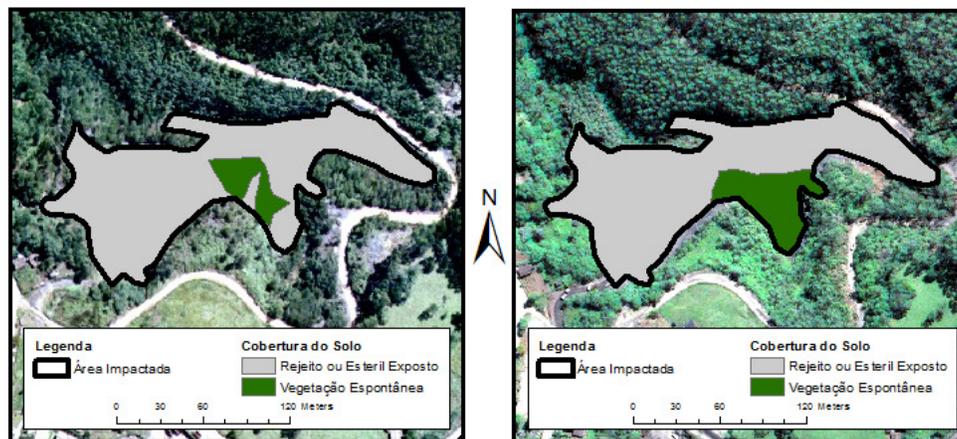


Figura 10 Área com rejeitos ou estéreis expostos na região de Criciúma Santa Catarina (cortesia CTCL, 2013).

Observa-se na Tabela 3, que na primeira campanha realizada em 2005 estas áreas correspondiam a 44,9% das áreas avaliadas e em 2011 correspondem a 18,5% do total. Conclui-se, assim, que ações vêm sendo realizadas com a intenção de recuperar estas áreas.

Tabela 3 Quantificação das classes de cobertura do solo (Fonte: 7º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais)

Cobertura de solo	campanhas					
	1ª (2005)		2ª (2007)		3ª (2011)	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Argila	391,4	6,0	370,7	5,7	271,3	4,1
Urbanizada industrial	175,8	2,7	247,0	3,8	287,3	4,4
Urbanizada Residencial	529,6	8,1	565,4	8,6	601,0	9,1
Vegetação espontânea	918,3	14,0	1470,7	22,4	1345,3	20,5
Vegetação introduzida	1234,9	18,8	1970,9	30,1	2472,1	37,6
Remanescente florestal	112,1	1,7	112,6	1,7	118,6	1,8
Lagoas Internas	200,3	3,1	215,1	3,3	193,8	2,9
Lagoas externas	48,0	0,7	51,9	0,8	65,1	1,0
Rejeito ou estéril exposto	2941,4	44,9	1551,5	23,7	1214,4	18,5
Total	6551,8	100,0	6555,7	100,0	6568,9	100,0

Assim, mesmo com a melhoria da situação, muitos procedimentos podem ainda ser aperfeiçoados. É indispensável considerar a necessidade de pesquisa de projetos alternativos ao atual “modus operandi”, envolvendo a destinação dada aos rejeitos de beneficiamento. Trata-se de massa mineral não aproveitada e que, até onde se sabe, deve-se justamente a falta de projetos de pesquisa e ações voltados ao aproveitamento dos materiais presentes na massa de rejeitos. O ponto central da questão reside nas características das jazidas de carvão no Estado de Santa Catarina, as quais apresentam significativa parcela de rochas inertes e pirita intercaladas ao carvão

propriamente dito. Abaixo, transcreve-se a opinião de Geólogo Carlos Henrique Schneider (2010),

“O emprego de processos para beneficiamento mineral em larga escala se deu com maior ênfase a partir do plano para mecanização da mineração de carvão promovido pelo Governo Federal no final dos anos 70, o chamado Plano de Mobilização Energética. Por este plano, os projetistas da época optaram por adotar tecnologias consagradas nos tradicionais produtores de carvão: EUA, Alemanha, Polônia e Inglaterra, os quais detinham a melhor tecnologia para lavra e beneficiamento de carvão. É justamente neste ponto que o setor pecou: a falta de uma adaptação dos processos estrangeiros à realidade do carvão nacional, que é caracterizado por um elevado percentual de rochas intercaladas às lâminas de carvão, resultando hoje em um elevado volume de minerais diversos, carentes de um adequado estudo de viabilidade técnica e ambiental”.

Ações vêm sendo realizadas com a intenção de dispor de forma controlada e tratar a DAM através de tratamentos passivos e ativos. Esta abordagem de fim de tubo gera custos onerando as empresas do setor. Neste trabalho, defende-se outro enfoque, o do aproveitamento parcial ou integral dos rejeitos do beneficiamento de carvão mineral. O objetivo é reduzir o desperdício de materiais e a geração da drenagem ácida de minas direto na fonte de sua geração.

2.3. Formação de Drenagem Ácida de Minas (DAM) e suas implicações

Drenagens geradas em minas abandonadas e rejeitos de mineração são frequentemente ácidas (algumas vezes extremamente). Tais águas normalmente contaminam o meio ambiente, pois contém elevadas concentrações de metais (ferro, alumínio e manganês entre outros metais tóxicos) e metaloides (onde o arsênico é geralmente a principal preocupação). Embora a verdadeira escala da poluição causada pela drenagem ácida de minas (DAM) seja difícil de avaliar precisamente, em 1989 foi estimado que 19.000 km de rios e riachos e 72.000 ha de lagos e reservatórios tenham sido seriamente impactados por águas ácidas de mineração em âmbito mundial (Johnson e Hallberg, 2005).

O principal impacto ambiental relacionado à atividade de mineração de carvão é justamente causado pela geração das chamadas drenagens ácidas. 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 minerais sulfetadas. 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 (Kontopoulos, 1998; Nordstrom e Alpers, 1999; Borma e Soares, 2002; Nascimento et al., 2002; Soares e Trindade 2002; Nieto et al., 2007). Assim, como parte da solução, é importante uma legislação focada na prevenção. A quantificação dos passivos gerados deve ser trazida para os estágios iniciais de um projeto, momento em que acertadas decisões podem proporcionar uma redução tanto nas quantidades de resíduos sólidos gerados como nos perigos (riscos) ambientais associados.

O carvão mineral catarinense contém altos teores de enxofre, já que as reservas locais possuem associadas às suas camadas, grandes quantidades do sulfeto pirita (FeS_2), como descrito na seção 2.1. A pirita, em contato com a água e com o oxigênio atmosférico, forma um efluente com pH baixo e altas concentrações de ferro (nas formas de Fe^{2+} e Fe^{3+}), outros metais (Al, Mn, Zn) e sulfatos (SO_4^{2-}).

É importante ressaltar que o enxofre no carvão ocorre em três formas: mineral, sulfático e orgânico. O enxofre mineral, em particular o pirítico, é a forma predominante achada no carvão e é responsável pela maior parte do ácido formado. Enxofre sulfático é resultado da oxidação da pirita e é achado em pequenas quantidades em rejeitos frescos. Enxofre orgânico é ligado quimicamente às moléculas de carvão e tem pouco efeito na formação da drenagem ácida de minas. A Tabela 4 mostra uma lista de alguns sulfetos metálicos associados com carvão que podem contribuir com a geração de ácido e dissolução de metais tóxicos (Skousen et al., 1998).

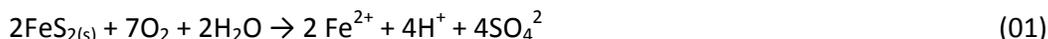
De acordo com Kontopoulos (1998), a DAM é resultado da exposição de minerais sulfetados a intempéries, sendo provocada por uma série complexa de reações químicas envolvendo mecanismos diretos, indiretos e ação microbiana.

Algumas reações de oxidação resultam na geração de ácido, ao passo que outras resultam na dissolução e mobilização de metais pesados.

Tabela 4 Alguns importantes sulfetos encontrados em regiões de mineração de carvão (Skousen et al., 1998; Ward, 2002).

Mineral	Composição química	Mineral	Composição química
Pirita	FeS ₂	Molibidenita	MoS ₂
Marcasita	FeS ₂	Milerita	NiS
Pirrotita	Fe _(1-x) S	Galena	PbS
Calcocita	Cu ₂ S	Esfarelita	ZnS
Covelita	CuS	Arsenopirita	FeAsS
Calcopirita	CuFeS ₂	Estibinita	SbS

A pirita é a maior fonte de geração de DAM em áreas de disposição de rejeitos de mineração de carvão (Komnitsas et al., 2001). Sendo estável, desde que não entre em contato com água e oxigênio; porém, como resultado da mineração, é colocada em contato com ar e água, ocorrendo as seguintes reações.



A reação 01 produz acidez e, se o potencial de oxidação for mantido, a oxidação do Fe²⁺ para Fe³⁺ ocorrerá, consumindo parte da acidez pelos íons Fe²⁺:

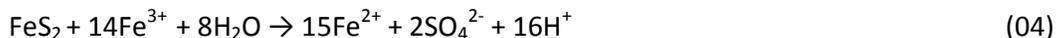


Essa reação ocorre abioticamente em valores de pH mais elevados (acima de 4,5). Em valores de pH menores que 3,5, a oxidação do íon ferroso (Fe²⁺) a férrico (Fe³⁺) somente em presença de oxigênio passa a ser muito baixa. Entretanto, a reação pode ser acelerada pela ação de bactérias quimiolitotróficas acidófilas do gênero *Thiobacillus*. Essas bactérias catalisam a reação 02, que pode ser acelerada em até 10⁶ vezes.

Se o pH da solução for maior do que 3, o Fe³⁺ irá hidrolisar precipitando na forma de hidróxido e gerando acidez, conforme equação 03:



Se o Fe³⁺ gerado na reação 02 estiver dissolvido, poderá oxidar a pirita (FeS₂) pela reação indireta:



O Fe^{2+} resultante da reação 04 será oxidado para Fe^{3+} pela reação 02 e estará novamente disponível para oxidar a pirita, entrando em um ciclo crescente, conhecido como “autocatálise”. O ciclo permanece até que toda pirita acessível aos agentes da reação tenha sido consumida. O baixo pH da água aumenta a solubilidade de outros metais existentes no meio. No caso da mineração de carvão, além do ferro, a drenagem ácida de mina apresenta valores significativos de alumínio, manganês e zinco. Pode também apresentar traços de cobre, níquel, chumbo e outros metais, dependendo da região e gênese da jazida.

Segundo Kontopoulos (1998) e Parker e Robertson (1999), as bactérias têm um papel muito importante na oxidação da pirita, especialmente em pH menor que 4,0, uma vez que são responsáveis pela conversão do Fe^{2+} a Fe^{3+} . As bactérias que são importantes para a oxidação da pirita pertencem aos gêneros *Thiobacillus* e *Leptospirillum*. O gênero *Thiobacillus* inclui a espécie *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que é o micro-organismo mais comumente envolvido na oxidação de sulfetos metálicos. É uma bactéria quimiolitotrófica acidofílica capaz de oxidar o Fe^{2+} , o enxofre e os sulfetos metálicos. A espécie *Acidithiobacillus thiooxidans* também é encontrada nas regiões onde há geração de DAM, sendo capaz de oxidar o enxofre a sulfato, ainda que não consiga oxidar o ferro. A espécie *Leptospirillum ferrooxidans* participa dos processos de oxidação associados ao *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Essas bactérias podem atuar na faixa de pH de 1,4 a 4,0 e temperatura de 5 °C a 35 °C, mas as condições ótimas estão ao redor do pH 2 e da temperatura de 30-35 °C. Contudo, muitas outras bactérias podem ser encontradas em resíduos de mineração (Gould e Kapoor 2003; Bryan 2006). Na Figura 11 observa-se um esquema demonstrando as reações de oxidação da pirita de uma maneira geral.

Como visto até o momento, a DAM é uma solução ácida rica em metais tendo o ferro como elemento majoritário, independentemente do local de geração. A concentração dos outros metais depende da composição do material associado à pirita, porém é comum a ocorrência de metais como o alumínio, manganês e zinco em concentrações apreciáveis.

Autores (Johnson e Murray, 1997; Blowes et al., 2005; INAP, 2009) apresentam os principais fatores que influenciam a cinética da oxidação de sulfetos como sendo:

atividade microbiológica, temperatura, pH, características físicas do material e relação ferro ferroso(Fe^{2+})/ferro férrico(Fe^{3+}).

Um dos fatores chaves por manter a oxidação da pirita é a relação entre ferro ferroso e ferro férrico. O ferro férrico oxida a pirita e os microrganismos convertem o ferro ferroso para férrico fazendo assim parte integrante do processo.

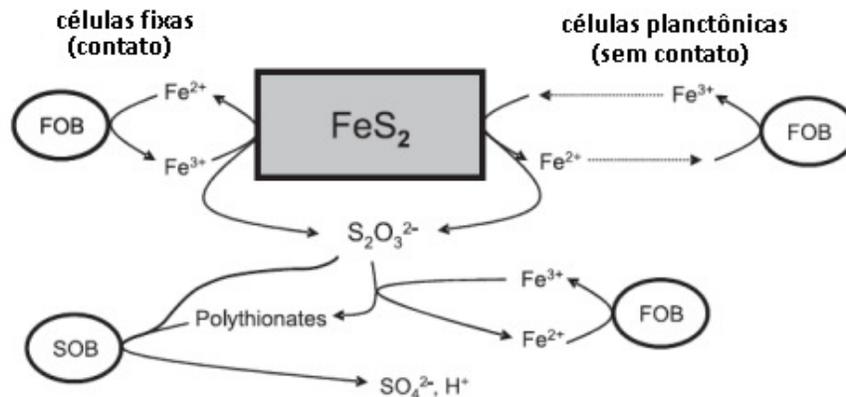


Figura 11 Oxidação da pirita por bactérias acidófilas; FOB: bactéria oxidante de ferro, SOB: bactéria oxidante de enxofre (Bryan, 2006).

As condições climáticas (temperatura, precipitação e a natureza do entorno) têm uma importante participação para a formação da DAM. A Figura 12 mostra os caminhos que a água pode seguir em uma área de depósito de rejeitos até atingir os recursos hídricos subterrâneos.

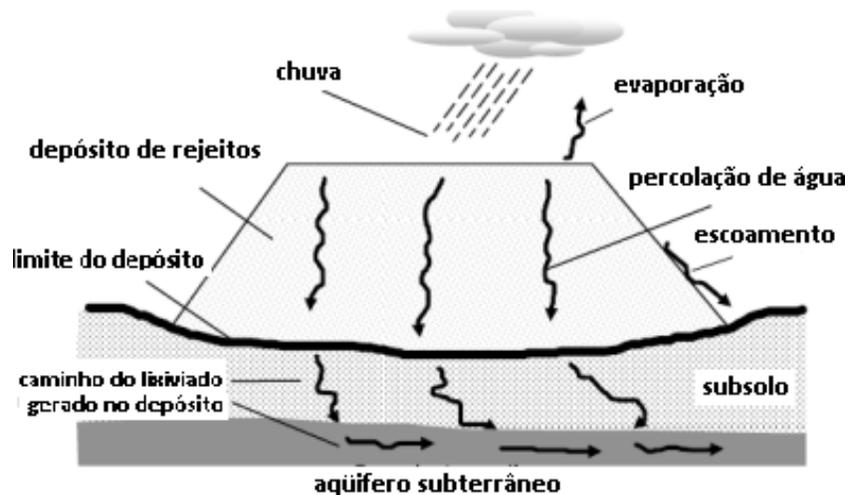


Figura 12 Representação de um fluxo hidrogeológico de um depósito de rejeitos (modificado de Hansen, 2004).

As condições de evaporação, escoamento superficial e percolação de água no depósito são diretamente afetadas pelas condições climáticas do local. Observa-se que o processo de formação da drenagem ácida em países tropicais, como no caso o Brasil, normalmente é mais intenso. As elevadas temperaturas e a pluviosidade aceleram as reações de oxidação química bem como a proliferação das bactérias acidófilas (Pastore e Mito, 2000).

Áreas quentes e secas são conhecidas pelos seus altos índices de evaporação, afetando o nível de saturação dentro do depósito, principalmente próximos a superfície. Água de chuva e adições de lodos diretamente oriundos do processo introduzem água, criando condições para a geração de DAM. Em locais com altos índices pluviométricos, grandes quantidades de água percolam através dos depósitos causando maiores vazões de lixiviado. A chuva também afeta o escoamento superficial e a erosão dos depósitos, afetando assim a cobertura destes. As características do entorno também tem um papel importante. O tipo de solo no qual o depósito está situado afeta a taxa de percolação da água do depósito para os aquíferos subterrâneos.

Como discutido anteriormente, água e O_2 são necessárias para a oxidação da pirita ocorrer. O CO_2 também é essencial em sustentar populações microbianas (fonte de carbono). Assim, a difusão de ar e a percolação de água no interior de um depósito fornecem as condições para a geração de acidez. Lefebvre et al. (2001) conduziram um estudo nos processos dentro de depósito de rejeito, realçando a importância da difusão e da convecção gasosa na geração de DAM. Garcia et al. (2005) confirmaram através de experimentos, a exigência de ar e água para a formação de lixiviados ácidos de barragens contendo rejeitos piritosos.

Tanto a mineralogia quanto as técnicas de processamento usados no beneficiamento do minério de interesse também influenciam na geração de drenagem ácida de minas. Minerais sulfetados presentes em um depósito, incluindo pirita (FeS_2), pirrotita ($Fe^{(1-x)}S$) e traços de outros sulfetos, tais como calcopirita ($CuFeS_2$), não recuperados através do processo de concentração, são minerais chaves para a formação de DAM (Broadhurst, 2007). A geração de ácido a partir da oxidação dos

sulfetos pode ser contrabalanceada pela presença de minerais alcalinos ou consumidores de ácido dentro do depósito. Estes produzem condições básicas em solução, retardando a produção de ácido. Grupos minerais que são conhecidos por ter capacidade de neutralização incluem carbonatos, aluminossilicatos e oxihidróxidos (Blowes et al., 2003).

O comportamento dos rejeitos é também influenciado pelos processos de beneficiamento propriamente dito, incluindo as etapas de liberação (cominuição) e técnicas de separação. Estes processos ditam a distribuição do tamanho das partículas e o grau de liberação dos sulfetos no depósito. Processos como a flotação, que depende das diferenças de hidrofobicidade para separar minerais de interesse (Wills, 1997), o tamanho de partícula exigido é muito pequeno ($<150 \mu\text{m}$). Isto aumenta o grau de liberação de minerais geradores de acidez, aumentando assim as taxas de oxidação e com isso a taxa de geração de DAM. Por outro lado, reduzidos tamanhos de partícula também afetam os fluxos dentro do depósito, reduzindo a permeabilidade com a redução do número de vazios (Wu et al., 2007). Depósitos com partículas grossas, embora tenham maior permeabilidade, apresentam menores taxas de oxidação de sulfetos devido a reduzida liberação de minerais sulfetados (Tran et al., 2003).

A estrutura física atua diretamente nos fluxos internos e ao redor de um depósito, controlando as taxas de fluxo de ar e água. Argilas e outros materiais impermeáveis dentro ou na parte superior do depósito podem reduzir a vazão de lixiviado, enquanto coberturas sobre o depósito evitam evaporação, difusão do ar ou percolação de água de chuva. A maneira como o material é adicionado ao depósito pode também afetar o potencial para a produção de acidez. Por exemplo, a disposição de rejeitos com ultrafinos de bacias de sedimentação pode reduzir a permeabilidade de ar e água (Schneider, 2006). Estas técnicas de prevenção serão detalhadas na seção 2.5.

A oxidação de sulfetos metálicos e a subsequente mobilização e solubilização de metais e/ou elementos traços tóxicos ao ambiente pode resultar na contaminação de ecossistemas aquáticos. Os metais dissolvidos na drenagem ácida de minas podem incluir ferro, alumínio, manganês, zinco, chumbo, cobre, prata, cádmio, entre outros

(EPA, 2000). Embora o ácido possa ser neutralizado no meio ambiente receptor, alguns destes metais dissolvidos podem permanecer em solução.

Segundo Féris (2001), a DAM provoca um grande número de reações e fenômenos físico-químicos em série durante sua migração no recurso hídrico atingido, tais como: (i) precipitação de hidróxidos metálicos que se depositam ao longo do caminho do fluxo das águas percoladas; (ii) adsorção ou bioacumulação de íons de metais pesados; (iii) reações de troca iônica; (iv) complexação metálica por substâncias húmicas; e (v) 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: (i) identificação e quantificação dos usuários das águas potencialmente afetadas pela área de disposição; (ii) medidas de fluxo médio e máximo das águas superficiais para as estações, seca e chuvosa; (iii) determinação das variações da qualidade da água ao longo do ano para os diferentes fluxos; (iv) determinação da configuração do corpo hídrico; (v) medidas de nível d'água subterrânea; (vi) medida do volume disponível no aquífero e taxa de recarga; e (vii) determinação do coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica do material granular ou rocha fraturada na qual o aquífero se localiza.

Ainda, depois de formada, a drenagem ácida pode escoar através do depósito e o lixiviado pode infiltrar no solo e ser carregado para as águas subterrâneas. Assim, é formada uma pluma de poluição de águas acidificadas, contendo altos níveis de sulfato e outros produtos tóxicos.

Em áreas mais úmidas, concentrações de poluentes tendem a ser mais diluídas se comparadas com climas mais secos, onde a reduzida precipitação e evaporação podem causar condições muito ácidas com concentrações de metais e sulfato extremamente altas (Bryan et al., 2006).

A natureza dos movimentos de águas subterrâneas pode variar de local para local. Em locais onde as velocidades das águas são baixas, um longo tempo pode existir entre o início da DAM e as primeiras indicações de contaminação. Este movimento lento associado com taxas de oxidação relativamente lentas pode prolongar o espalhamento da água contaminada por centenas de anos após o fechamento da mina, fazendo a remediação ficar complexa (Broadhurst et al., 2007; Bryan, 2006; Blowes et al., 2005).

Elementos traços são geralmente associados com sulfetos minerais. Embora eles estejam presentes em concentrações muito menores, a degradação de sulfetos pode mobilizar elementos como arsênio. A solubilização de arsênio em fluxos hidrodinâmicos ácidos pode deixar a DAM em níveis tóxicos (Broadhurst, 2007).

Maluleke (2006) estudou a reatividade de co-elementos dentro de um depósito de rejeitos de cobre com altos teores de sulfetos e mostrou que, mesmo dentro de sistemas com baixa acidez, significativas quantidades de metais majoritários (Ca, Mn, Mg e Cu) e metais traço (Cd, Co, Zn, Ni, Pb) podem ser mobilizadas e solubilizadas. Já em ambientes com alta acidez certamente há a liberação e biodisponibilidade de elementos traços (As, Mo, Se). De acordo com Blowes et al. (2005), a liberação destes metais para sistemas aquáticos naturais, como rios e lagos, pode ter efeitos prejudiciais na vida aquática através da bioacumulação.

A importância do entendimento e caracterização da contaminação por metais traço tem sido realçada por diversos autores (Warhurst e Noronha, 2000; Broadhurst, 2007; Napier-Munnet et al., 2008) e é foco de pesquisas em âmbito mundial. Depósitos minerais representam um sistema extremamente complexo de muitos elementos. Alguns têm severas implicações ambientais mesmo em baixas concentrações e outros são insignificantes, mesmo em concentrações relativamente elevadas. Previsões adequadas de mobilidade e de risco ambiental são necessárias para que o foco possa ser colocado sobre os elementos com maior potencial poluidor.

Conforme Akcil e Koldas (2006), toda mina é única em termos de potencial de geração de DAM. Assim, a natureza e o tamanho do risco associado e a viabilidade de mitigação irão variar de local para local. Não existem métodos padronizados para a classificação, quantificação e redução do risco da DAM. As empresas podem tomar

diferentes decisões para minimizar os impactos ambientais, devendo começar com o reconhecimento dos riscos no contexto do seu empreendimento. Em situações onde a geração de DAM é inevitável ou provável, medos de contenção ou remediação tornam-se necessários. Pesquisas também devem ser direcionadas com a intenção de identificar maneiras e prevenir a geração. Portanto, projetistas de empreendimentos mineiros devem ter conhecimento sobre as ferramentas de prevenção, controle e tratamento de DAM e, especificamente, identificar técnicas que irão minimizar ou evitar impactos da drenagem ácida.

2.4. Controle da Drenagem Ácida de Minas

Todas as operações mineração geram rejeitos. O grande problema para o seu gerenciamento são o volume e a composição química dos mesmos. Grandes volumes implicam em como e onde dispor estes rejeitos. A composição acarreta nas características físico-químicas do fluxo aquoso gerado. Uma vez iniciado o processo de geração de DAM, o problema tende a piorar e fica extremamente difícil de lidar.

Segundo Kontopoulos (1998) os métodos de controle da DAM podem ser classificados em três categorias (Tabela 5):

(a) *métodos preventivos* - previnem as reações de geração de acidez excluindo um dos elementos causadores de DAM (remoção e/ou isolamento de sulfetos, exclusão de oxigênio por cobertura de água, exclusão de oxigênio por coberturas secas e selagem, adição de aditivos alcalinos e bactericidas);

(b) *métodos de contenção* - controlam a migração de DAM para o meio ambiente (prevenção do fluxo de água, paredes porosas reativas e disposição em estruturas de contenção construídas); e

(c) *métodos de remediação* - tratam a DAM gerada (os métodos de remediação são divididos em tratamentos passivos e ativos). Os passivos são aqueles que não exigem rígido controle na operação, por exemplo, os drenos anóxicos de calcário e os banhados construídos. Os tratamentos ativos são os que exigem operação controlada contínua, por exemplo, as estações de tratamento que utilizam sistemas de neutralização-precipitação.

Dado os grandes volumes de rejeitos envolvidos e devido ao fato de que a DAM pode ser gerada por décadas ou séculos, qualquer ação de mitigação é extremamente dispendiosa, tanto em termos de custo com capital quanto operacional. Assim, ações de preventivas são preferíveis, especialmente nas fases de planejamento de novas instalações.

Tabela 5 Métodos preventivos, métodos de contenção e métodos de remediação utilizados para o controle da drenagem ácida de mineração (Kontopoulos, 1998).

	- remoção/isolamento dos sulfetos;
	- exclusão de oxigênio por cobertura de água;
Métodos preventivos	- exclusão de oxigênio por cobertura seca;
	- aditivos alcalinos;
	- bactericidas.
	- prevenção do fluxo de água;
Métodos de contenção	- paredes reativas porosas;
	- disposição em estruturas de contenção.
	<i>Sistemas ativos:</i>
	- neutralização e precipitação (hidróxidos ou sulfetos);
	- adsorção/troca iônica;
	- osmose reversa;
	- eletro-diálise.
Métodos de remediação	<i>Sistemas passivos:</i>
	- filtro aeróbio de calcário;
	- dreno anóxico de calcário;
	- barreira permeável reativa;
	- banhados construídos (<i>wetlands</i>);
	- reator de fluxo vertical.

Conforme Johnson e Hallberg (2005) técnicas preventivas são as utilizadas para prevenir ou minimizar a geração da DAM. Porém, em certos casos, sistemas preventivos não são tecnicamente viáveis ou já não podem ser aplicados. Desta maneira, as técnicas de remediação são inevitáveis. Os processos de remediação são divididos em ativos e passivos. Os sistemas passivos tem a vantagem de exigirem baixa manutenção (e custos recorrentes) do que os sistemas ativos, embora eles possam ser caros ou impraticáveis de instalar em primeira instancia. Os processos passivos podem ser divididos em sistemas biológicos de remediação e sistemas abióticos de remediação.

O controle da DAM na mineração de carvão no sul do Brasil é predominantemente realizada por método ativo em estações de tratamento. Envolve a neutralização com cal seguida de precipitação dos hidróxidos metálicos. Geralmente emprega-se uma etapa floculação para melhoria da etapa de separação sólido-líquido, que pode ocorrer em lagoas de sedimentação, sedimentadores convencionais, sedimentadores lamelares ou unidades de flotação por ar dissolvido (Silva e Rubio, 2009).

Estudos foram conduzidos com satisfatórios resultados com o intuito de controlar a DAM gerada em Santa Catarina por meio da adição de coberturas secas (Soares et al., 2009) e aditivos alcalinos (Machado, 2013). Entretanto do ponto de vista prático nada foi feito até então e poucos estudos tem como objetivo o aproveitamento dos rejeitos em outros setores ou a redução destes antes de sua geração.

Existem diversos outros métodos para prevenção e controle de DAM, tais como: disposição por camadas de rejeitos ultrafinos para evitar a percolação de ar e água através do depósito, disposição subaquática de rejeitos para prevenir a oxidação dos sulfetos, backfill, co-disposição ou mistura de aditivos alcalinos. Embora estes métodos mostrem um entendimento de que o problema com a DAM existe e deve ser resolvido, eles atuam no problema somente no fim-de-tubo, muitas vezes aumentando o volume das pilhas e os impactos à longo prazo e não são bem entendidos antes da implantação. A situação após o encerramento das atividades é incerta e a remediação da DAM é difícil e dispendiosa. Assim, surge a necessidade de uma nova sistemática de abordagem, que será o foco principal do trabalho aqui apresentado. A abordagem consiste na recuperação de materiais, que não deixa de ser uma ampliação do método de remoção e isolamento de sulfetos.

Segundo Kontopulos (1998) remoção ou isolamento de sulfetos é uma estratégia aplicável para rejeitos ricos em enxofre. O procedimento consiste na separação do enxofre mineral (pirítico) para uma fração de menor volume, que poderá ser disposto sob condições controladas ou aproveitado economicamente. O restante do material, com menor teor de enxofre, apresentará um menor potencial de geração de acidez.

Dessulfurização ambiental é uma das mais promissoras técnicas propostas nos últimos anos para limitar a produção de drenagem ácida de minas formada a partir de rejeitos de mineração. Estudos demonstram a viabilidade de produzir volumes reduzidos de concentrado de enxofre o qual pode ser gerenciado de forma mais adequada.

Por exemplo, Benzaazoua et al. (2008) demonstraram que é possível separar uma quantidade de sulfetos dos rejeitos usando processos de flotação. Produziram uma fração dessulfurizada (não geradora de ácido) e uma fração de menor volume rica em enxofre e que pode ser retornada para o subsolo de uma mina de cobre no Canadá como parte de uma pasta cimentada para backfill. Concluem que esta abordagem pode reduzir significativamente o volume dos rejeitos formadores de ácido.

Nesta mesma linha, Hesketh et al. (2010) propõe uma abordagem integrada para o gerenciamento e mitigação da DAM dos rejeitos piritosos gerados em uma mina de cobre. Os ultrafinos foram separados com o uso de flotação em uma fração com alto teor e uma fração com reduzido teor de enxofre. Testes padrões de predição de drenagem ácida de minas foram utilizados e confirmaram que a fração com reduzido teor de enxofre não gera acidez mesmo em condições extremas de oxidação.

Buscando a recuperação de carvão e a mitigação de drenagem ácida de minas na África do Sul, Kazadi Mbamba et al. (2012) realizaram um processo de flotação em dois estágios. O objetivo do primeiro estágio foi a separação de carvão. O segundo estágio buscou a remoção do enxofre presente nos rejeitos do primeiro estágio. Os resultados da caracterização do material e dos testes de predição de DAM demonstraram que é possível recuperar carvão com baixo teor de enxofre e remover a pirita responsável pela geração de ácido facilitando o gerenciamento dos rejeitos finais e evitando a geração da DAM.

2.5. Predição de DAM

A predição do potencial de um material para gerar ácido e liberar metais é um importante ferramenta no controle da geração de DAM, tanto no aspecto ambiental quanto no aspecto econômico (Broughton e Robertson, 1992). Através de testes de predição da geração de ácido pode se avaliar de forma confiável propostas para

reduzir os passivos ambientais e econômicos relacionados à longo prazo. Existem diferentes técnicas e metodologias que podem ser utilizadas na predição do potencial de geração de ácido e qualidade de águas ácidas: comparações geográficas, modelos geológicos, testes estáticos geoquímicos, testes cinéticos geoquímicos e modelos matemáticos (Coastech Research, 1991; EPA, 1994). A Tabela 6 comenta de forma comparativa, as aplicações dos testes estáticos e cinéticos de predição de drenagem ácida de minas.

Tabela 6 Comparação entre alguns testes estáticos e cinéticos de predição de drenagem ácida de minas realizados em laboratório.

Testes estáticos de laboratório	Contabilização de ácidos e bases (ABA) Geração líquida de ácido (NAG)	Classifica as propriedades de geração de ácido do material Curta duração (dias)	Não fornece informações referentes às taxas
Testes cinéticos de laboratório	Testes de coluna Células úmidas Testes biocinéticos	Fornecem informação em relação ao tempo para geração da DAM e ao comportamento geoquímico do material	Difícil de executar e interpretar Longa duração (meses) Custo elevado Incertezas em relação à escala real

A predição do potencial de geração de acidez de rejeitos é vital para o efetivo gerenciamento ou tratamento de resíduos de mineração. Internamente um depósito de resíduos de processamento de carvão contém minerais sulfetados que são potencialmente geradores de ácido, entretanto minerais consumidores de ácido podem estar presentes. A dissolução de minerais neutralizantes, tais como, carbonatos, oxihidróxidos e alumino-silicatos presentes nos depósitos podem neutralizar condições ácidas (Blowes et al., 2003). O entendimento da mineralogia da amostra e das interações entre as fases solúveis é a chave para auxiliar na predição do seu potencial de geração de acidez.

Segundo Kontopoulos (1998) um programa de predição deveria: i) identificar todos diferentes materiais potencialmente gerados pela mina; ii) predizer o potencial de lixiviação de metais pela DAM de cada material na forma e condições ambientais nas quais serão expostos; e iii) criar uma estratégia gerencial e determinar o monitoramento, mitigação e exigências legais requisitadas baseadas no potencial de geração de acidez e lixiviação e proteção ambiental necessária. Abaixo estão

apresentados os princípios básicos dos principais testes estáticos, cinéticos e biocinéticos empregados na predição da geração de DAM.

2.5.1. Testes estáticos de predição de drenagem ácida de minas

Os testes estáticos são usados como um indicador preliminar para identificar os materiais que podem ter potencial de geração de acidez. Determinam o balanço entre os materiais potencialmente formadores de ácido e os materiais potencialmente consumidores de ácido em uma amostra. Geralmente, os minerais que produzem ácido são os sulfetos reativos e os minerais consumidores de ácido geralmente são os carbonatos primários. Mesmo assim hidróxidos, silicatos e argilas são capazes de fornecer potencial de neutralização. O conhecimento mineralógico do material é uma importante peça para os testes químicos. Testes estáticos são simples, rápidos e relativamente baratos de se conduzir. Existe um vasto número de procedimentos estáticos que são usados para determinar as proporções entre materiais geradores e consumidores de ácido. Eles buscam o mesmo resultado final, mas variam na metodologia. Se o resíduo for potencialmente gerador de ácido, este precisará de um método de disposição adequado para prevenir ou mitigar os impactos ao entorno (Lawrence e Scheske, 1997; Price et al., 1997). A seguir são descritos os métodos estáticos mais utilizados.

Método de contabilização de ácido e base (ABA) – Sobek 1978.

O teste de contabilização de ácido e base foi desenvolvido em 1974 para avaliar a geração de acidez por rejeitos de carvão e foi aperfeiçoado por Sobek et al. em 1978 (EPA, 1994).

O potencial de produção de ácido (AP) é determinado a partir da quantidade de enxofre total. Assume que dois mols de ácido serão formados por um mol de enxofre. A unidade para AP é dada em quilogramas de carbonato de cálcio por tonelada de rocha.

O potencial de neutralização (NP) é determinado primeiro pelo teste “fizz” (Tabela 7) para selecionar a força do ácido a ser usado na próxima etapa. Baseado nesta informação, ácido clorídrico é adicionado na amostra e a amostra é fervida até a

reação parar. O resultado é titulado até 7 com hidróxido de sódio para determinar a quantidade de ácido consumido na reação entre o HCl e a amostra.

Tabela 7 Volume e normalidade de ácido hidroclorídrico usado por cada intensidade do teste “fizz” (EPA, 1994).

Teste “fizz”	HCl	
	(ml)	(normalidade)
Nenhum	20	0,1
Fraco	40	0,1
Moderado	40	0,5
Forte	80	0,5

O potencial líquido de neutralização (NNP) é determinado pela subtração de AP pelo NP e é uma medida da diferença entre os potenciais de geração de acidez e neutralização. O valor do pode se tanto positivo quanto negativo. Testes conduzidos por Ferguson (descritos por Lapakko, 1992) indicam que valores de NNP menores que -20 (kg CaCO₃/ton) são provavelmente formadores de ácido. Aqueles com valores de NNP maiores que 20 provavelmente não são formadores de ácido. E finalmente, para valores de NNP entre -20 e +20 é difícil prever o potencial de geração de acidez.

No teste é pressuposto que todo o enxofre da amostra é reativo. Esta hipótese não leva em consideração a presença de gipso a outros minerais sulfatados não reativos. Uma limitação da técnica é a possibilidade de superestimar o das seguintes formas: (i) o uso de um ácido muito forte pode dissolver materiais que não reagiriam para manter o pH da drenagem dentro de um nível ambientalmente aceito (se o pH da amostra não estiver entre 0,5 e 1,8, a verificação do teste “fizz” é necessária novamente); (ii) o uso de ácido fervido pode causar uma superestimação no NP por reagir com carbonatos de ferro e manganês, o qual não seria influenciado em um estado natural de NP (esta observação é problemática com amostras que contém largas quantidades destes carbonatos); (iii) o NP pode ser subestimado pela contribuição de hidróxidos metálicos que precipitam durante a titulação com hidróxido de sódio.

Método de contabilização de ácido e base modificado (ABA modificado) - Lawrence 1989

O Teste de Contabilização de Ácido e Base Modificado é similar ao método anterior com algumas exceções. O AP é calculado a partir do teor de enxofre pirítico

(Lawrence, 1989). Diferentemente do cálculo usando o enxofre total no método tradicional (ABA).

A determinação do NP é feita a temperatura ambiente e por um período de 24 horas. Após é titulado com hidróxido de sódio até pH 8,3 e não até pH 7.

Este método modificado assume que o enxofre presente como sulfato é não gerador de ácido, e, portanto pode subestimar o AP disponível se a Jarosita ou outros minerais sulfatados produtores de ácido estão presentes. Conduzindo a digestão na temperatura ambiente pode-se reduzir a contribuição dos minerais férricos carbonatados na determinação do NP.

2.5.2. Testes cinéticos de predição de Drenagem Ácida de Minas

Para confirmar os resultados dos testes estáticos e resolver algumas de suas limitações uma série de testes cinéticos estão disponíveis. Estes testes dão a oportunidade de estudar os vários fatores que influenciam na dinâmica da DAM, incluindo ciclos de lixiviação, tempo de latência das dissoluções, atividade microbiana e a reatividade relativa dentro de uma amostra. Eles variam de testes de bancada à testes de grande escala realizados em depósitos físicos (Hornberger e Brady, 1998; Blowes et al., 2005; INAP, 2009; Villeneuve et al., 2009).

Os testes cinéticos são diferenciados dos estáticos uma vez que eles tentam imitar as reações de oxidação natural no campo. Enquanto os testes estáticos são realizados em curto prazo (horas a dias), testes cinéticos precisam de longo prazo para ser realizados (meses a anos). Em contraste com os ensaios estáticos os ensaios cinéticos fornecem informações em relação à taxa de oxidação dos sulfetos e, portanto, de produção de ácido, bem como uma indicação da qualidade da água gerada. Testes cinéticos podem ser usados para avaliar o impacto de diferentes variáveis no potencial de geração de acidez. Por exemplo, as amostras podem ser inoculadas com bactérias ou ainda a temperatura pode ser controlada durante os testes. Ainda, mecanismos de controle de DAM podem ser estudados, por exemplo, o efeito da adição de materiais alcalinos.

Deve-se complementar os testes cinéticos com o entendimento de dados empíricos e de caracterização das amostras antes e depois dos experimentos, assim

como área superficial, mineralogia e metais. Tais informações podem afetar a interpretação dos dados e são importantes na comparação espacial e temporal entre amostras

Embora muitos ensaios cinéticos tenham sido desenvolvidos nos últimos 50 anos, existem ainda diversas variações nos aparatos usados bem como uma falta de procedimentos padrão. Isto faz com que a interpretação dos resultados seja difícil entre estudos de diferentes corpos de minério ou amostras de rejeitos (INAP, 2009; Villeneuve *et al.*, 2009; Blowes *et al.*, 2005; Hornberger e Brady, 1998). Testes cinéticos também levam um longo período de tempo (meses a anos) para produzirem resultados significantes (Brown *et al.*, 2009; Villeneuve *et al.*, 2009).

Os ensaios cinéticos tentam imitar as reações naturais de oxidação e fornecer informações a respeito da taxa de oxidação de sulfetos de ambiente bem como uma indicação da qualidade da água da drenagem (Sapsford *et al.*, 2009). Testes cinéticos pode fornecer uma informação incluindo: as taxas relativas de geração de acidez e neutralização, as quais determinam as condições geoquímicas; o tempo para o início da DAM; e, finalmente, a química da drenagem e as cargas finais resultantes para as condições geoquímicas previstas (Price *et al.*, 1997).

Os resultados dos testes cinéticos são frequentemente usados na combinação com os dados dos testes estáticos, análises mineralógicas e modelagem para avaliar controles geoquímicos na composição do lixiviado e conduzir a previsão da qualidade da água sob uma gama de condições. Similarmente, os resultados cinéticos são frequentemente ampliados e utilizados na combinação com balanços hídricos das instalações da mina para determinar a carga e os impactos associados e potenciais para o meio ambiente. Dependendo do uso final dos testes cinéticos, os resultados podem ser expressos em termos de qualidade de lixiviado (massa liberada/volume lixiviado/unidade de tempo), carga baseada em massa (massa liberada/massa total/unidade de tempo), ou carga baseada em área superficial (massa liberada/área superficial total/unidade de tempo). As reações geoquímicas e as taxas das reações mais comumente monitoradas através dos testes incluem oxidação de sulfetos, esgotamento do potencial de neutralização e dissolução mineral.

Não existe um teste específico que produz todas as informações químicas exigidas para avaliar todos os rejeitos de mineração sob todas as condições de disposição. Em todos os casos, uma amostra é submetida à periódica lixiviação e o lixiviado é coletado para análise. Os vários métodos disponíveis podem diferenciar entre si na quantidade de amostra usada, tamanho de partícula, volume do efluente gerado, duração do teste, grau de oxigenação, ou natureza do lixiviante. Portanto, é importante que os objetivos dos testes cinéticos estejam claramente definidos para que o teste apropriado seja selecionado e ajustado para simular as condições específicas e uso pretendido dos dados.

Assim, embora existam um considerável número de protocolos de testes cinéticos, somente os testes de células úmidas seguem um procedimento padrão (ASTM, 2007), o qual será a seguir detalhado.

Teste de células úmidas (ASTM D5744/2007)

De acordo com a norma ASTM D5744, este teste é um procedimento que acelera a taxa de lixiviação natural de uma amostra de material sólido no qual o lixiviado produzido é coletado e quantificado de acordo com o desejado. Produtos solúveis são mobilizados por um determinado volume de lixiviante que é analisado semanalmente. Se conduzido de acordo com a norma este tem as taxas de esgotamento dos metais contidos na amostra analisada em uma magnitude maior que as taxas observadas em campo.

Este teste é projetado para aumentar a taxa de degradação geoquímica para 1 kg de amostra de material sólido e produzir um efluente semanal que pode ser caracterizado pelos produtos solubilizados. Este método é conduzido em cada amostra em uma célula cilíndrica. Múltiplas células podem ser organizadas em paralelo, esta configuração permite testes simultâneos de diferentes amostras de material sólido. O procedimento descreve que os ciclos devem ser semanais com três dias de ar seco (umidade menor que 10%) e três dias de ar úmido (umidade relativa de aproximadamente 95%) bombeado através da amostra, seguido de uma lixiviação com água no dia 7. O propósito deste teste é determinar o seguinte: (i) se um material sólido irá produzir um efluente ácido, alcalino ou neutro, (ii) se o efluente contém íons (incluindo metais traço) que representam produtos solúveis produzidos durante um

período de tempo específico e (iii) a taxa no qual estes íons serão liberados (a partir dos sólidos para o efluente) sob as condições controladas do teste.

Dependendo da amostra, a duração do teste pode precisar ser estendida. O monitoramento das cargas de sulfato e metais dissolvidos é importante para acompanhar as reações de oxidação e a mobilidade dos metais. Dois pontos são importantes quando usamos testes cinéticos: (i) se a amostra foi permitida reagir antes do teste começar (ex: no armazenamento) pode haver uma acumulação dos produtos de oxidação para a amostra - este seria liberado nas primeiras lavagens de água, e (ii) uma drenagem neutra pode levar a um resultado incorreto do potencial de acidez se o período de teste não for longo o suficiente.

Em resumo, a predição de DAM é uma peça importante no gerenciamento e controle de águas ácidas em sua fonte. Subestimação ou superestimação de geração de ácido podem carregar a decisões incorretas tanto em termos de prevenção de drenagem ácida quanto em disposição final dos rejeitos. Para este fim, resultados dos testes estáticos em combinação com os testes cinéticos foram usados nesta tese para classificar os rejeitos brutos e os submetidos a alguma intervenção para avaliar seu comportamento em relação a geração de drenagem ácida de minas.

2.6. Processamento de minérios e o beneficiamento de carvões

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

O conjunto de operações realizadas no processamento de uma matéria-prima mineral inclui: fragmentação (redução do tamanho das 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).

Segundo Galery et al.(2007), os principais objetivos da fragmentação são: (a) atingir o grau de liberação necessário, separando os minerais de valor dos minerais sem valor (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 os minerais de valor. Os processos de beneficiamento podem ser divididos em: (a) processos baseados em diferenças de gravidade (meio denso, jigagem, espirais, mesas, ciclonagem); e (b) processos baseados em fenômenos superficiais (flotação, aglomeração oleosa); (c) processos magnéticos baseados no comportamento das partículas minerais sob a ação de um campo magnético (Peres et al., 2007). No presente trabalho, os processos gravimétricos apresentam especial importância.

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. Não necessitam de insumos químicos e são menos influenciados pela composição da água. A Figura 13 apresenta diferentes métodos de beneficiamento gravimétrico e sua aplicação teórica de acordo com a granulometria do produto.

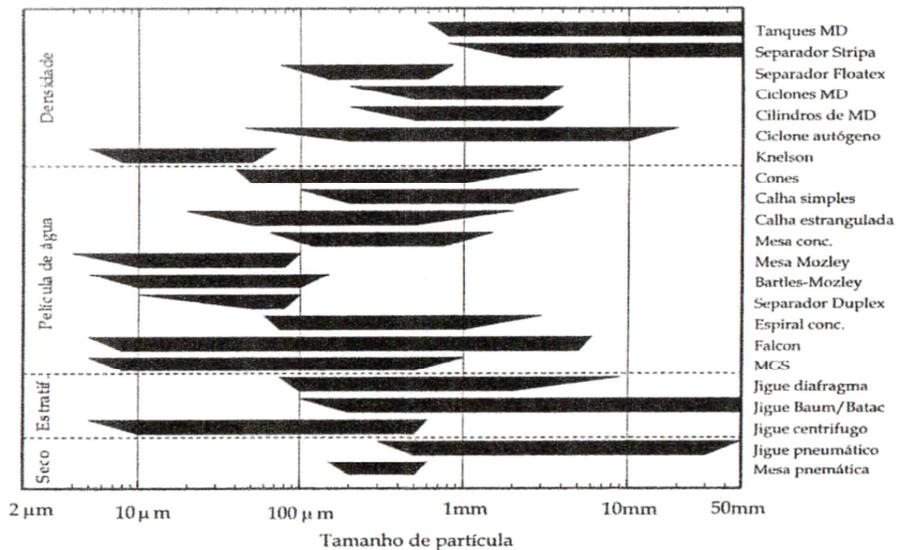


Figura 13 Aplicabilidade de diferentes métodos de concentração gravimétrica em função da granulometria (Tavares e Sampaio, 2005).

No caso do carvão mineral, o material de valor são os macerais (vitrinita, liptinita e inertinita), com maior teor de carbono e menor densidade ($D=1,3$ à $1,5$) que os minerais comumente presentes nas rochas sedimentares associadas ao carvão ($D=2,5$ à $2,7$). A pirita, também apresenta uma densidade diferenciada ($D=4,9$ à $5,1$). A Figura 14 apresenta os efeitos do tamanho das partículas de carvão na precisão do beneficiamento.

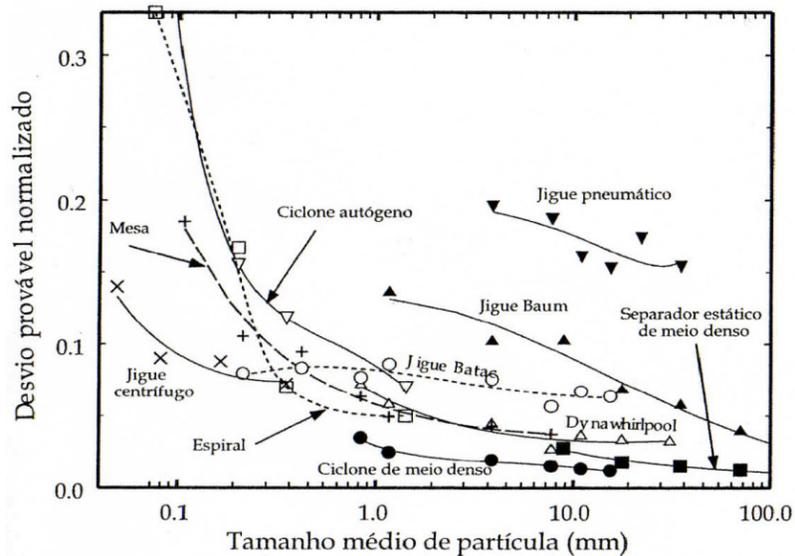


Figura 14 Efeito do tamanho de partícula na precisão de separação no beneficiamento de carvão (Tavares e Sampaio, 2005).

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 concentradores, espirais, calhas, jigues (custo mais baixo) (Leonard, 1979).

Como o carvão mineral ROM brasileiro contém elevados teores de matéria mineral e pirita, o beneficiamento é fundamental para a sua utilização. O processamento do carvão normalmente é realizado por operações de cominuição, classificação granulométrica, separação gravimétrica e flotação (este último no caso dos ultrafinos). A distribuição dos macerais no jazimento é o que vai determinar a eficácia na lavagem de carvão. A dificuldade de beneficiamento de alguns carvões Gonduânicos é justamente devido à grande quantidade de matéria mineral, muitas vezes presente de forma finamente disseminada. Outra dificuldade é devido às diferenças de densidade entre os macerais. A vitrinita apresenta densidade 1,28-1,33; a liptnita densidade 1,00-1,25 e a inertinita densidade 1,34-1,45 (Taulbee et al., 1989).

Os métodos de beneficiamento dependem em grande parte do tamanho e distribuição das partículas do carvão. No Brasil, plantas de beneficiamento com jigues e meio-denso são as mais utilizadas para a lavagem de partículas grossas de carvão (entre 50,8 e 2,0 mm). Estes equipamentos operam com as diferenças na densidade relativa entre o carvão e a matéria mineral. Finos de carvão (-2,0 +0,5 mm) são beneficiados utilizando espirais e mesas separadoras (estas mais no passado). Por fim, os ultrafinos de carvão (abaixo de 0,5 mm) são beneficiados por ciclones e flotação. O produto da flotação é o que contém menor teor de cinzas e é utilizado para fins metalúrgicos. A Figura 15 apresenta uma configuração de um típico circuito de beneficiamento de carvão mineral em uma planta localizada na região sul de Santa Catarina. A Figura 16 apresenta um diagrama mostrando os diferentes produtos e co-produtos obtidos a partir no beneficiamento do carvão.

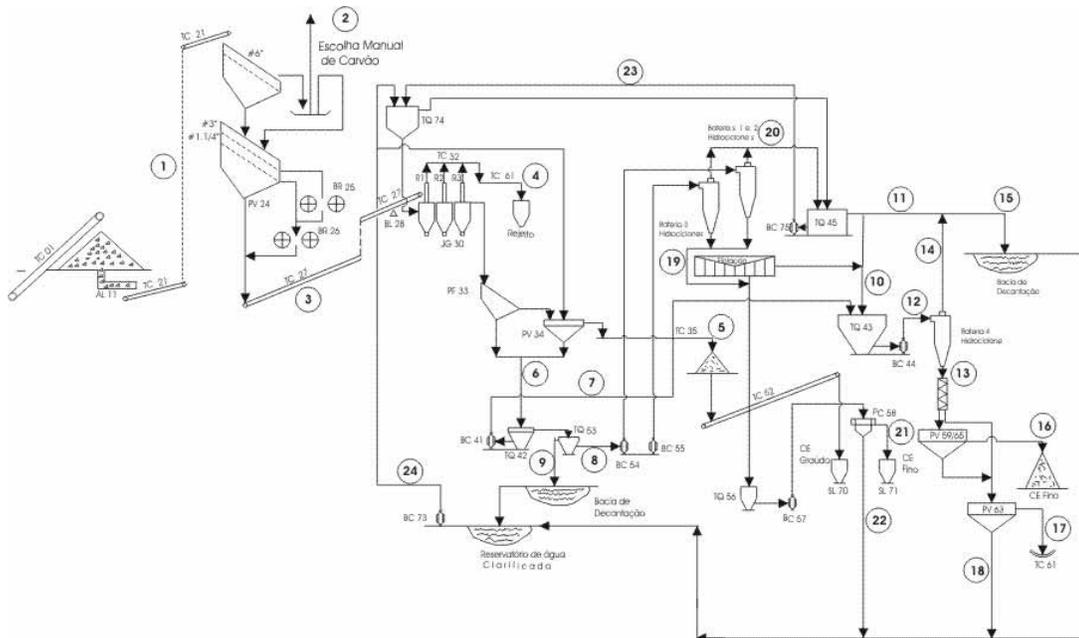


Figura 15 Exemplo de circuito de beneficiamento de mineral no Estado de Santa Catarina.

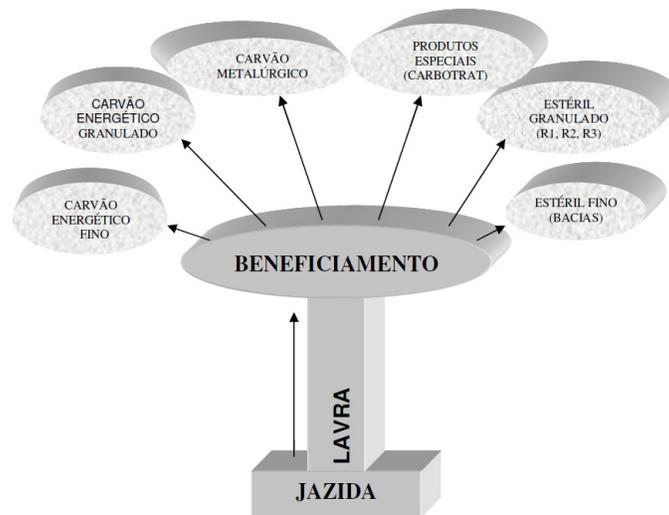


Figura 16 Diagrama dos produtos e co-produtos da mineração do carvão (Schneider, 2006).

2.6.1. Curvas de Lavabilidade/Separabilidade e Curva de Partição

A separação da faixa aproveitável do minério ou rejeito pode ser inferida através das curvas de separabilidade densimétrica (Figura 17), também conhecidas como curvas de Henry-Reinhardt e curvas de lavabilidade. Estas curvas são construídas para uma determinada faixa granulométrica; obtendo-se, assim, a recuperação mássica e os teores dos produtos em qualquer densidade particular (Sampaio, 1983). As curvas mais frequentemente utilizadas são: a curva densimétrica, a curva dos

flutuados e afundados e a curva de tolerância (*Near Gravity Material* ou simplesmente NGM). Tais curvas proporcionam dados qualitativos ou quantitativos dos produtos da separação na densidade relativa selecionada. Também fornecem dados sobre a dificuldade da separação gravimétrica dos materiais. Geralmente, os dados são provenientes de ensaios de afunda-flutua também conhecidos como ensaios densimétricos descritos na NBR 8738 (ABNT 1985).

Assim, as curvas de separabilidade permitem extrair informações gráficas que podem ser utilizadas na avaliação das características de lavabilidade de um minério.

A curva densimétrica representa a proporção acumulada de partículas afundadas ou flutuadas esperada em cada densidade do líquido. Para o gráfico de sua elaboração, a proporção acumulada flutuada é plotada no eixo da ordenada e a densidade de separação, no eixo da abscissa. O formato desta curva oferece uma indicação de dificuldade a ser encontrada na separação. Portanto, através dessa curva, pode-se observar em qual intervalo densimétrico se encontra a maior liberação do material orgânico em relação ao material inorgânico, além da maior quantidade de massa acumulada de tais materiais (Tavares e Sampaio, 2005; Pacheco, 2008).

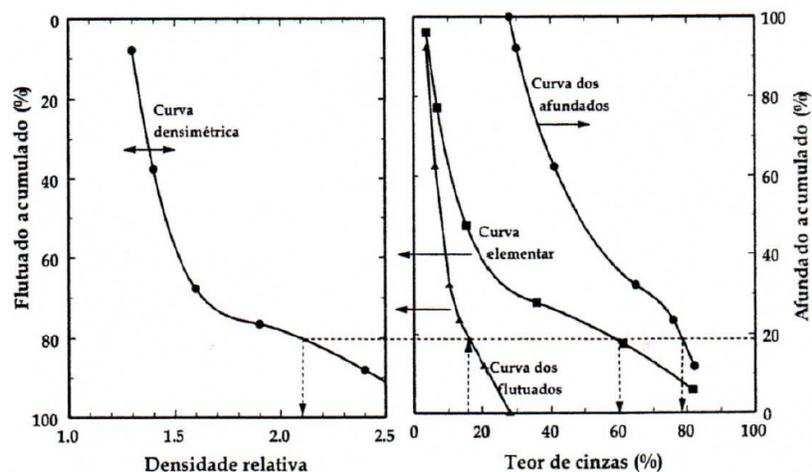


Figura 17 Exemplo de uma curva de separabilidade - carvão (Tavares e Sampaio, 2005).

No gráfico dos flutuados e afundados, os teores são lançados em função da massa acumulada flutuada e afundada, respectivamente, para cada intervalo de densidade. Essas curvas são usadas, juntamente com a curva densimétrica, na previsão de porcentagem de massa e teores dos produtos da separação a qualquer densidade em particular. Alternativamente, o procedimento inverso pode ser usado para

determinar a densidade de separação necessária para atingir um teor desejado no produto afundado ou flutuado. Nessas curvas, o valor a qualquer densidade representa o teor médio das partículas flutuadas ou afundadas naquela densidade (Sampaio e Tavares 2005).

Com relação à curva que representa o NGM, essa é muito importante porque determina a quantidade de partículas que tem densidades próximas à densidade de corte estipulada no equipamento de beneficiamento gravimétrico. Partículas com densidades muito próximas à densidade de separação apresentam maior probabilidade de se reportar ao produto impróprio, causando contaminação do produto flutuado por partículas densas e vice-versa. A curva NGM é preparada a partir da proporção de partículas com densidade dentro de um intervalo estabelecido, em função da densidade de separação. A proporção de material com densidade próxima à de separação é, normalmente, considerada como aquela correspondente ao intervalo de $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ em relação à densidade de corte. Assim, a separação em uma densidade em que os valores de NGM são baixos produz bons resultados mesmo em aparelhos com baixa precisão. Por outro lado, quando os valores de NGM são altos é necessário empregar equipamentos com alta precisão (Tavares e Sampaio, 2005).

Majumber e Barnwal (2004) confirmam a importância da curva NGM e afirmam que é o melhor parâmetro para avaliar o grau de dificuldade do beneficiamento. A Tabela 8 indica o tipo de equipamento gravimétrico que pode ser usado no beneficiamento de carvão de acordo com a escala de valores de NGM.

Tabela 8 Aplicabilidade de processos de separação densimétrica

NGM (%) (distribuição com escala de $0,1 \text{ g/cm}^3$)	Grau de dificuldade esperado	Processo gravimétrico recomendado	Tipo
0-7	Simples	Quase qualquer processo a altas taxas de alimentação	Separação em meio denso, jigues, calhas, cones, mesas, espirais
7-10	Relativamente simples	Processo eficiente a altas taxas de alimentação	
10-15	Moderadamente difícil	Processo eficiente	
15-25	Difícil	Processos de meio denso	Separação em meio denso
> 25	Extremamente difícil	Processos de meio denso com estrito controle da densidade do meio	Separação em meio denso com controle estrito da densidade do meio

Fonte: Bird, *apud* Tavares e Sampaio (2005), modificado

Deve-se ressaltar, todavia, que os dados de recuperação obtidos a partir das curvas densimétricas e das curvas dos afundados e flutuados são para uma perfeita separação. Por essa razão, esses dados são trabalhados como valores teóricos. Dependendo da eficiência do equipamento empregado, os valores práticos podem ser próximos ou diferentes dos valores teóricos. Assim, quanto maior for a eficiência na separação, mais próximos os valores práticos serão dos valores teóricos obtidos através das curvas de separabilidade (Horsfall, 1980). A eficiência de um equipamento na separação em uma determinada densidade de corte pode ser analisada pela curva de partição, também conhecida como curva de Tromp (Figura 18) (Rubio, 1988; Tavares e Sampaio, 2005).

A curva de partição define quantitativamente a proporção de massas por faixa densimétrica que o equipamento distribui para os produtos. Para determinar-se a curva de partição de um determinado aparelho, são necessárias as recuperações e as análises densimétricas dos produtos considerados. O procedimento geral consiste em processar os dados de forma ponderada para o cálculo dos coeficientes de partição ou distribuição de massas. Os coeficientes assim calculados são lançados nas ordenadas enquanto nas abcissas são lançados os valores de densidades médias de cada fração (Rubio, 1988).

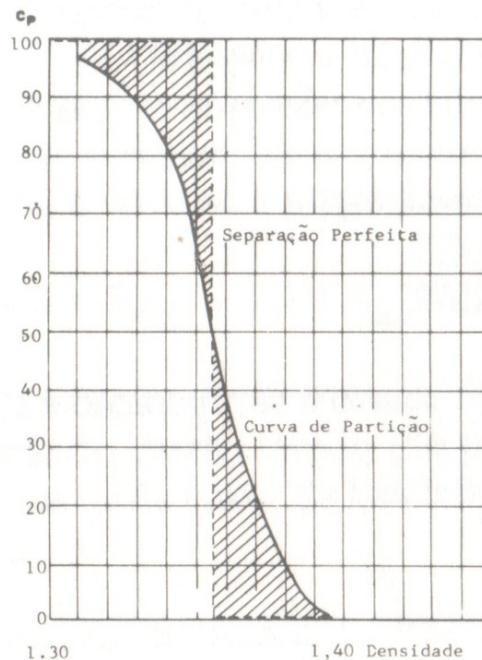


Figura 18 Curva de partição de um equipamento de beneficiamento gravimétrico de carvões.

Os principais parâmetros derivados da curva de partição são (Rubio, 1988):

(a) Densidade de separação ou de corte ($D50$): densidade coincidente com um coeficiente de partição igual a 50%. Representa, portanto, a densidade na qual uma partícula teria igual probabilidade de se reportar ao produto ou rejeito.

(b) Desvio provável (EPM): critério que representa a precisão de separação. É uma medida do desvio da curva de partição em relação a curva de separação perfeita. Numericamente, pode ser calculado como pelas equações (05) e (06):

$$EPM = D50 - D75 \quad (05)$$

ou

$$EPM = \frac{D25 - D75}{2} \quad (06)$$

(c) Imperfeição: envolver a influência da densidade de corte na forma das curvas de partição, pois as separações a baixas densidades de cortes tendem a ser mais precisas que aquelas a altas densidades de corte. A imperfeição pode ser calculada a partir da equação (07) quando água é o meio de separação ou pela equação (08) quando é aplicado meio denso.

$$I = \frac{EPM}{(D50 - 1)} \quad (07)$$

$$I = \frac{EPM}{D50} \quad (08)$$

Alguns valores de imperfeição de equipamentos empregados em beneficiamento gravimétrico estão abaixo listados (Rubio, 1988):

Ciclones de meio denso: 0,01 a 0,03

Tanques de meio denso: 0,02 a 0,05

Jigues: entre 0,08 e 0,3

Mesa concentradora: 0,13 a 0,17

2.6.2. Equipamentos para o beneficiamento de frações grosseiras

Segundo Tavares e Sampaio (2005), a jigagem e a separação em meio denso são as únicas opções para faixas maiores que 2 mm. A jigagem, por ter menores custos de investimento e operacionais, é mais utilizada comercialmente.

A jigagem é um dos métodos mais antigos de concentração gravimétrica e opera em faixas granulométricas grosseiras. Caracteriza-se pela criação de correntes verticais, através de um dispositivo que pode ser um pistão (embolo), um diafragma ou o ar. Dispõe, ainda, de uma superfície perfurada denominada crivo, sobre a qual se introduz uma camada de material (esferas, por exemplo) chamada de leito. A corrente vertical produzida é alternada em relação ao seu sentido, produzindo-se assim, efeitos de expansão e contração do leito. As partículas mais densas vão encontrar maior facilidade de passagem tanto pelo leito quanto pelo crivo, separando-se das partículas menos densas (Peres et al., 2007).

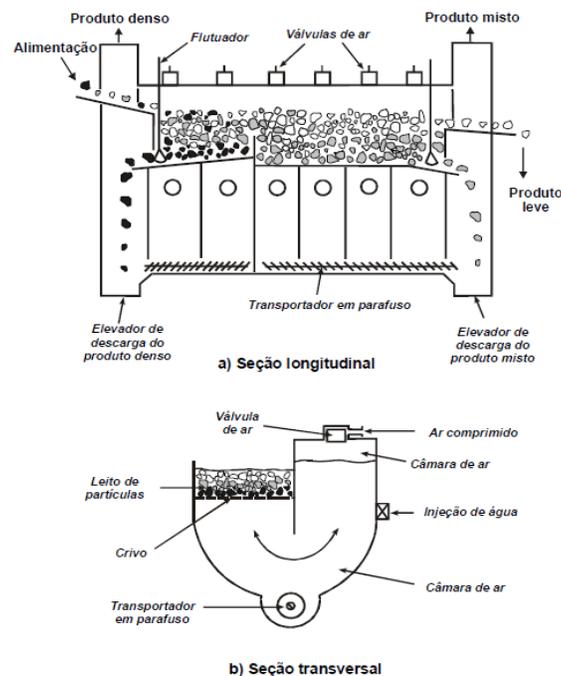


Figura 19 Diagrama esquemático de um jig Baum (Tavares e Sampaio, 2005).

Além de apresentar baixo custo operacional, os jiges são robustos, têm elevada capacidade de processo, são de simples operação e admitem alimentação com granulometria relativamente ampla, o que permite simplificar o fluxograma de beneficiamento. Se comparados a outros separadores, jiges apresentam uma maior

capacidade de absorver grandes flutuações de teor de minério, taxa de alimentação e porcentagem de sólidos. 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 19 apresenta um diagrama esquemático de um jigue Baum em um corte longitudinal e em um corte transversal (Tavares e Sampaio, 2005).

O processo de separação por meio denso consiste em uma alternativa mais direta e precisa à jigagem, pois as partículas só necessitam ser mais leves ou mais densas que o meio, independentemente de fatores como a velocidade de escoamento do fluido. O equipamento foi originalmente desenvolvido para o beneficiamento de carvões de difícil lavabilidade, para os quais a jigagem de mostrava ineficiente. Desde então, com a melhoria do desempenho dos equipamentos e com uma compreensão mais profunda dos princípios de separação, a aplicação deste processo foi gradativamente sendo ampliada. Atualmente, ele é utilizado no beneficiamento de diversos tipos de minério e de materiais secundários (Tavares e Sampaio, 2005).

De um ponto de vista prático qualquer meio deveria ter as seguintes características: ser economicamente viável, fisicamente estável, assim não se decompõe ou degrada durante o processo, quimicamente inerte assim não reage com o minério de interesse, fácil de remover do produto, fácil de recuperar para reuso, baixa viscosidade na densidade de separação e estável perante a variação de densidade (Leonard, 1979).

Os meios densos comerciais são divididos em pelo menos três categorias: líquidos orgânicos, sais dissolvidos em água e suspensões de sólidos finos em água. Com aplicação industrial limitada devido à sua toxicidade e ao seu alto custo, *líquidos orgânicos* são usados em laboratórios para ensaios de afunda-flutua entre os intervalos de 0,9 a 3,3 g/cm³. As soluções com sais dissolvidos em água também são aplicadas em algumas situações, já que é possível se obter uma densidade máxima de 1,4 g/cm³. Porém, o seu caráter corrosivo limita a sua aplicação em grande escala. As suspensões são os meios densos mais aplicados, podendo se alcançar uma densidade de até 3,8 g/cm³, como no caso das preparadas com ferrossilício (14-16% Si). A Figura 20 apresenta a uma representação esquemática de um separador por meio denso com descarga de air lift.

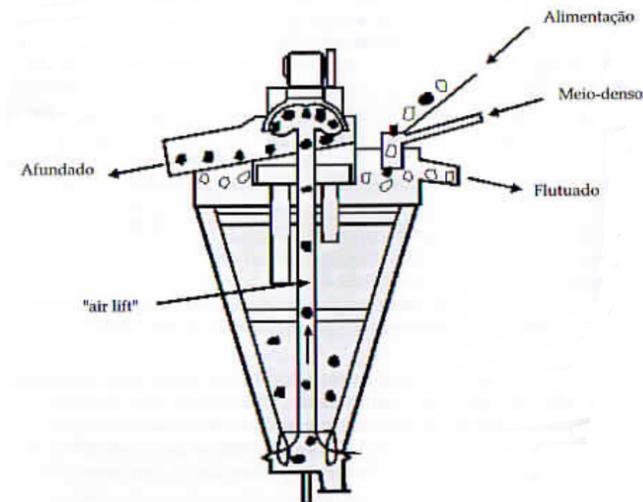


Figura 20 Representação esquemática de um separador por meio denso (Sampaio e Tavares 2005).

2.6.3. Equipamentos para o beneficiamento de frações finas

Há uma grande diversidade de processos aplicados a frações finas e ultrafinas de carvão. Alguns baseados em diferenças de propriedades gravimétricas dos materiais e outros baseados em diferenças nas propriedades físico-químicas:

Processos gravimétricos:

- mesas separadoras; espirais; ciclones; elutriação.

Processos físico-químicos:

- 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. 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).

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 a 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).

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 próximas 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 21 (Tavares e Sampaio, 2005).

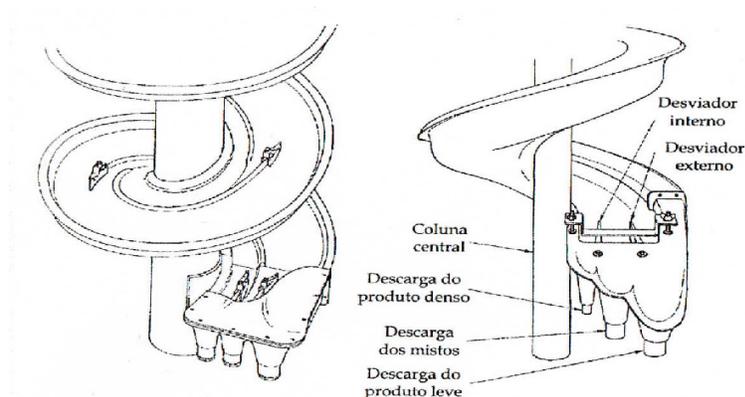


Figura 21 Representação esquemática de espirais concentradoras (Tavares & Sampaio, 2005).

A elutriação com água é um processo de concentração gravimétrico, que consiste na passagem de um fluxo ascendente de líquido (em uma velocidade constante) através de uma coluna contendo partículas de diferentes tamanhos e/ou densidades. As partículas com velocidade de sedimentação maior que a velocidade de elutriação ficam retidas no interior da coluna (i.e. leito de partículas), enquanto que as partículas com menor velocidade de sedimentação são arrastadas pela corrente de líquido, e portando-se ao produto elutriado (Wills e Napier-Munn, 2006). Yoon et al. (1990) estudaram um processo de coagulação seletiva combinada com elutriação para redução do teor de cinzas de um carvão mineral (Elkhorn nº3; teor de cinzas inicial de 12 %), na qual partículas de carvão coaguladas (agregadas) ficam retidas na coluna de separação, enquanto partículas minerais são arrastadas na corrente elutriada. Trabalhos realizados em rejeitos de carvão da camada barro branco, demonstraram que por meio de elutriação é possível se obter concentrados com até 90% de pirita (Englert e Rubio, 2011 e Pompeo et al., 2013).

Por fim, o processo de flotação é utilizado para a separação de frações ultrafinas de carvão, ou seja, que devido a sua baixa granulometria (<0,5 mm), 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.

Detalhes maiores sobre todos estes equipamentos podem ser encontrados nas seguintes referências: Leonard (1979); Rubio (1988) e Tavares e Sampaio (2005).

2.7. Ferramentas e metodologias para o desenvolvimento sustentável na mineração

Diversos autores vêm debatendo a importância da busca do desenvolvimento sustentável na mineração bem como os caminhos e desafios que o setor enfrenta (Ghose, 2003; Hilson, 2003; Driussi e Janz, 2006; Reddick et al., 2008; Guma et al., 2009; Chikkatur et al., 2009; McLellan et al., 2009; Franks et al., 2012).

Conceitos gerais, metodologias e ferramentas são apresentados de diversas formas na literatura. A grande parte deles se refere a um mesmo objetivo: restaurar, manter ou melhorar a qualidade do ambiente à curto ou à longo prazo. Terminologias de gestão ambiental (Tabela 9) são cada vez mais usadas em conferências e nas políticas públicas. Ao mesmo tempo, conceitos chaves continuam a ser mal entendidos ou fracamente redefinidos.

Há várias interpretações para “desenvolvimento sustentável” e “sustentabilidade” (van Weenen, 1990; Freeman et al., 1992; Hilson, 2003; Glavic e Lukman, 2007). Contudo, a Comissão Brundtland, realizada no ano de 1987, definiu “*Desenvolvimento Sustentável*” como a capacidade de satisfazer as necessidades do

presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazerem suas próprias necessidades” (WCED, 1987). Conforme Savitz (2006), o conceito de “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.

Tabela 9 Terminologia popularizada na literatura de gerenciamento ambiental (adaptado de Van Weenen, 1990; Freeman et al, 1992)

<i>Organização, políticas</i>
Estratégia de antecipar e prevenir
Estratégia de evitar
Manejo no fronte
Pesquisa de prevenção de resíduos
Procedimentos de gerenciamento de produtos
Atividades preventivas
Química humana
Redução na fonte
Controle na fonte
<i>Tecnologia</i>
Novas tecnologias
Tecnologias Ambientais
Tecnologia ambiental visando a prevenção
Processo de tecnologia ambiental integrada
Tecnologia apropriada
Tecnologias limpas
Tecnologias mais limpas
Tecnologia sem desperdício
Tecnologias de baixo e zero resíduo
Tecnologia de baixo desperdício
Tecnologia de baixa poluição
Tecnologia de controle da poluição
Tecnologia “add-on”
Teconologias de fim de tubo
Tecnologias de reciclagem
Tecnologias de tratamento de resíduos
Purificação
Tecnologia de limpeza
<i>Resíduos e poluição</i>
Prevenção de resíduos
Residuo zero
Minimizacao de resíduos
Redução de resíduos
Redução da poluição
Reciclagem
Reúso
Co-processamento

O relatório de Brundtland (WCED, 1987) inicialmente promoveu o desenvolvimento sustentável como uma estratégia para a resolução dos problemas globais. Em suma, foi recomendado que governantes representassem as necessidades

da sociedade, da economia e do meio ambiente nos processos de tomada de decisão. No entanto, a Comissão Brundtland enfatizou também que nenhum plano definido existe para o desenvolvimento sustentável, e que as maneiras pelas quais os países iriam alcançar a sustentabilidade variariam entre os diferentes sistemas econômicos e políticos ao redor do mundo. Esta falta de clareza fez com que o termo “desenvolvimento sustentável” se tornasse altamente ambíguo, suportando uma gama de argumentos, estratégias e decisões.

O conceito foi também assimilado pela indústria, criando a “sustentabilidade empresarial”, que 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 (Savitz, 2006).

Conforme McLellan et al. (2009), as diversas definições existentes podem ser agrupadas em dois temas: (a) uso e gerenciamento de recursos; e (b) minimizar os impactos associados ao uso do recurso. Os autores também afirmam que as maiores oportunidades para reduzir os impactos de tais operações estão na fase de projeto e não nas fases de operação e fechamento de um empreendimento. A Tabela 10 apresenta os critérios propostos por McLellan et al. (2009) para avaliar a eficácia das ferramentas existentes para desenvolvimento sustentável nas fases de um projeto.

Assim, a aplicação do termo “desenvolvimento sustentável” na mineração também vem sendo largamente debatido (NRC, 1995). A base para a maioria das discussões achadas em termos de mineração e desenvolvimento sustentável são em relação a natureza finita dos recursos minerais. Os primeiros exemplos incluem exploração mineral sustentável através do aumento da longevidade das reservas através de conservação e reciclagem de minerais e metais (Brown, 1993; Auty e Warhurst, 1993; Mikesell, 1994; Tilton, 1996; Auty e Mikesell, 1998). Na verdade, a indústria de mineração tem geralmente interpretado a mensagem de sustentabilidade como uma combinação de “boas práticas ambientais” e melhoria nos níveis de desempenho socioeconômico. A indústria mineral, em geral, está procurando progredir em relação ao seu comprometimento com os princípios da sustentabilidade pela redução dos impactos das operações de mineração e processamento mineral.

Tabela 10 Critérios propostos para avaliar a eficácia das ferramentas existentes para desenvolvimento sustentável nas fases de um projeto (McLellan et al., 2009).

Fase	Exigências chave	Considerações adicionais
Planejamento de projeto	<ol style="list-style-type: none"> 1. Compreensão dos conceitos de sustentabilidade 2. Compreensão do contexto base do projeto – principais partes interessadas, comunidade, meio ambiente local, economia e suas interações 3. Previsão dos impactos potenciais ou benefícios para o meio ambiente, sociedade e economia em diferentes escalas 4. Compreensão das limitações do meio ambiente e comunidade local e qualquer sinergia que possa auxiliar o projeto ou ser apoiada por ele 5. Gerenciamento das questões através das fases de ciclo de vida do projeto e do produto que possam exigir ou impor impactos externos ou indiretos. 6. Viabilidade sócio, econômica e ambiental à longo prazo com ou sem o projeto – avaliação de riscos 	<ol style="list-style-type: none"> A. Desenvolvimento de um plano de comprometimento das partes interessadas B. Determinação métrica para mensurar o desempenho para sócio, econômico e ambiental; (desenvolvimento sustentável) C. Necessidade do projeto D. Comunicar eficazmente aprendizados para as fases de projeto e operações
Projeto	<ol style="list-style-type: none"> 1. Incorporar/integrar compreensões da fase de planejamento 2. Compreensão do efeito das escolhas do projeto em seus impactos diretos e indiretos em relação ao seu desenvolvimento sustentável: <ol style="list-style-type: none"> i) emissões e recursos usados no ciclo de vida do projeto e produto ii) efeitos da área e fora da área do empreendimento iii) impactos da reciclagem e do fechamento iv) sinergias indústria e sociedade v) redução de resíduo e reuso/reciclagem de co-produtos vi) impactos durante instalação e operação vii) divergência dos impactos base e limitações socioambientais viii) custos e benefícios sociais/econômicos/ambientais 3. Criação e comparação de alternativas baseadas em impactos do desenvolvimento sustentável. 4. Incorporação dos “inputs” das partes interessadas. 5. Métodos de custeio incluindo os métodos não financiáveis dos impactos do desenvolvimento sustentável 6. Otimização e tomada de decisão baseada em um método inclusivo de desenvolvimento sustentável. 	<ol style="list-style-type: none"> A. Inovação B. Boas práticas tecnológicas
Operação	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desenvolvimento de indicadores e relatórios de desenvolvimento sustentável e a melhoria contínua destes indicadores 2. Relação com as partes interessadas 3. Sistemas de gerenciamento, treinamento e documentação 	
Fechamento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planejamento para o fechamento 2. Reabilitação e iniciativas sociais 	

O conceito de “Produção Mais Limpa” engloba uma abordagem contínua e preventiva em relação às questões ambientais. Tem sido usado com sucesso mundialmente no sentido de reduzir resíduos, aumentar a eficiência de processos e melhorar a utilização de recursos naturais. Ferramentas de produção mais limpa vêm

sendo consideradas inclusive para o setor carbonífero internacional. Por exemplo, Reddick et al., (2008) demonstrou que a cadeia produtiva do carvão mineral na África do Sul poderia aplicar ferramentas de P+L para aumentar o desempenho ambiental do setor.

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 1994) boas práticas, substituição de matéria-prima, mudança de tecnologia, troca de produto e reciclagem interna são as cinco regras para alcançar a “Produção Mais Limpa” (P+L). Boas práticas envolvem melhoras em procedimentos operacionais e gerenciais, tais como treinamento e monitoramento. A substituição de matéria-prima contempla o uso de recursos menos poluidores. Mudança de tecnologia inclui a substituição de operações e melhoras no processo de automação. A troca de produto incorpora a necessidade de produção de bens mais duráveis, menos nocivos na hora do descarte ou dentro do conceito de *ecodesign*. Por fim, reciclagem interna se refere a qualquer material reusado ou reciclado dentro do próprio processo. Como o conceito de P+L busca a reduzir a emissão de resíduos, os custos relativos ligados aos resíduos (energia, disposição final, mão de obra, transporte, limpeza, efluentes, tempo de gerenciamento, etc.) também são reduzidos. Assim a abordagem P+L traz benefícios econômicos além de redução nos impactos ambientais.

Na indústria mineral, onde a degradação ambiental é um efeito colateral inevitável, P+L é definida como uma contínua e preventiva abordagem ambiental com o objetivo de reduzir resíduos na fonte de geração. Segundo Hilson (2003), apesar de não ser capaz de eliminar completamente os seus impactos ambientais, a indústria mineral pode utilizar a Produção mais Limpa continuamente de uma maneira física, gerencial e política, fazendo mudanças para minimizar seus impactos até a completa recuperação da mina. Hilson (2000) propõe que práticas focadas em P+L na mineração são aquelas que reduzem a quantidade de rejeitos gerados e melhoram a eficiência na produção. Inclui ações de treinamento, monitoramento e melhores práticas gerenciais. Deve ser aplicada a processos, produtos e serviços do setor mineral. Assim, P+L no contexto da mineração pode, portanto, ser visto como uma abordagem ambiental contínua e preventiva com o objetivo de reduzir resíduos na fonte.

O conceito de ecoeficiência tem sido proposto como uma ferramenta que contribui para o desenvolvimento sustentável. Ajuda os responsáveis a identificar oportunidades para aumentar o desempenho ambiental dentro de suas operações e processos e ao mesmo tempo obter um retorno econômico (Saling et al, 2002). O conselho econômico para o desenvolvimento sustentável (WBCSD, 2000) define ecoeficiência como:

“A entrega de bem e serviços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida, reduzindo progressivamente impactos ecológicos e a intensidade no uso de recursos, por meio do ciclo de vida, para um nível pelo menos em linha com a capacidade de suporte estimada para o planeta Terra”.

Ecoeficiência pode ser quantificada através da Equação 16, a qual relaciona que os impactos econômicos de um produto ou serviço estão associados a impactos ambientais adversos.

$$\text{ecoefficiência} = \frac{\text{Benefícios econômicos de um bem ou serviço}}{\text{Impacto ambiental adverso}} \quad (09)$$

A consideração simultânea de benefícios econômicos e impactos ambientais como uma medida quantitativa da sustentabilidade de um produto ou processo tem proporcionado uma ampla aceitação do termo “ecoefficiência” tanto na indústria e como no governo (ICME, 2001). Vários trabalhos vêm sendo realizados para comprovar a validade científica do conceito e quantificar valores (Milhelcic et al, 2003; Grossmann, 2004; Huppel e Ishikawa, 2005; Dahlström e Ekins, 2005; Rüdener et al, 2005; Nieuwlaar et al, 2005; Kortelainen e Kuosmanen, 2005; Guma et al, 2005;). A aceitação do conceito de ecoeficiência em outros setores garante, assim, o potencial de uma exploração mais profunda desta ferramenta nas operações que envolvem o beneficiamento de minerais.

Em relação à mineração, van Berkel e Narayanaswamy (2005) e van Berkel (2007a) fizeram contribuições significativas na aplicação do conceito de ecoeficiência dentro das indústrias de extração metal/mineral e indústrias de beneficiamento. Guma et al. (2009) também apresentaram uma abordagem para verificar a utilidade dos indicadores de ecoeficiência em projetos ambientalmente conscientes de

processamento de minerais e metais primários. Demonstraram que indicadores de ecoeficiência podem ser usados para descrever o desempenho ambiental e econômico das operações. No entanto, a análise de ecoeficiência precisa estar condicionada a outras metodologias no momento da tomada de decisão para se verificar quais os impactos ambientais são relevantes.

Segundo Reid et al., (2009), nas decisões de um empreendimento mineiro, diferentes opções de gerenciamento deveriam ser comparadas no que diz respeito ao seu ao impacto ambiental em potencial. Neste contexto, a Avaliação de Ciclo de Vida é uma valiosa ferramenta para estudar os aspectos ambientais e potenciais impactos de um produto (processo ou serviço) desde a extração de sua matéria prima, passando pelo uso e terminando com sua disposição final.

De acordo com o EPA (2006), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia quantitativa a qual analisa o desempenho ambiental de um produto, processo ou tecnologia para definir e reduzir os impactos ambientais de seu fluxo de material e energia e providenciar oportunidades para melhoria usando uma abordagem “berço ao túmulo”.

De acordo com a ABNT (2009), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto (isto é, do “berço ao túmulo”), desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição. As categorias gerais de impactos ambientais que necessitam ser consideradas incluem o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas.

A ACV pode ajudar nos seguintes aspectos:

- na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida;
- na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais (por exemplo, planejamento estratégico, definição de prioridades, projeto ou pré-projeto de produtos ou processos);
- na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição; e

- no marketing (por exemplo, uma declaração ambiental, um programa de rotulagem ecológica ou uma declaração ambiental de produto).

A avaliação do ciclo de vida deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados, conforme ilustrado na Figura 22. Resultados da ACV podem proporcionar informações úteis para a tomada de decisões.

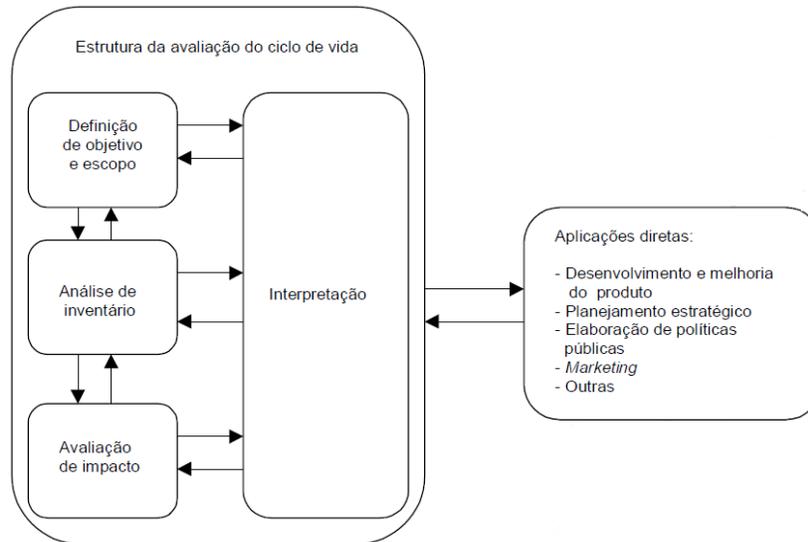


Figura 22 Fases de um estudo de avaliação de ciclo de vida conforme NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009).

Assim, as principais aplicações da ACV são em: (a) analisar as origens de problemas relacionado um produto em particular; (b) comparar melhorias de um dado produto; (c) projetar de novos produtos; (d) escolher um entre vários produtos. As simulações podem ser realizadas lidando com as políticas governamentais e estratégias de negócios. A maneira de como um estudo de ACV será implementado depende do objetivo final para uso dos resultados (Guinne et al., 2002).

Conforme Chowdhury (2010), ACV é um método de contabilização para impactos ambientais associados a um produto ou serviço. O método leva em consideração os processos e as emissões geradas durante o tempo de vida de um produto. Portanto, a primeira tarefa em um estudo de ACV é a estimativa dos fatores de emissão (emissões geradas a partir da produção de uma unidade de massa de um produto) a partir de vários processos diretamente ou indiretamente relacionados à manufatura dos produtos. Os processos incluídos ao cálculo das emissões dependem

das fronteiras do sistema definidas anteriormente. Aplicação de ACV na indústria mineral começou no final dos anos 90, com o objetivo inicial de realizar inventários de ciclo de vida (LCI) para auxiliar fabricantes de bens de consumo a incluir no processo produtivo de obtenção da matéria prima. Desde então, alguns estudos já foram realizados considerando os diversos aspectos da indústria de mineração (Giurco et al, 2000; Stewart, 2001; Stewart e Petrie, 2006). Contudo, pouca ênfase tem sido dada no que diz respeito a extração do minério assim como na produção e manejo dos rejeitos gerados (Durucan e Munoz- Melendez, 2006). Reid et al. (2009), por exemplo, compararam seis diferentes tipos de cenários para a disposição final de resíduos de minas de cobre e zinco. Propuseram, ao final, um panorama de situações envolvendo as implicações e benefícios das diferentes formas de se realizar a disposição final dos rejeitos gerados durante a vida útil da mina.

Iniciativas internacionais foram lançadas nos últimos anos para avaliar o uso de ACV no contexto de produção de minerais e metais. Entre elas, o Projeto de Desenvolvimento Sustentável em Metais e Minerais (MMSD), que concluiu que "ACV é uma ferramenta útil para avaliar questões ambientais durante a tomada de decisão dentro da indústria", apesar das limitações da ferramenta relacionada com a metodologia nas fases LCI e LCIA (avaliação de impacto do ciclo de vida) (Stewart, 2001).

Abordagens integradas para gerenciamento dos resíduos e aproveitamento de rejeitos gerados na cadeia produtiva de bens minerais vêm sendo largamente debatidos mundialmente. A necessidade de incorporar o conceito de sustentabilidade ao setor mineral é tão evidente que a revista *Minerals Engineering* já promoveu várias edições de um congresso focado especificamente neste tema (*Sustainability through Resource Conservation and Recycling*). São apresentados na Tabela 11 alguns exemplos de trabalhos que abordam estratégias em relação aos ganhos ambientais do aproveitamento de resíduos de mineração.

Pode-se observar que muitos dos trabalhos são referentes a mineração de carvão. As principais ações referem-se a *back-fill* (retorno do rejeito para a mina, no caso das minas subterrâneas) e aplicação dos rejeitos como material de construção (Chikkatur, 2009; Haibin e Zhenling, 2010). Alguns trabalhos abordam iniciativas de produção mais limpa, como na região carbonífera de Tiefa na China, onde foi possível

reduzir na fonte em 37% a produção de rejeitos (Fan et al, 2014). Outros tratam sobre a dessulfurização dos resíduos, cujos resultados, ainda em escala de laboratório, demonstram que é possível reduzir significativamente a quantidade de rejeitos disposta bem como os riscos ambientais associados (Kazadi e Mbamba, 2012).

No Brasil, como anteriormente já comentado, as minas a céu aberto retornam os rejeitos do beneficiamento para as cavas, evitando danos ambientais. Assim, as questões ambientais decorrentes dos rejeitos ocorrem principalmente nas minas subterrâneas. A prática corrente tem sido a disposição dos rejeitos em módulos e tratamento convencional (físico-químico) da drenagem ácida. Ações diferentes destas são casos isolados, como o uso de aditivos de alcalinos na área do Capão da Roça em Charqueadas - RS (Machado, 2007), ou coberturas secas em uma unidade experimental que recentemente foi recentemente desativada em Forquilha - SC (Soares et al., 2009 e Souza, 2009). Na questão de aproveitamento dos rejeitos, Féris (2001), demonstrou a possibilidade do uso de rejeitos de carvão como material absorvente e adsorvente no tratamento de águas contendo metais. A prática de backfill também tem sido considerada, mas a ainda não se consolidou por questões de segurança e custos. Deve-se também enfatizar que não há uma solução melhor e nem uma estratégia única de solução do problema. As técnicas necessitam ser contextualizadas para cada mineração em particular. No caso da mineração de carvão de Santa Catarina, é consenso que há necessidade de uso de diferentes abordagens para solução das questões ambientais.

Tabela 11 Estudos desenvolvidos a partir de estratégias focadas nos ganhos ambientais do aproveitamento de resíduos de mineração

Título do artigo	Autores	Revista	Ano
Reduction and utilization of coal mine waste rock in China: A case study in Tiefsa coalfield	G. Fan et al.	Resources, Conservation and Recycling	2014
Mitigating acid rock drainage risks while recovering low-sulfur coal from ultrafine colliery wastes using froth flotation	C. Kazadi Mbamba et al.	Minerals Engineering	2012
Environmental issues from coal mining and their solutions	Z. Bian et al.	Mining Science and Technology	2010
Recycling utilization patterns of coal mining waste in China	L. Haibin & L. Zhenling	Resources, Conservation and Recycling	2010
Mitigating the generation of acid mine drainage from copper sulphide tailings impoundments in perpetuity: A case study for an integrated management strategy	A.H. Hesketh et al.	Minerals Engineering	2010
Life cycle assessment of mine tailings management in Canada	C. Reid et al.	Journal of Cleaner Production	2009
Sustainable development of the Indian coal sector	A.P. Chikkatur et al.	Energy	2009
Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada	M. Benzaazoua et al.	Minerals Engineering	2008
Technological options for waste minimization in the mining industry	C. Driussi & J. Jansz	Journal of Cleaner Production	2006
Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry	A. Azapagic	Journal of Cleaner Production	2004
Promoting cleaner production in the Indian small-scale mining industry	M.K. Ghose	Journal of Cleaner Production	2003

2.8. Barreiras e limitações na indústria mineral

Diversos autores discutem a dificuldade de implementação na indústria mineral dos conceitos descritos acima.

De acordo com Hilson (2000) existem três tipos de barreiras impedindo a implantação de sistemas de “Produção mais Limpa” na indústria mineral: econômica, tecnológica e legislativa. *Econômica*: existe uma indisponibilidade ou dificuldade de ter acesso a recursos financeiros e geralmente somente metas em curto prazo são consideradas, especialmente em empresas de menor porte. Ainda, é dada preferência para se implementar tecnologias de fim de tubo, pois elas atendem aos quesitos exigidos pela legislação e são frequentemente consideradas despesas de menor custo. Como os orçamentos para meio ambiente nas empresas geralmente são baixos, obter recursos para empreendimentos ambientais, especialmente os com alto investimento inicial, como as mudanças para processos mais limpos, é frequentemente difícil. *Problemas Tecnológicos*: existe uma falta de conhecimento em relação a importância de práticas mais sustentáveis nas empresas de mineração bem como falta de pessoas experientes para operar e manter tais sistemas alternativos de produção. Na maioria dos casos, gerentes e colaboradores tem tempo limitado para apontar as áreas com necessidade/prioridade e muito menos identificar possíveis intervenções. *Legislação*: A falta de uma legislação pertinente e sua mudança contínua dificulta a implementação de conceitos baseados na sustentabilidade empresarial na Indústria Mineral.

Outra barreira, discutida por van Berkel (2000), é que profissionais que trabalham com processamento mineral, em geral, não tem treinamento considerando a incorporação de questões ambientais e Produção mais Limpa para seus projetos e processos.

As dificuldades acima listadas estão presentes na mineração de carvão da região Carbonífera de Santa Catarina. Porém, deve-se também salientar que muitas melhorias já foram efetuadas, como a capacitação de técnicos, a implantação de sistemas de gestão ambiental nas Empresas e a fiscalização ambiental na região. Este trabalho pretende contribuir ainda mais ao setor, buscando a minimização dos impactos ambientais de passivos ou, até mesmo, em atingir a meta de “rejeito zero na

mineração”. A tese a ser comprovada é que é possível atingir um nível elevado de produção limpa na produção de carvão mineral na região carbonífera de Santa Catarina, com ganhos econômicos, ambientais e sociais através de intervenções baseadas nos princípios mais tradicionais de desenvolvimento sustentável.

3. EXPERIMENTAL

A metodologia experimental foi delineada com o intuito de se avaliar a viabilidade técnica, econômica e socioambiental do aproveitamento dos rejeitos gerados no beneficiamento de carvão na região de Santa Catarina, auxiliando assim as indústrias locais a definir a melhor alternativa nas fases de concepção, operação e fechamento de uma mina.

3.1. Descrição do empreendimento alvo

O estudo caso foi realizado na Carbonífera Criciúma S/A (CCSA), na Unidade de Mineração II – Verdinho (UM-II), Município de Forquilha, Estado de Santa Catarina (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 está posicionada na bacia hidrográfica do rio Araranguá, drenada pelo Rio Sangão, afluente do rio Mãe Luiza, e índice pluviométrico anual de 1.400 mm (Schneider, 2006).

As operações de lavra em escala industrial na UM II – Verdinho tiveram início em junho de 1982, com instalações e equipamentos dimensionados para produzir 2.760.000 de toneladas anuais de carvão ROM (Schneider, 2006). O carvão ROM é extraído do subsolo pelo método de lavra de câmara e pilares.

As operações de processamento mineral são realizadas em uma típica planta de beneficiamento de carvão da região, onde é beneficiado carvão ROM em dois turnos de 8 horas. Os grossos de carvão, com tamanho de partícula “-50,8+1,0 mm”, são processados por jigagem. Os finos, provenientes do *underflow* de hidrociclones, com tamanho de partícula “-1,0+0,1 mm”, são beneficiados por espirais. Os finos oriundos do *overflow* dos hidrociclones, com tamanho de partícula “-0,1mm”, são beneficiados por flotação. Segundo dados estatísticos do Sindicato das Indústrias Extratoras de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC, 2014), nos últimos cinco anos, a CCSA beneficiou mensalmente cerca de 120.000 toneladas de carvão ROM, oriundos da camada Barro Branco, correspondendo a 20% do total beneficiado na região desde 2008. A Figura 23 apresenta a vista superior da área do empreendimento, bem como a localização das principais unidades operacionais que compõe a UM-II Verdinho.

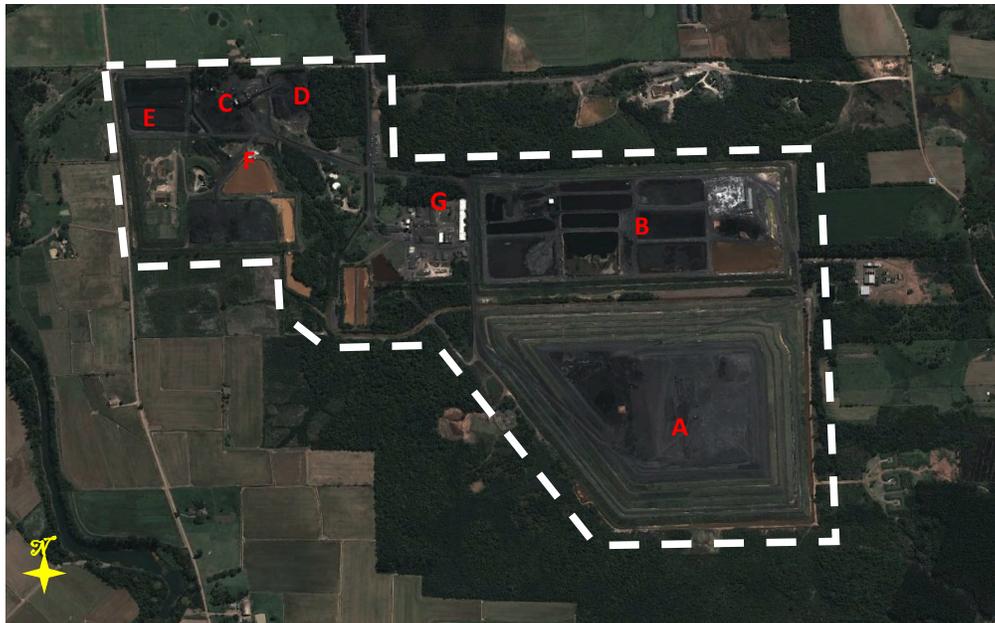


Figura 23 Vista superior da área ocupada pela unidade mineira II – Verdinho, município de Forquilha, SC: a) módulo B de rejeitos; B) bacias de sedimentação para separação sólido-líquido da água de processo; C) planta de beneficiamento mineral; D) esteira de alimentação da mina II – Verdinho; E) pátio de estocagem; F) estação de tratamento de efluentes; G) Administração – Fonte: Google.

3.2. Amostragem do rejeito de carvão

As amostras de rejeitos de carvão foram coletadas nos seguintes locais:

- (a) módulo B de rejeitos (P1);
- (b) rejeitos na saída do processamento de finos e ultrafinos (P2);
- (c) rejeito na saída do processamento de grossos (P3).

A Figura 24 representa os pontos onde foi realizada a amostragem do material. O ponto de amostragem “P1” é proveniente do módulo de rejeitos. A amostragem no ponto “P2” foi realizada na saída do circuito de finos e ultrafinos, no fluxo de entrada das bacias de sedimentação. O ponto “P3” se refere às amostras coletados no circuito de beneficiamento de grossos previamente ao encaminhamento para o módulo B de rejeitos.

Para a coleta de amostras do Módulo B de rejeitos da CCSA (P1), 2 (duas) sondagens foram realizadas. As sondagens foram realizadas através de trado mecânico com diâmetro de 40 centímetros NBR 10007 (ABNT, 2004d). As perfurações ocorreram até o aparecimento de água. A partir deste local, a sondagem cessava devido ao

desmoronamento da base do poço, o que inviabilizava a continuação da perfuração sem revestimento. O ponto A foi perfurado até 10 metros, gerando duas amostras nomeadas “A(0,0-5,0)” e “A(5,0-10,0)”. O ponto B foi sondado até 8,5 metros, formando duas amostras nomeadas de “B(0,0 - 5,0)” e “B(5,0 - 8,5)”. Os resultados apresentados na presente tese referem-se à média dos resultados obtidos das quatro (4) amostras, já que se observou um comportamento muito semelhante de todas as amostras em relação ao teores de cinzas e enxofre bem como em relação as curvas de lavabilidade (Amaral Filho, 2009).

As amostragens nos pontos P2 e P3 foram realizadas na correia transportadora de forma sistemática de acordo com o “método de fluxo” (Taggart, 1945; Possa e Luz, 1984; Goes et al., 1991). A coleta dos incrementos foi realizada em intervalos de 30 minutos durante um ciclo de beneficiamento de carvão ROM da camada Barro Branco, já que a vazão mássica na correia transportadora foi considerada constante.

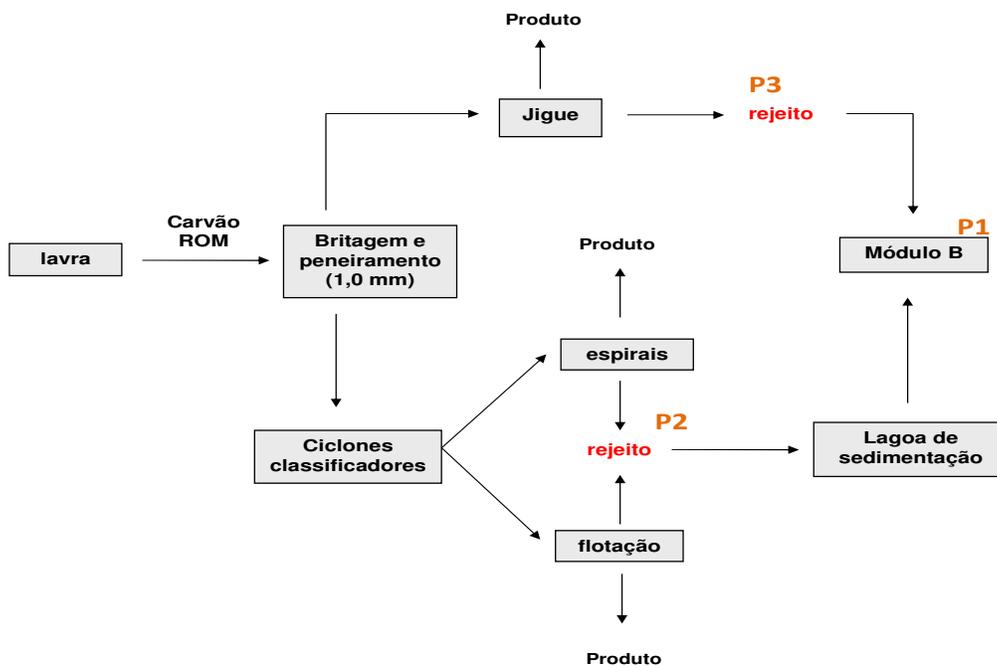


Figura 24 Pontos de coleta das amostras utilizadas no trabalho: P1 – amostra representativa do módulo B de rejeitos; P2 – amostra representativa do rejeito proveniente do circuito de finos e ultrafinos; P3 – amostra representativa do rejeito proveniente do circuito de grossos.

Na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, amostras foram secas, homogêneas, seguindo o estabelecido na NBR 10.007 (ABNT, 2004), e novamente quarteadas e posteriormente submetidas às operações de classificação, cominuição e concentração, conforme a necessidade estabelecida no planejamento experimental.

3.3. Processos

A seguir são descritos as ferramentas e os processos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

3.3.1. Separação granulométrica

Após a amostragem e preparação, o material coletado no módulo B e a jusante do processo de beneficiamento foi encaminhado para classificação granulométrica. O rejeito foi peneirado e dividido nas frações “-50,8+2,0 mm” (chamados de “grossos do rejeito”) e “-2,0+0,1 mm” (chamados de “finos do rejeito”). O material passante na peneira de “0,1 mm” foi chamado de “ultrafinos”. 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.

3.3.2. Separação densimétrica em meios orgânicos

A separação por meios densos dos rejeitos (afunda-flutua) foi realizada conforme a NBR 8738 (ABNT, 1985), nas densidades relativas de 1,5, 1,7, 2,0, 2,2, 2,4, 2,6 e 2,8. O objetivo do procedimento foi obter dados para traçar as curvas de separabilidade densimétrica nos intervalos granulométricos de “-50,8+2,0 mm” (grossos) e de “-2,0+0,1 mm” (finos). Os líquidos densos orgânicos utilizados no ensaio 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, utilizou-se 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. Após a preparação do meio denso, foram realizados os ensaios de afunda-flutua 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 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 fração afundada no meio denso também foi separada do líquido orgânico. Em ambos os casos, deixou-se o meio denso escorrer em um papel filtro, para futura reutilização. Ambas as frações (flutuadas e afundadas) foram secas à temperatura ambiente para evaporação do líquido orgânico. O material afundado na densidade anterior (inferior) foi novamente imerso em 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. As frações flutuadas nas densidades relativas de 1,5 a 2,8, juntamente com a porção afundada em 2,8, foram pesadas e calculadas suas participações na massa total. Os resultados obtidos foram transcritos em planilhas eletrônicas para os cálculos e desenho das curvas de separabilidade densimétrica, também chamadas de “curvas de lavabilidade”.

3.3.3. Elaboração das curvas de lavabilidade

As curvas de lavabilidade de Henry-Renhardt (curva dos flutuados, curva dos afundados, curva densimétrica e curva NGM) foram elaboradas a partir dos resultados dos ensaios de separação densimétrica em meios orgânicos e das análises de cinzas e enxofre e total, as quais são descritas na seção 4.3.1. Tais curvas foram desenhadas tanto em função do teor de cinzas quanto em função do teor de enxofre total para as duas faixas granulométricas do material do módulo B (grossos e finos) e para o rejeito obtido diretamente do circuito de jigagem (grossos). Estas curvas foram utilizadas para um melhor entendimento dos parâmetros teóricos de recuperação em cada faixa densimétrica estudada.

3.3.4. Simulação de circuito de beneficiamento mineral

Para auxiliar na escolha da melhor opção para o beneficiamento mineral de rejeitos de carvão, realizou-se uma simulação de uma planta de processamento de rejeitos por meio denso. As plantas foram simuladas usando como parâmetros os dados experimentais obtidos nas análises laboratoriais e os dados fornecidos por técnicos da empresa Carbonífera Criciúma S/A. A simulação foi realizada através do

programa MODSIM – Modular Simulator for Ore Dressing Plants, versão 3.6, desenvolvido pela universidade de UTAH, Estados Unidos, e cedido pelo Dr. Cláudio Schneider, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro.

3.3.5. Processamento em meio denso de ferro-silício

Definidos os parâmetros de recuperação através da interpretação dos cortes teóricos observados nas curvas de lavabilidade e dos resultados obtidos na simulação e modelagem de um circuito de beneficiamento de rejeitos grossos, realizou-se a separação gravimétrica do material em dois estágios utilizando uma suspensão de ferro-silício 15% (Fe-Si 15%) atomizado. Na Figura 25 é apresentado o aparato usado para a realização dos ensaios de beneficiamento de rejeitos em escala semi-piloto. A separação em meio denso foi realizada no Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão (LAEC), Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC).



Figura 25 Equipamento separador por meio denso de Fe-Si.

A intenção foi obter três frações densimétricas distintas: inferior a 2,2 ($D < 2,2$), entre 2,2 e 2,7 ($2,2 < D < 2,7$) e superior a 2,7 ($D > 2,7$). Para a preparação das suspensões utilizaram-se água e liga de ferrossilício atomizado 15%. A água foi adicionada no equipamento e, em seguida, a liga de Fe-Si pulverizada foi adicionada ao sistema até a suspensão atingir a densidade definida. A densidade do meio foi medida por um densímetro. A amostra utilizada foi a proveniente do circuito de grossos (P3) com tamanho de partícula superior a 2,0 mm.

3.3.6. Ensaios de lixiviação em células úmidas

As seguintes amostras foram submetidas aos ensaios de lixiviação em células úmidas: A Figura 26 mostra o aparato utilizado para a realização do ensaio.

- a) rejeito bruto retirado do ponto de amostragem P3 – circuito de grossos;
- b) rejeito da fração densimétrica entre 2,2 e 2,7, obtida no ensaio de meio denso de Fe-Si.

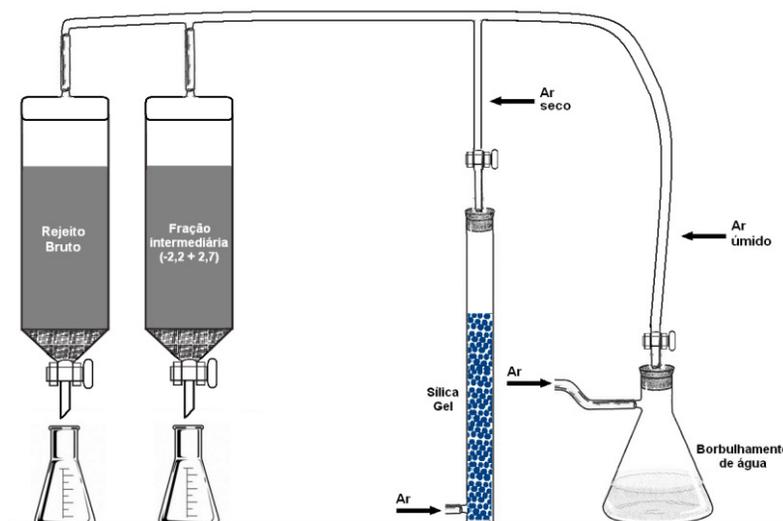


Figura 26 Esquema das células úmidas para realização dos ensaios cinéticos (colaboração Jéssica Weiler).

Os estudos cinéticos de lixiviação foram efetuados pelo método de células úmidas, conforme procedimento ASTM D 5744 (ASTM, 2007). O ensaio consistiu em colocar uma amostra de 500 gramas do material com granulometria inferior a 6,3 mm em um frasco cilíndrico de vidro por onde pode ser injetado e retirado ar bem como água de lixiviação. Inicialmente, submeteu-se a amostra a uma lixiviação por gotejamento com 500 ml de água destilada por um período de tempo de um dia. O lixiviado foi coletado para análise. Após, as amostras foram submetidos a um fluxo de ar seco por três dias, ao úmido por três dias e, no sétimo dia, a percolação de 500 mL água destilada. O ciclo semanal se repetiu por todo o período de teste aplicado, que foi de 92 semanas. Os testes cessaram ao término das 92 semanas, pois a desagregação do material colmatou o leito, impedindo o fluxo de água. As amostras de águas lixiviadas nas células úmidas foram analisadas em relação aos seguintes parâmetros de

qualidade de água: pH, potencial redox, acidez, metais (Al, Mn, Zn, Fe_{total} e Fe²⁺) e sulfato.

3.3.7. Tratamento da DAM

A fim de se avaliar o consumo de reagentes no tratamento da DAM, trataram-se as águas lixiviadas das semanas 26 e 27 da célula contendo o rejeito bruto e da célula contendo a fração densimétrica entre 2,2 e 2,7. As semanas a serem tratadas foram selecionadas de forma aleatória. O tratamento consistiu basicamente na elevação do pH para 8,7 com adição de uma solução 0,1 mol/L de Ca(OH)₂. Por fim, com o intuito de verificar a eficiência do tratamento, a concentração de metais (Fe, Al, Mn e Zn) e sulfato no efluente bruto e tratado foi analisada.

3.4. Análises

As análises realizadas para a caracterização tecnológica e ambiental dos materiais bem como das emissões líquidas estão descritas a seguir. Todas as análises foram realizadas em duplicata.

3.4.1. Imediata

Para a análise imediata e elementar as amostras foram cominuídas em um moinho de disco orbital de forma a passar em uma peneira com diâmetro de 0,25 mm (Tyler #60). Na análise imediata foram determinados os teores de cinzas de acordo com a NBR 8289 (ABNT, 1983a), matéria volátil de acordo com a NBR 8290 (ABNT, 1983b) e carbono fixo de acordo com a NBR 8299 (ABNT, 1983d). Também se analisou a umidade, conforme a NBR 8293 (ABNT, 1983c), para converter os valores de cinzas, matéria volátil e carbono fixo para base seca.

3.4.2. Elementar

Na análise elementar foram determinados os teores totais de enxofre (S), nitrogênio (N), carbono (C) e hidrogênio (H), instrumentalmente, utilizando o equipamento analisador elementar da marca Vario Macro Elementar conforme a norma ASTM D5373/93 (ASTM, 2002) para coque e carvão. Os valores obtidos podem ser considerados em base seca, uma vez que as amostras foram previamente deixadas secando em estufa a 70°C.

3.4.3. Formas de enxofre

As formas de enxofre foram obtidas através das análises de enxofre total, realizada via instrumental, de enxofre sulfático e de enxofre pirítico. A determinação do enxofre sulfático e do enxofre pirítico foi realizada de acordo com a International Organization for Standardization (ISO) norma 157:1996 (ISO, 1996). Como o enxofre total representa o somatório do enxofre orgânico com o enxofre pirítico e sulfático; o enxofre orgânico foi obtido pela diferença.

3.4.4. Petrográfica dos macerais

As análises dos macerais presentes na amostra com densidade relativa menor que 2,2 seguiram a norma (ISO-7404/3, 1984) e foram realizadas no Laboratório de Análise de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo (LACAPETRO) – UFRGS. O procedimento baseia-se na contagem de 500 pontos em linhas com intervalos pré-programados. Essa contagem serve para a identificação e quantificação dos diferentes macerais e matéria mineral contidos na amostra. A análise é realizada em microscópio de luz refletida e em luz de fluorescência através de excitação usando uma lâmpada Hg e um filtro azul, com objetiva imersa em óleo. Os resultados da análise petrográfica são expressos em Volume %. O equipamento utilizado foi um microscópio *Leica DM6000 M* de luz refletida, ocular de 10x, objetiva de 20x em óleo de imersão. Ao microscópio foi acoplada uma câmera digital. A câmera, por sua vez, foi conectada a um computador com monitor utilizando o programa *Diskus Fossil*.

3.4.5. Poder calorífico superior

As análises de Poder Calorífico Superior (PCS) foram realizadas no Laboratório de Análise de Carvão e Rochas Geradoras de Petróleo (LACAPETRO) – UFRGS. O poder calorífico foi medido em uma Bomba Calorimétrica da marca IKA modelo C2000 (ASTM D 2015, 2004). O procedimento consiste em quantificar a energia liberada na forma de calor e da energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação de uma amostra. O método baseia-se na combustão de uma amostra sob uma atmosfera de oxigênio em uma bomba calorimétrica. Coloca-se uma quantidade de água conhecida e com uma temperatura pré-definida em um cilindro onde, posteriormente, é monitorado o acréscimo da temperatura dessa água devido a

combustão. O valor real é então comparado com uma amostra de referência (ácido benóico) e expresso em kcal/kg. Para otimizar o processo de combustão, o cilindro é preenchido com oxigênio puro (99,95%) em uma pressão de 30 bar.

3.4.6. Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX)

A composição mineralógica dos materiais foi determinada por difração de raios-x (DRX). O método permite identificar, de maneira qualitativa, os minerais constituintes nas amostras através da determinação das distâncias interplanares das células cristalinas, que são constituídas por planos definidos, diretamente relacionados com o raio atômico de cada um dos átomos e seu tipo de ligação. Os seguintes constituintes mineralógicos foram determinados qualitativa e semiquantitativamente: carbonatos, sulfetos, quartzo e argilo-minerais. Os difratogramas foram obtidos com a utilização de um difratômetro de raios X marca Siemens, modelo D5000 (com valor de radiação Cuka ($\lambda=1,406 \text{ \AA}$), utilizando uma voltagem de 40kV e corrente de 30 mA).

3.4.7. Elementar por Fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição elementar dos materiais foi avaliada por Fluorescência de Raios-X. Nesta técnica, os raios-X característicos emitidos pela amostra são difratados por cristais analisadores, sendo a radiação difratada captada por detectores de raios-X. Um sistema mecânico especial movimenta o detector e o cristal analisador de forma que os raios-X difratados sejam captados com um máximo aproveitamento e de forma a manter um ângulo crítico entre eles e a amostra. O sinal captado é processado por circuitos eletrônicos e o sinal resultante é plotado em um gráfico de intensidade por ângulo (2θ). Após comparação dos picos resultantes da análise com padrões e, realizando determinadas correções, pode-se fazer uma interpretação qualitativa ou quantitativa dos resultados. A análise multielementar instrumental por fluorescência de raios X (FRX) vem sendo utilizada principalmente para amostras sólidas, permitindo a determinação simultânea ou sequencial da concentração de vários elementos, sem a necessidade de destruição da amostra, ou seja, de modo instrumental, sem nenhum pré-tratamento químico. O equipamento utilizado no ensaio foi o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X (EDS), modelo Minipal 4, da marca Panalytical. Para a análise, as amostras utilizadas foram quarteadas, homogeneizadas e cominuídos para granulometria inferior a 0,150mm (Tyler #100).

3.4.8. Periculosidade – NBR 10.004

Com o objetivo de se classificar os rejeitos de carvão bruto e a fração com densidade intermediária quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública foi realizada a caracterização e classificação conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Nesse sentido, avaliaram-se a composição química do resíduo, a corrosividade, a reatividade, a inflamabilidade, a patogenicidade, a toxicidade bem como foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização conforme as NBR's 10.005 (ABNT, 2004b) e 10.006 (ABNT, 2004c), respectivamente. Essas análises foram realizadas em laboratório terceirizado.

3.4.9. Testes estáticos de contabilização de ácidos e bases

Para a avaliação do potencial de geração de acidez das amostras foram realizados ensaios estáticos de contabilização de ácidos e bases conforme descrito em Sobek et al (1978) e EPA (1994).

Os ensaios estáticos foram realizados no rejeito bruto e na amostra de densidade intermediária (entre 2,2 e 2,7). Empregaram-se os métodos de contabilização de ácidos e bases tradicional (ABA) e modificado (ABA modificado). Ambos os métodos são baseados na determinação do potencial de geração de acidez (AP) e no potencial de neutralização (NP) dos materiais. Com estes valores, pode-se calcular o potencial de neutralização líquido (NNP), equação 10.

$$\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP} \quad (10)$$

A determinação do potencial de acidez (AP) pelo método ABA tradicional foi realizada pela análise de enxofre total, via instrumental no equipamento Vario Macro Elementar. A medida do AP pelo método ABA modificado foi realizada pela análise de enxofre pirítico, via úmida. Estequiometricamente, um mol de CaCO_3 é requerido por mol de S (equação 11):

$$\text{AP (kg CaCO}_3\text{/t)} = (1000/32).\%S \quad (11)$$

A determinação do potencial de neutralização (NP) pelo método ABA tradicional foi realizada pelo ataque da amostra com ácido clorídrico aquecido a 90°C, por 1 hora, para consumir os minerais neutralizantes, seguido de titulação com NaOH até pH 7,0. A medida do NP pelo método ABA modificado foi realizada pelo ataque da

amostra com ácido clorídrico, a temperatura ambiente, por 24 horas, seguido de titulação com NaOH até pH 8,3. O cálculo do NP foi realizado pelas equações 12 a 14:

$$C = \frac{\text{mL NaOH}}{\text{mL HCl}} \quad (12)$$

$$\text{Eq ácido consumido} = (\text{ml ácido adicionado}) - (\text{ml base adicionado}) \times C \quad (13)$$

$$\text{NP} = (\text{Eq ácido cons}) \times 25 \times (\text{N ácido}) \quad (14)$$

onde: C = constante; N = normalidade

De acordo com o método, o valor do NNP permite enquadrar o material nas seguintes situações:

- 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.

3.4.10. Análise de efluentes líquidos – lixiviados e DAM bruta e tratada

As análises dos lixiviados das células úmidas foram realizadas em relação aos seguintes parâmetros de qualidade da água: pH, potencial redox, acidez, concentração de total de metais (Fe, Al, Mn, Zn), concentração de Fe^{2+} e concentração de sulfatos. Todas as análises foram realizadas em duplicata, seguindo os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

As medidas de pH foram efetuadas com eletrodo de calomelano. As medidas do potencial redox foram realizadas com eletrodo de prata/cloreto de prata. Nas análises de metais totais (Fe, Al, Mn e Zn) as amostras líquidas foram preservadas em separado com HNO_3 concentrado (3 gotas para cada 200 ml de solução). Análises de Fe^{2+} presente no lixiviado foram realizadas por via úmida. A concentração de Fe^{3+} foi determinada pela diferença entre a concentração de ferro total e Fe^{2+} .

Uma listagem dos parâmetros analisados, métodos aplicados, equipamento e o limite de detecção são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 Análises efetuadas nos lixiviados e na DAM bruta e tratada.

Análise	Método	Código	Equipamento	Lim. de Detecção
pH	Potenciométrico	ASTM D1293	pHmetro digital Digimed	0,1
Potencial redox	Potenciométrico	ASTM D1498	pHmetro digital Digimed	0,1mV
Acidez	Titulométrico	STM 2310	-	1,0 mg L ⁻¹ CaCO ₃
Fe total	Espect. abs. atômica	STM 3111 B	Varian AA240FS	0,005 ppm
Al total	Espect. abs. atômica	STM 3111 B	Varian AA240FS	0,2 ppm
Mn total	Espect. abs. atômica	STM 3111 B	Varian AA240FS	0,0015 ppm
Zn total	Espect. abs. atômica	STM 3111 B	Varian AA240FS	0,0015 ppm
Fe ²⁺	Titulométrico	STM 8146	-	0,02 ppm
Sulfatos	Cromatografia iônica	STM 4110 B	DIONEX-ICS3000	0,01 ppm

3.5. Avaliação preliminar de Custos

Foi proposta uma análise simplificada de custos para o sistema de reutilização parcial de rejeitos. Assumiu-se que existe um mercado eminente para o carvão energético CE1400 e para o concentrado de pirita a ser enviado para produção de ácido sulfúrico.

O cálculo do valor teórico dos produtos foi baseado numa operação hipotética de beneficiamento de rejeitos em uma planta com classificação e concentração em equipamento de meio denso utilizando uma suspensão de Fe-Si (15%) atomizado, sem operações de cominuição. Optou-se por uma planta compacta e automática com capacidade para 127 ton/h. A operação se daria com três funcionários, em dois turnos, em um regime de 16 horas/dia. Dois caminhões e uma escavadeira seriam envolvidos no trabalho de escavação, transporte e manejo dos materiais. Nesta operação estariam envolvidos os seguintes custos: (a) despesas com o processamento do material bruto; (b) recuperação de carvão CE 1100 e pirita; (c) custo de produção: CP = a ÷ b; e (d) margem de lucro (LL), estabelecida em 15%. O cálculo foi realizado considerando 100% de capital próprio, uma taxa de atualização de 6% (média do IGP-M dos últimos 24 meses) e um tempo de vida útil da mina de 10 anos.

Avaliaram-se também os custos relacionados com o tratamento dos efluentes, originados a partir dos rejeitos com e sem o isolamento de sulfetos. Para tal, foram utilizados dados operacionais fornecidos por uma empresa local. A empresa trata aproximadamente 50 m³/h de DAM, onde, cerca de 20 m³/h são oriundos do módulo

de rejeitos. O tratamento é realizado pelo processo de precipitação/sedimentação utilizando soda e cal como reagentes alcalinos. O valor utilizado para os reagentes foram os valores utilizados no mercado no ano de 2013. A DAM é gerada no módulo de rejeitos durante os 365 dias do ano, sendo encaminhada para uma bacia de captação e subsequente tratamento. A estação de tratamento de DAM opera 16 horas por dia e 23 dias por mês.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos estudos de caracterização tecnológica do rejeito e de uma intervenção baseada no processamento mineral buscando o aproveitamento integral e/ou parcial do material em outros setores industriais e a concomitante redução do impacto ambiental.

Neste contexto, é importante visualizar o balanço de massa na produção de carvão proveniente da camada Barro Branco. A Figura 27 representa de modo esquemático, o balanço geral do processamento do minério ROM da Carbonífera Criciúma S.A. Este tipo de beneficiamento mineral é típico na região produtora de carvão no estado de Santa Catarina. No presente trabalho, esta situação é considerada como o cenário de produção tradicional. O modelo caracteriza-se pela valorização única do carvão para fins energéticos, sendo os resíduos levados para depósitos. Além dos grandes volumes de materiais descartados, causando prejuízo a paisagem local, é gerado um fluxo aquoso, a drenagem ácida de minas (DAM), que necessita de tratamento prévio ao seu descarte.

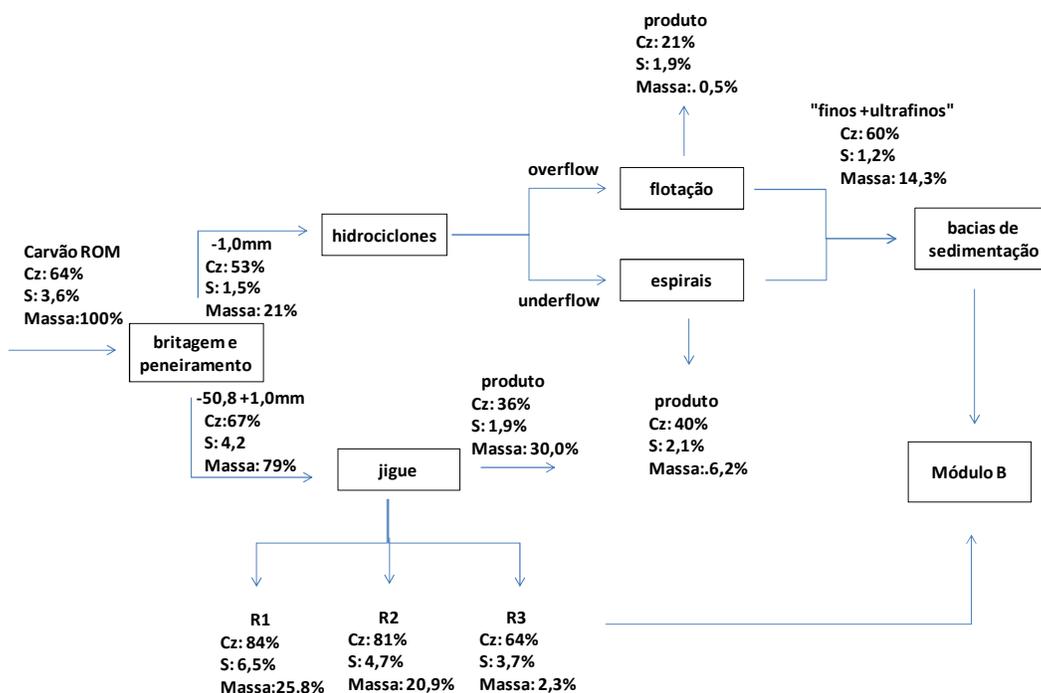


Figura 27 Balanço de massa de um típico circuito de beneficiamento mineral da camada Barro Branco na região carbonífera de Santa Catarina (colaboração: CCSA, 2012).

A partir do balanço de massa pode-se também observar que:

- do carvão ROM, 36,7% é convertido em carvão energético e 63,3% do material é descartado no módulo;

- do material descartado no módulo, 77,4% são os rejeitos de jigagem e os demais 22,6%, finos e ultrafinos, são o somatório dos resíduos das espirais, flotação e sólidos gerados em operações de deslamagem;

- os rejeitos finos e ultrafinos são encaminhados para bacias de sedimentação onde ocorre a separação sólido líquido da água de processo, após a separação, são encaminhados para o módulo B em forma de “lodo”

- os rejeitos finos e ultrafinos possuem um teor relativamente baixo de enxofre (1,2%) correspondente à 5% do teor total inicial e teor de cinzas de 60%;

- os rejeitos grossos são provenientes do jigage e é nesta fração que é reportado a maior parte do enxofre (mais de 90% do enxofre total inicial) no momento do beneficiamento mineral.

Assim, um manejo adequado dos resíduos gerados nesta etapa da cadeia produtiva do carvão mineral é determinante para o aproveitamento dos materiais, conservação dos recursos e evitar ou reduzir os impactos ambientais. Através do aproveitamento integral da massa de rejeitos, os benefícios são maximizados. Contudo, para se alcançar esta meta, o processamento mineral dos rejeitos de carvão deve ser conduzido contemplando as seguintes situações:

- beneficiamento do material depositado no módulo (reativa); e

- beneficiamento do rejeito recém-gerado no processo de jigagem (pró-ativa).

As duas alternativas serão analisadas no decorrer da presente tese.

4.1. Caracterização de um módulo de rejeitos

O módulo B de Rejeitos de Carbonífera Criciúma recebe os rejeitos de jigagem (grossos) e os rejeitos do beneficiamento por espirais, flotação e operações de deslamagem (finos e ultrafinos). A disposição dos rejeitos no módulo B iniciou em 1985. Uma foto ilustrativa do módulo é apresentada na Figura 28.



Figura 28 Vista superior da área utilizada para disposição final de rejeitos. À esquerda, as bacias de sedimentação utilizadas para a separação sólido-líquido. À direita: módulo B de rejeitos. Fonte: cortesia CCSA.

Algumas características gerais do módulo de rejeitos estão abaixo listadas (atualizado de Amaral Filho, 2009):

- idade: 29 anos
- área: 625.600 m²
- altura: 30 metros
- massa de rejeitos depositada: 14 milhões de toneladas
- teor médio de enxofre total: 5,8%
- teor médio de cinzas: 77,5%

Cabe ressaltar que o material depositado no módulo de rejeitos apresenta características bastante constantes, conforme observado nos laudos fornecidos pela empresa (comunicação eletrônica CCSA, laudos de caracterização) e em Amaral Filho (2009).

Atualmente, o módulo gera drenagem ácida de minas a qual é coletada e tratada para atender aos parâmetros de lançamento exigidos na legislação. Algumas características da DAM oriunda do módulo, obtidas do trabalho de Madeira (2010), estão descritas abaixo:

- Vazão: 20 m³/h;
- Relação precipitação volumétrica/sólidos: 5,5 L/ton.mês levando em consideração uma média anual de 1.400 mm de chuva na região; Schneider (2006);
- Características físico-químicas (média no período de 2004 a 2009):
 - pH – 3,0
 - acidez – 21.720 mg CaCO₃/L
 - Fe total – 7.700 mg/L
 - Fe²⁺ – 6.800 mg/L
 - Fe³⁺ – 900 mg/L
 - Al – 1030,2 mg/L
 - Mn – 195,9 mg/L
 - Zn – 47,9 mg/L
 - Sulfatos – 20.747 mg/L
 - Relação Molar Fe:S – 0,6
- Tratamento da DAM: físico-químico, por neutralização e precipitação dos metais na forma de hidróxidos e sulfatos (parcialmente) na forma de gesso. Polimento por banhados construídos.

Baseados nos dados de vazão e concentração de metais, estima-se, que somente na DAM, foram desperdiçados 3.710 toneladas anuais de ácido sulfúrico, 1.350 toneladas de ferro, 181 toneladas de alumínio, 34 toneladas de manganês e 8 toneladas de zinco. Mesmo sendo estes valores bastante elevados, baseados no balanço de massa de enxofre, a taxa de oxidação da pirita foi calculada em 0,45 g FeS₂/(t_{rejeito}.dia) ou 4,15 g FeS₂/(t_{FeS2}.dia). Como será visto posteriormente, estas taxas são bastante reduzidas, de forma que os procedimentos de minimização de entrada de oxigênio e água tomados pela Carbonífera, realizados pela disposição conjunta de finos e grossos, compactação e recobrimento de argila são relativamente eficientes na minimização do processo de oxidação da pirita. Considerando-se a atual taxa de saída de sulfatos, estima-se que o tempo para o esgotamento da geração da drenagem ácida no módulo seja de aproximadamente 660 anos. Após a conclusão das atividades de extração e beneficiamento de carvão as empresas continuam responsáveis pela área

onde a atividade foi realizada, e com isto, esta drenagem deverá continuar a ser tratada enquanto for gerada, onerando a empresa por gerações em termos econômicos e socioambientais.

A Figura 29 apresenta a distribuição granulométrica média do material depositado no módulo de rejeitos. Verifica-se que 68% das partículas são “grossas” (-50,8+2,0mm), 15% das partículas são “finas” (-2,0+0,1mm) e 17% “ultrafinas” (-0,1mm).

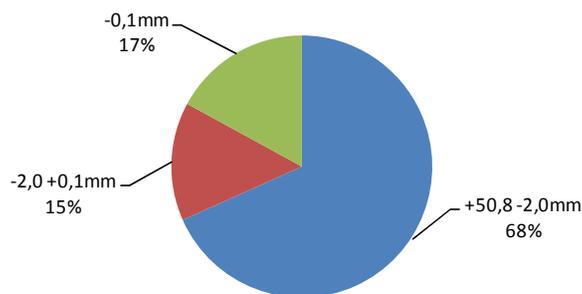


Figura 29 Distribuição granulométrica do material depositado no módulo B de rejeitos da Carbonífera Criciúma S.A (Amaral Filho, 2009).

Os ensaios de afunda-flutua e os resultados obtidos nas análises de enxofre total e cinzas permitiram a elaboração das curvas de separabilidade densimétrica para os grossos (Figura 30) e os finos (Figura 31). Os cortes teóricos foram definidos através das curvas, permitindo a divisão dos “grossos” e dos “finos” em três frações densimétricas distintas.

A partir das curvas, cenários foram estabelecidos, considerando o beneficiamento do material presente no módulo. Os resultados são teóricos e baseados na curvas de separabilidade densimétrica. Não se levou em consideração a imperfeição dos equipamentos que seriam usados no beneficiamento.

Cenário (a) – beneficiamento das frações -50,8+2,0mm e -2,0+0,1mm

Nas Tabelas 13 e 14 estão resumidos os resultados de distribuição de massa, os dados analíticos de cinzas e enxofre total, bem como os principais componentes mineralógicos identificados por DRX nos cortes teóricos pré-definidos. Em ambas as situações consideraram-se o beneficiamento da fração grossa (-50,8+2,0mm) e da fração fina (-2,0+0,1mm). Na Tabela 13, são apresentados os dados quando os cortes

teóricos foram estabelecidos para as densidades de 2,2 e 2,8 (priorizando o teor de enxofre total na fração pirítica) e na Tabela 14, quando os cortes teóricos foram definidos para as densidades de 2,2 e 2,7 (priorizando a recuperação na fração pirítica e a dessulfurização da fração com densidade intermediária).

Para a fração energética, foram considerados os flutuados na densidade de 2,2 e a totalidade dos ultrafinos. O material para queima em termoelétricas não convencionais (que aceitam elevados teores de cinzas) corresponde a 30,2% da massa do módulo, apresentando teores de 63,2% de cinzas e 2,6% de enxofre. A fração com densidade intermediária apresenta um alto teor de cinzas e uma significativa predominância do mineral quartzo. As frações com densidades relativas acima de 2,7 e 2,8 apresentam elevados teores de enxofre, devido à presença da pirita a qual possui densidade relativa entre 4,95 e 5,10. Caso o corte seja efetuado em 2,8 g/cm³, o concentrado de pirita constitui 10,3% da massa e apresenta um teor de 34,5% de enxofre total (aproximadamente 65% pirita¹). A recuperação de enxofre é teoricamente de 62%. A fração com densidade intermediária fica com 2,4% de enxofre total e 86,5% de cinzas. Caso o corte seja efetuado em 2,7 g/cm³, a massa do concentrado de pirita corresponde a 13,2% com um teor de 31,3% de enxofre total (aproximadamente 62% de pirita). A recuperação de enxofre é de aproximadamente 72%. A fração com densidade intermediária fica com um teor de enxofre de 1,5% e um teor de cinzas de 87,0%.

Cenário (b) – beneficiamento somente da fração -50,8 +2,0mm

Levando em consideração o enxofre deslocado para as densidades intermediárias nas frações de granulometria -2,0+0,1mm, o menor teor de cinzas, a dificuldade de separação gravimétrica e os custos de implantação de uma planta para beneficiamento de “finos” (-2,0 +0,1mm), seja por espirais ou outro equipamento apropriado para concentração nesta faixa granulométrica, um cenário de aproveitamento desta fração para queima e geração de energia com carvões de baixo poder calorífico foi considerado. Na Tabela 15 são apresentados os dados quando os cortes teóricos foram estimados para densidades de 2,2 e 2,8 (priorizando o teor de enxofre total na fração pirítica) e na Tabela 16 quando os cortes teóricos foram

¹ Considerando 100% do enxofre como enxofre pirítico

estabelecidos nas densidades de 2,2 e 2,7 (priorizando a recuperação na fração pirítica e a dessulfurização da fração com densidade intermediária).

Assim, para a fração energética, agora foram considerados os flutuados na densidade de 2,2 para os rejeitos “-58,8+2,0mm” e a totalidade dos finos e ultrafinos presentes no módulo B. O material para queima em termoelétricas não convencionais e/ou para a co-combustão corresponde a 40,7% da massa do módulo, apresentando teores de 67,9 de cinzas e 3,4% de enxofre. Caso o corte seja efetuado em 2,8 g/cm³, o concentrado de pirita constitui 8,5% da massa e apresenta um teor de 38,4% de enxofre total (aproximadamente 72% pirita). A recuperação de enxofre é teoricamente de 56%. A fração com densidade intermediária fica com 2,2% de enxofre total e 87,2% de cinzas. Caso o corte seja efetuado em 2,7 g/cm³, a massa do concentrado de pirita corresponde a 9,9% com um teor de 37,2% de enxofre total (aproximadamente 70% de pirita¹). A recuperação de enxofre é de aproximadamente 65%. A fração com densidade intermediária fica com um teor de enxofre de 1,3% e um teor de cinzas de 87,6%.

Contudo, o beneficiamento do passivo, no caso o material presente no módulo de rejeitos, apesar de possível tecnicamente, apresenta alguns problemas de cunho prático, os quais:

- o volume de rejeitos depositados é muito grande;
- a separação das frações grossas, das finas e das ultrafinas é difícil de ser realizada de forma mecanizada, pois o material ultrafino atua como meio ligante entre as partículas, formando torrões de difícil desagregação tanto a seco como em água;
- o longo período de disposição oxidou parcialmente a pirita, o contato com a água promove um pH muito baixo e uma alta concentração de acidez, ferro e sulfatos no efluente do beneficiamento, o que acarretaria em altos custos de reagentes para neutralização do sistema.

Assim, antes de recuperar os passivos, ações devem ser tomadas para o aproveitamento dos resíduos dia a dia gerados através de estratégias aqui apresentadas, em concordância com os conceitos de sustentabilidade empresarial.

Os estudos a seguir, idealizados para o aproveitamento integral dos rejeitos de carvão previamente à sua disposição final, foram realizados a partir de uma amostra dos rejeitos finos e ultrafinos que atualmente são encaminhados para as lagoas de sedimentação e de uma amostra do rejeito de carvão recém-saída do jigue (“run-of-jigue”), evitando assim o acúmulo de novos materiais no módulo.

Estes estudos incluíram a avaliação da atual situação no gerenciamento de rejeitos, definição das oportunidades de intervenção, ensaios de lavabilidade do material, estudo de processos para beneficiamento, caracterização tecnológica dos produtos e a avaliação ambiental e técnico-econômica da proposta.

Esta prática pode ser considerada nas minas em atividade e, principalmente, em novos empreendimentos mineiros nas fases de projeto e concepção, aumentando os custos com investimento, entretanto, como vem sido largamente debatido, estes custos são facilmente recuperados ao longo da vida útil do projeto. Um novo modelo de gestão dos rejeitos gerados ou a serem gerados deve ser adotado a fim de se evitar a disposição final de rejeitos de mineração.

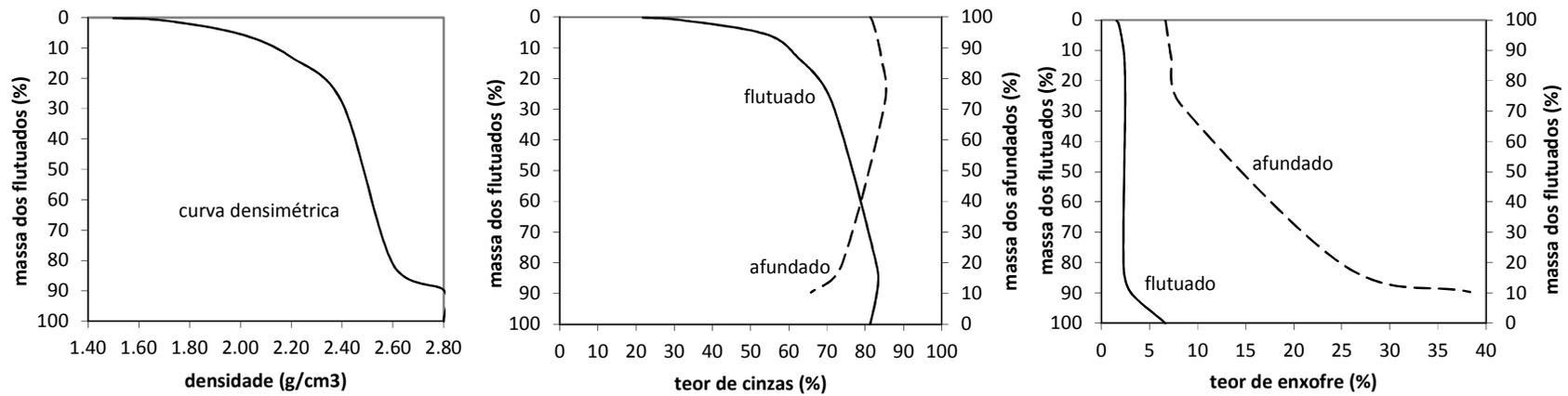


Figura 30 Curvas de separabilidade densimétrica da fração grossa (-50,8+2,0mm) construídas a partir das análises de afunda-flutua com meios densos orgânicos.

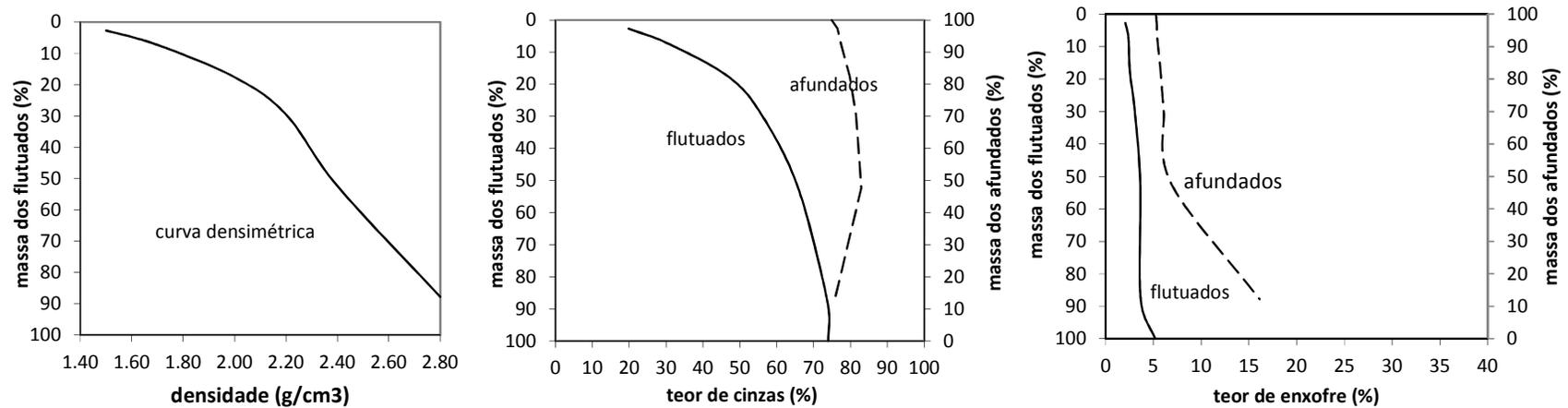


Figura 31 Curvas de separabilidade densimétrica da fração fina (-2,0+0,1mm) construídas a partir das análises de afunda-flutua com meios densos orgânicos.

Tabela 13 Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,8.

Fração	Densidade relativa	Granulometria (mm)	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
Grossos	-2,2	-50,8+2,0	2,4	62,3	8,8
	+2,2 -2,8	-50,8+2,0	2,2	87,2	50,7
	+2,8	-50,8+2,0	38,4	65,7	8,5
Finos	-2,2	-2,0+0,1	3,0	55,9	4,4
	+2,2- 2,8	-2,0+0,1	3,7	82,7	8,7
	+2,8	-2,0+0,1	16,1	75,6	1,8
Ultrafinos	N/D	-0,1	2,6	65,5	17,0

Produto	Fases mineralógicas	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
Energético	matéria carbonosa e quartzo (predominantes), gipso, caulinita, jarosita, illita	2,6	63,2	30,2
Silicatos	quartzo (predominante), plagioclásio, illita, feldspato alcalino, gipso, caulinita	2,4	86,5	59,4
Pirítico	pirita (predominante), quartzo, gibbsita	34,5	67,4	10,3

Tabela 14 Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,7.

Fração	Densidade relativa	Granulometria (mm)	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
Grossos	-2,2	-50,8+2,0	2,4	62,3	8,8
	+2,2-2,7	-50,8+2,0	1,3	87,6	49,3
	+2,7	-50,8+2,0	37,2	67,1	9,9
Finos	-2,2	-2,0+0,1	3,0	55,9	4,4
	+2,2-2,7	-2,0+0,1	2,8	83,2	7,3
	+2,7	-2,0+0,1	13,4	77,6	3,3
Ultrafinos	N/D	-0,1	2,6	65,5	17,0

Produto	Fases mineralógicas	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
Energético	matéria carbonosa e quartzo (predominantes), gipso, caulinita, jarosita, illita	2,6	63,2	30,2
Silicatos	quartzo (predominante), plagioclásio, illita, feldspato alcalino, gipso, caulinita	1,5	87,0	56,6
Pirítico	pirita (predominante), quartzo, gibbsita	31,3	69,7	13,2

Tabela 15 Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,8.

Fração	Densidade relativa	Granulometria (mm)	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
	-2,2	-50,8+2,0	2,4	62,3	8,8
Grossos	+2,2-2,8	-50,8+2,0	2,2	87,2	50,8
	+2,8	-50,8+2,0	38,4	65,7	8,5
Finos e Ultraf.	N/D	-2,0	3,7	69,4	31,9

Produto	Fases mineralógicas	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
Energético	matéria carbonosa e quartzo (predominantes), gipso, caulinita, jarosita, illita	3,4	67,9	40,7
Silicatos	quartzo (predominante), plagioclásio, illita, feldspato alcalino, gipso, caulinita	2,2	87,2	50,8
Pirítico	pirita (predominante), quartzo, gibbsita	38,4	65,7	8,5

Tabela 16 Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,7.

Fração	Densidade relativa	Granulometria (mm)	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
	-2,2	-50,8+2,0	2,4	62,3	8,8
Grossos	+2,2-2,7	-50,8+2,0	1,3	87,6	49,3
	+2,7	-50,8+2,0	37,2	67,1	9,9
Finos e Ultraf.	N/D	-2,0	3,7	69,4	31,9

Produto	Fases mineralógicas	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
Energético	matéria carbonosa e quartzo (predominantes), gipso, caulinita, jarosita, illita	3,4	67,9	40,7
Silicatos	quartzo (predominante), plagioclásio, illita, feldspato alcalino, gipso, caulinita	1,3	87,6	49,3
Pirítico	pirita (predominante), quartzo, gibbsita	37,2	67,1	9,9

4.2. Caracterização dos resíduos do processamento do carvão mineral

Conforme balanço de massa realizado no circuito de beneficiamento (Figura 27), verifica-se que, do total de rejeitos gerados, em torno de 80% são provenientes do circuito de grossos e cerca de 20% são provenientes do circuito de finos e ultrafinos. Levando em consideração a média dos últimos 5 anos de beneficiamento de carvão ROM pela CCSA, foram gerados aproximadamente 820.000 toneladas de rejeitos por ano (SIECESC, 2014). Deste modo, somente no circuito de finos ($\approx 20\%$), foram gerados em torno 164 mil toneladas de “lodo” nas bacias de sedimentação. Estes finos encaminhados para as bacias de sedimentação geralmente apresentam um considerável teor de carbono (Ruiz e Chaves, 2009; Gonzales et al., 2013). As 656 mil toneladas restantes são provenientes do circuito de grossos da planta de beneficiamento e atualmente uma pequena parte do material gerado é beneficiada para a produção de pigmentos a partir da DAM. Assim, através de uma avaliação preliminar das oportunidades de aproveitamento do material gerado, procurando se verificar os benefícios de uma intervenção prévia à disposição final dos rejeitos, dois fluxos de rejeitos devem ser considerados separadamente: (a) os rejeitos provenientes do circuito de grossos (jigagem); e (b) os rejeitos provenientes do circuito de “finos” (na qual inclui agora a mistura das frações finas e ultrafinas, os quais formam o “lodo das bacias de sedimentação”).

Conforme descrito na metodologia experimental, amostras foram coletadas na fração “fina e ultrafina” e na “fração grossa” durante um ciclo de beneficiamento mineral. Cada fração foi avaliada de acordo com as possibilidades de reaproveitamento.

4.2.1. Provenientes do circuito de finos

Para a avaliação das possibilidades de reaproveitamento dos finos de carvão, foram realizadas as seguintes análises: imediata, elementar, formas de enxofre, poder calorífico superior e análise granulométrica.

A Tabela 17 resume as características principais do rejeito fino. Pode-se verificar que esta fração ainda possui uma quantidade significativa de material combustível e um considerável poder calorífico. O material pode ser utilizado para

produção de energia, tanto isolado como misturado com outros materiais de maior poder calorífico. Os possíveis usos desta fração para recuperação energética serão mais bem discutidos na seção 4.4.

Tabela 17 Resultados em base seca das análises imediata, elementar, formas de enxofre e poder calorífico superior para amostra proveniente do circuito de finos.

a) análise imediata	
Cinzas (%)	64,6
Matéria volátil (%)	15,8
Carbono fixo (%)	19,6
b) análise elementar	
Enxofre total (%)	1,2
Carbono (%)	26,5
Hidrogênio (%)	2,2
Nitrogênio (%)	0,5
Oxigênio (%)	4,1
c) Formas de enxofre	
Pirítico (%)	0,8
Sulfático (%)	0,1
Orgânico (%)	0,3
Poder calorífico (kcal/kg)	2.700

É apresentado na Tabela 18, a análise granuloquímica do material. Observa-se que 90% das partículas encontram-se abaixo de 0,6 mm e que o D_{50} é de aproximadamente 150 μm (Figura 32). Em relação ao teor de cinzas e enxofre, pode-se visualizar que os valores são parecidos em todas as faixas granulométricas.

Tabela 18 Resultados dos ensaios de classificação granulométrica e teor de cinzas por tamanho de partícula para amostra proveniente do circuito de finos.

Abertura da peneira, μm	massa(%)	cinzas (%)	enxofre (%)
+850	1,0	65,1	0,8
-850+600	9,3	64,8	1,2
-600+425	9,3	64,9	1,1
-425+300	13,3	64,7	1,1
-300+212	5,1	64,6	1,3
-212+150	10,6	63,4	1,1
-150+106	6,3	64,3	1,1
-106+75	5,9	61,7	1,2
-75+53	9,5	62,3	1,4
-53	29,5	66,5	1,3
Total	100,0	64,6	1,2

Os valores de cinzas e enxofre dos finos e ultrafinos coletados anteriormente à disposição nas bacias de sedimentação são 64,6% e 1,2%, respectivamente. Esses

valores são melhores em qualidade do que as frações conjuntas de “finos” + “ultrafinos” do módulo B; cujos valores médios de cinzas e enxofre são 69,5% e 3,8%. Essa diferença pode ser decorrente de variações na geologia ou procedimentos de beneficiamento ao longo do tempo. Todavia, também é muito provável o maior teor de enxofre na amostra de módulo sejam decorrentes da decomposição física e química da pirita presente nos grossos relacionados ao intemperismo. Ainda, devido ao longo tempo de existência do módulo, a oxidação da matéria orgânica pode também ser significativa, diminuindo a fração de matéria carbonosa (Pereira Neto, 1990).

Esses fatores contribuem na argumentação a favor da importância da ação de beneficiamento dos rejeitos logo após a sua geração, de forma a não haver prejuízos nas propriedades de queima da fração fina.

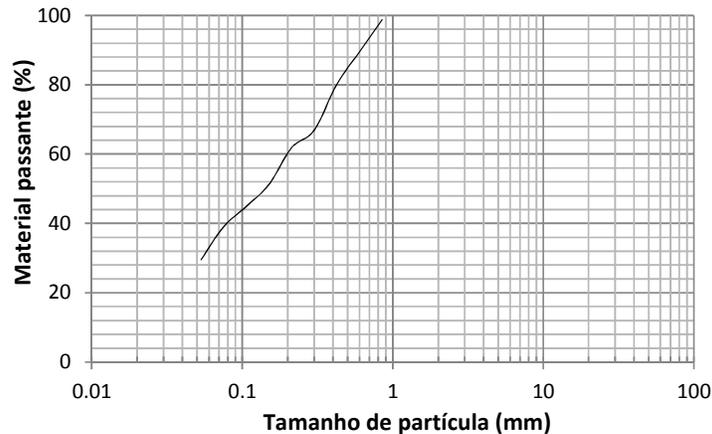


Figura 32 Distribuição de tamanho de partícula para as amostras coletadas no circuito de finos.

Deve-se observar, por fim, que o beneficiamento da fração ultrafina (<1 mm) presente no módulo de rejeitos não foi considerada neste trabalho em função da dificuldade de separação e os custos envolvidos. Contudo, estudos de concentração da fração carbonosa contida nesta fração por flotação já foram conduzidos por Chaves e Ruiz (2009), Ruiz e Chaves (2009) e Gonzales et al. (2013). Nestes estudos, os autores demonstraram que a possibilidade de recuperação deste material para a queima em termoelétricas convencionais através do beneficiamento do material através de flotação. Porém, estes estudos não levaram em consideração o potencial de geração de acidez dos rejeitos da recuperação de carvão neste material.

4.2.2. Provenientes dos circuitos de grossos

Em contraste à fração mais fina, o circuito de grossos possui um elevado teor de enxofre e a contribuição em massa desse rejeito chega a 80% do gerado em um ciclo completo de beneficiamento. Os rejeitos grossos são os que possuem um maior risco ao meio ambiente; pois, além da quantidade gerada, cerca de 90% do enxofre total contido no carvão ROM é reportado para esta fração. De acordo com os dados estatísticos disponíveis (SIECESC, 2014) utilizando como base a média dos últimos 5 anos, são gerados anualmente 656 mil toneladas de rejeitos grossos somente pela CCSA.

Conforme metodologia experimental, o material coletado do circuito de grossos da planta de beneficiamento mineral da Carbonífera Criciúma S.A. foi encaminhado para caracterização tecnológica preliminar, ensaios de lavabilidade e separação por meio-denso em escala de bancada utilizando uma suspensão de ferrossilício. Esta separação foi realizada em dois estágios buscando recuperação de matéria carbonosa em um primeiro estágio de separação, a produção de um material rochoso com baixo teor de enxofre e um concentrado de pirita, em segundo estágio de beneficiamento. Os resultados da caracterização tecnológica preliminar do rejeito bruto são apresentado nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 Resultados das análises imediata, elementar, formas de enxofre e poder calorífico superior para amostra proveniente do circuito de grossos.

a) análise imediata	
Cinzas (%)	84,2
Matéria volátil (%)	12,3
Carbon fixo (%)	3,5
b) análise elementar	
Enxofre total (%)	7,0
Carbono (%)	6,7
Hidrogenio (%)	1,2
Nitrogenio (%)	0,3
Oxigenio (%)	2,1
c) Formas de enxofre	
Pirítico (%)	6,3
Sulfático (%)	0,1
Organico (%)	0,6
Poder calorífico (kcal/kg)	500

A distribuição do tamanho de partícula demonstra que 95% das partículas se encontram acima de 1,000 mm confirmando a distribuição granulométrica adequada para o beneficiamento em circuito de grossos como jigues ou equipamentos de meio denso (Figura 33).

Tabela 20 Distribuição de tamanho de partícula para amostra proveniente do circuito de grossos.

abertura da peneira (mm)	massa (%)
+9,520	65,2
-9,520+4,760	14,5
-4,760+2,000	10,4
-2,000+1,000	4,8
-1,000+0,500	2,1
-0,500+0,250	0,8
-0,250+0,105	0,6
-0,105+0,053	0,5
-0,053+0,025	0,9
-0,025	0,1

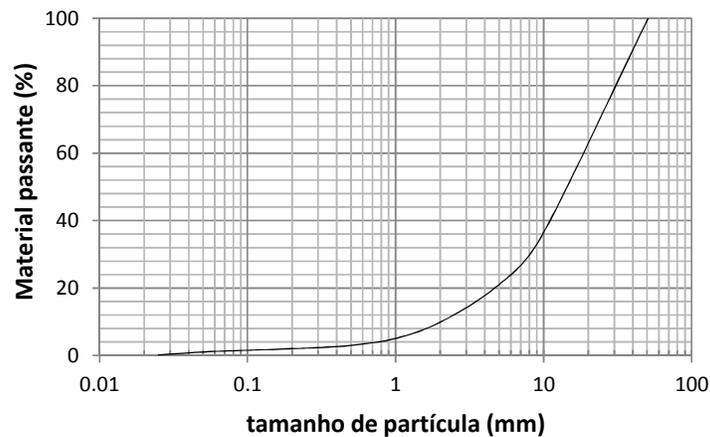


Figura 33 Distribuição de tamanho de partícula para as amostras coletadas no circuito de grossos.

Com a intenção de estabelecer os parâmetros e os equipamentos mais eficientes para a separação da pirita presente no carvão, foram realizados ensaios densimétricos para desenhar as curvas de lavabilidade (curva densimétrica, curva dos afundados, curva dos flutuados e curva NGM) – Figura 34. Nas Tabelas 21 e 22 estão resumidos os resultados de distribuição de massa, os dados analíticos de cinzas e enxofre total, nos cortes teóricos de 2,2 e 2,8 (priorizando o teor de enxofre na fração

pirítica) e nos cortes teóricos de 2,2 e 2,7 (priorizando a recuperação na fração pirítica e a dessulfurização da fração com densidade intermediária).

A fração energética, material com densidade inferior a 2,2, corresponde a 16,2% da massa do material, apresentando teores de 58,5% de cinzas e 2,6% de enxofre. A fração com densidade intermediária apresenta um alto teor de cinzas e uma significativa predominância do mineral quartzo. As frações com densidades relativas acima de 2,7 e 2,8 apresentam elevados teores de enxofre, devido à presença de pirita. Caso o corte seja efetuado em 2,8, o concentrado de pirita constitui a 11,6 da massa e apresenta um teor de 41,3% de enxofre total. A recuperação de enxofre é teoricamente de 69%. A fração com densidade intermediária fica com 2,4% de enxofre total e 91,8% de cinzas. Caso o corte seja efetuado na densidade de 2,7, a massa do concentrado de pirita corresponde a 15% com teor de 38,8% de enxofre total. A recuperação de enxofre é de aproximadamente 83%. A fração com densidade intermediária fica com um teor de enxofre de 1,1% e um teor de cinzas de 92,7%.

Pode-se observar que os resultados obtidos são bastante semelhantes a fração grossa retirada do módulo de rejeitos (Tabelas 13 e 14). Contudo, no material *run of jig*, as propriedades requeridas para cada fração parecem melhor preservadas. Pode-se citar o menor teor de cinzas na fração energética, o menor teor de enxofre na fração intermediária e o maior teor de enxofre na fração pirítica. Esse fato contribui positivamente a favor da argumentação de se evitar a estocagem dos rejeitos em módulos. Reforçando a importância de um gerenciamento integrado deste material.

Em relação ao NGM, na densidade de corte de 2,2 o NGM é de 18,1%, na densidade de 2,7 é de 17,3% e na densidade de corte 2,8 o NGM é de 18,6%; sugerindo um difícil grau de separação (Tabela 2.6). Necessita-se, assim, equipamentos mais precisos em termos de separação densimétrica, tal como ciclone de meio denso.

Segundo Tavares e Sampaio (2005), o processo de separação por meio denso consiste em uma alternativa mais direta e precisa à jigagem, pois as partículas só necessitam ser mais leves ou mais densas que o meio, independentemente de fatores como a velocidade de escoamento do fluido. O processo de separação por meio denso foi originalmente desenvolvido para o beneficiamento de carvões de difícil lavabilidade, para os quais a jigagem se mostrava ineficiente. Com a melhoria do desempenho dos

equipamentos e com uma compreensão mais profunda dos princípios de separação, a aplicação do meio denso foi gradativamente sendo ampliada. Atualmente, ele é utilizado no beneficiamento de diversos tipos de minério e de materiais secundários. Em termos industriais, as suspensões minerais são as mais utilizadas mundialmente, podendo se alcançar uma densidade máxima de $3,8 \text{ g/cm}^3$ no caso das preparadas com ferrossilício (14-16% Si).

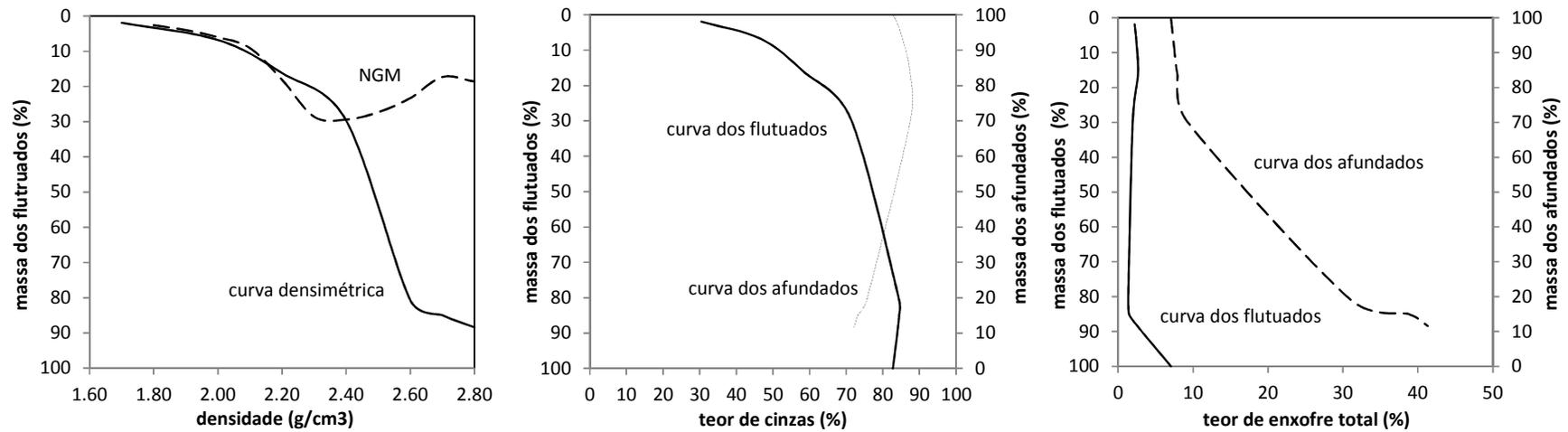


Figura 34 Curvas de lavabilidade dos rejeitos provenientes do processo de jigagem da CCSA: Near Gravity Material (NGM) e curva densimétrica; curva dos afundados e dos flutuados para o teor de cinzas e curva dos afundados e dos flutuados para o teor de enxofre total.

Tabela 21 Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,8.

Fração	Densidade relativa	Granulometria (mm)	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
Grossos	-2,2	-50,8+2,0	2,6	58,5	16,2
	+2,2-2,8	-50,8+2,0	2,4	91,8	72,2
	+2,8	-50,8+2,0	41,3	72,2	11,6

Tabela 22 Resultados analíticos do rejeito de carvão por faixa densimétrica e faixa granulométrica considerando as densidades de corte de 2,2 e 2,7.

Fração	Densidade relativa	Granulometria (mm)	Enxofre (%)	Cinzas (%)	Massa (%)
Grossos	-2,2	-50,8+2,0	2,6	58,5	16,2
	+2,2-2,7	-50,8+2,0	1,1	92,7	68,8
	+2,7	-50,8+2,0	38,8	73,1	15,0

4.3. Beneficiamento de grossos

Os resultados anteriores são referentes a cortes densimétricos realizados em líquidos orgânicos sob condições controladas em laboratório. Em unidades industriais, existe uma imperfeição associada ao equipamento. Os valores de NGM, acima de 15, indicam que a separação deve ser efetuada com meios densos (Tabela 8). Processos como a jigagem, onde efeitos hidrodinâmicos interferem na separação dos materiais, certamente proporcionariam uma quantidade demasiada de material deslocado.

Sabe-se que as empresas carboníferas locais atualmente beneficiam por jigagem uma pequena parte do rejeito para recuperação da pirita. Contudo, uma fração significativa do enxofre é reportada às frações com densidades intermediárias, demonstrando uma reduzida eficiência no processo de separação, e com isso os benefícios ambientais da separação da pirita são minimizados.

A Tabela 23 resume os resultados no beneficiamento do rejeito grosso de carvão quando conduzido em duas etapas (Figura 35), nas densidades de cortes de 2,2 e 2,7, nas seguintes situações:

- (a) meios orgânicos em laboratório (curva de lavabilidade);
- (b) simulação computacional; e
- (c) ensaios de bancada em equipamento de meio denso ferrossilício.

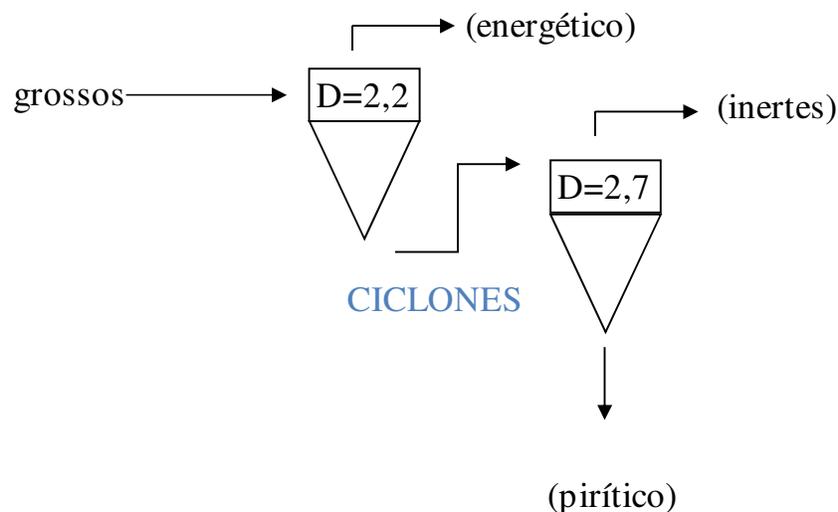


Figura 35 Representação esquemática de uma planta de separação por meio denso em dois estágios e três produtos

Tabela 23 Comparação dos resultados obtidos na separação em meio denso com líquidos orgânicos, simulação e estudos em escala piloto com meio denso de Fe-Si.

	Curvas lavabilidade			Simulação SMD ²			Meio denso Fe-Si		
	<2,2	2,2<D<2,7	>2,7	<2,2	2,2<D<2,7	>2,7	<2,2	2,2<D<2,7	>2,7
Massa (%)	16,2	68,8	15,0	10,9	74,4	14,7	17,0	69,0	14,0
Cinzas (%)	58,5	92,7	73,1	55,7	91,5	67,1	75,8	88,3	64,8
Enxofre	2,6	1,1	38,8	2,9	1,7	33,0	1,8	1,1	37,7
NGM	18,1		18,6						

Pode-se observar que os melhores resultados foram obtidos na situação ideal de laboratório; com a fração D<2,2 apresentando a maior recuperação de material combustível, a fração 2,2<D<2,7 maior teor de cinzas e menor teor de enxofre e a fração D>2,7 o maior teor de enxofre. Nesta mesma linha, os resultados da simulação computacional, bem como o estudo em escala piloto em meio denso apresentaram, resultados semelhantes aos da situação ideal de laboratório.

Deve-se ressaltar também que foram realizadas simulações por jigagem, onde se confirmou a grande imperfeição do processo. Os resultados não foram expressos neste trabalho, cujo foco foi direcionado para o beneficiamento em meio denso.

As curvas de partição obtidas a partir da simulação em meio denso estão apresentadas nas Figuras 36 e 37. Os valores de EPM e a imperfeição considerada na simulação foram:

(unidade de separação) D = 2,2 - EPM = 0,06; I = 0,026

(unidade de separação) D = 2,7 - EPM = 0,15; I = 0,054

Estes valores são típicos dos tanques e ciclones de meio denso (Rubio, 1988) e foram confirmados pela similaridade dos resultados obtidos na unidade piloto.

De acordo com a simulação, uma separação realizada (dois estágios/três produtos) em uma planta de composta por dois ciclones de meio-denso sendo o primeiro utilizando uma suspensão com densidade de 2,2 e o segundo utilizando uma suspensão de 2,7, com uma taxa de alimentação de 127 ton/h e porcentagem de sólidos de 40%, seria possível se obter uma recuperação de 10,9% em massa de um carvão energético com alto teor de cinzas. Também seria possível recuperar 14,7% em massa de um concentrado de pirita com 33,0% de enxofre.

²Separação por Meio Denso

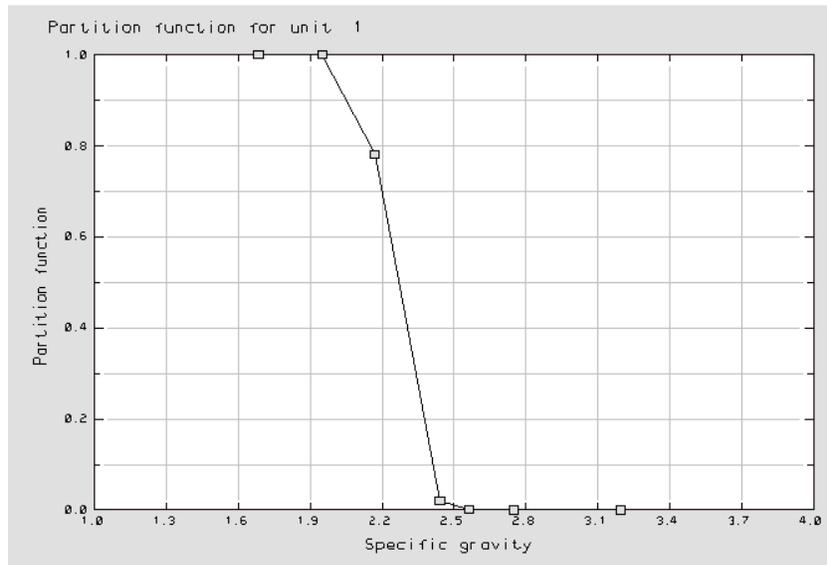


Figura 36 Curva de partição para a unidade 01 de separação por meio denso com suspensão de 2,2 g/cm³.

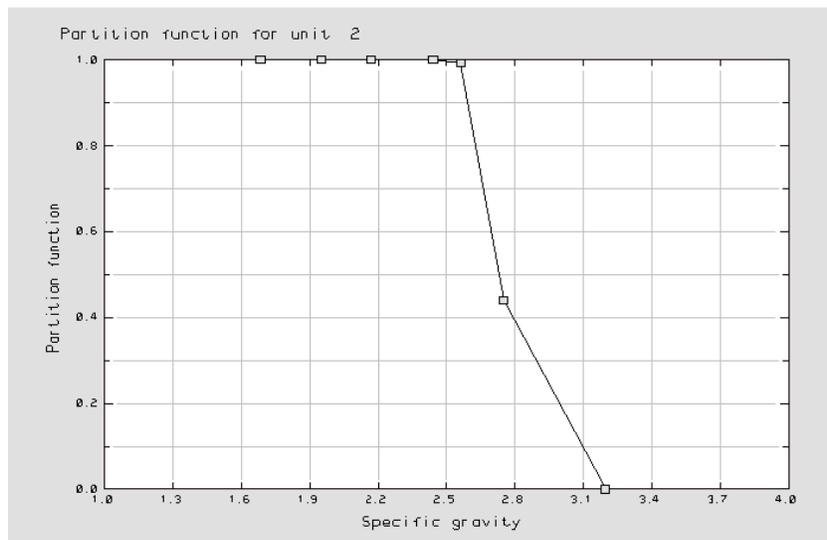


Figura 37 Curva de partição para a unidade 01 de separação por meio denso com suspensão de 2,7 g/cm³.

No experimento em meio denso de Fe-Si, com as mesmas densidades de corte, seria possível uma recuperação em massa de 17% de um material carbonoso ($\approx 16\%$ de carbono) no flutuado em 2,2 g/cm³. Também seria possível recuperar 14% em massa de um concentrado de pirita com 37,7% de enxofre. O material remanescente, com 88,3% de cinzas e apenas 1,1% de enxofre total, corresponde a 69% da massa total da amostra estudada (Figura 38).

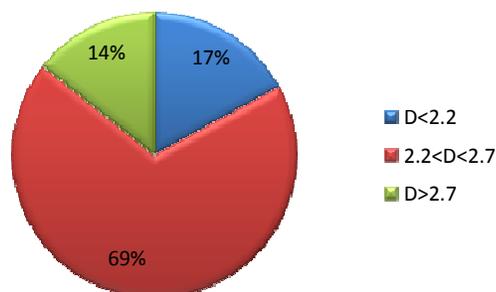


Figura 38 Distribuição em massa das frações obtidas no ensaio de separação em dois estágios utilizando meio denso de Fe-Si.

Os produtos do experimento utilizando o meio de Fe-Si foram caracterizados para futuras aplicações. Os resultados das análises imediata, elemental e formas de enxofre para as frações obtidas e para o rejeito bruto estão na Tabela 24. Um estudo detalhado de cada fração densimétrica será apresentado nos subcapítulos do item 4.3.

Observa-se na Tabela 24, quando comparado às demais frações, a fração com densidade menor que $2,2 \text{ g/cm}^3$, separada em um primeiro estágio, possui um teor de carbono total de 16,4%, como anteriormente referido; o que significaria em uma recuperação de 42% da matéria carbonosa contida na amostra bruta. O poder calorífico superior (PCS) da amostra seria de 1.100 kcal/kg.

Tabela 24 Resultados das análises imediata, elemental e formas de enxofre realizadas no rejeito bruto e nas frações obtidas nos ensaios de separação por meio-denso ferro silício.

	Rejeito bruto	D<2,2 (g/cm ³)	2,2<D<2,7 (g/cm ³)	D>2,7 (g/cm ³)
a) Análise imediata				
Cinzas (%)	82,7	75,8	88,3	64,8
Matéria volátil (%)	12,1	11,6	8,4	27,6
Carbono Fixo (%)	3,4	10,5	1,0	6,9
Umidade (%)	1,8	2,1	2,3	0,7
Poder calorífico (kcal/kg)	500	1100	300	700
b) Análise elemental				
C (%)	6,7	16,4	3,9	8,9
H (%)	1,2	1,8	1,1	0,9
N (%)	0,3	0,5	0,3	0,3
S (%)	7,0	1,8	1,1	37,7
c) Formas de enxofre				
Enxofre pirítico (%)	6,3	1,3	0,7	32,5
Enxofre sulfático (%)	0,1	0,2	0,1	0,4
Enxofre organico (%)	0,6	0,3	0,3	4,8

Os resultados do segundo estágio de separação demonstraram que é possível uma recuperação de 75% do enxofre do rejeito bruto na fração com densidade acima de $2,7 \text{ g/cm}^3$, obtendo-se um produto com 37,7% de S total (aproximadamente 70% de

pirita). Verifica-se que o teor de carbono total nesta fração é mais elevado que na fração de densidade intermediária, com 8,9%, o que pode ser explicado pela associação da pirita com a matéria carbonosa das jazidas da Camada Barro Branco. O restante do material correspondeu a 69% em massa da amostra inicial com um teor de enxofre total de 1,1% e com 88,3% de cinzas. Apesar da eficiência na separação por meio denso e do baixo teor de carbono (3,9%) reportado à esta fração, cerca de 40% do carbono contido no rejeito bruto é deslocado à fração de densidade intermediária.

4.3.1. Caracterização da fração carbonosa

Levando em consideração os resultados obtidos na distribuição do tamanho de partícula e a médias dos últimos 5 anos de produção da CCSA, se estima que são geradas anualmente, aproximadamente 111 mil toneladas de rejeitos grossos exclusivamente nesta planta de beneficiamento mineral. A Figura 39 mostra o aspecto geral da fração $D < 2,2$. Petrograficamente, é um folhelho carbonoso. Macroscopicamente, a distribuição de carbono é praticamente homogênea. Verificam-se poucos macerais a olho nu. O teor de carbono é de 16,4% e o teor de cinzas é de 75,8% (Tabela 24). A relação C/H é de 9,1, valor inferior aos carvões betuminosos cuja relação C/H varia entre 14 e 17 (Leonard et al., 1979). O poder calorífico superior desta fração foi medido em 1.100 kcal/kg. Este material, se misturado com o material proveniente da separação sólido-líquido da água de processo na proporção de 0.7:1.0³, que possui um poder calorífico de 2.700 kcal/kg (164 mil ton/ano), alcançaria um poder calorífico superior de 2.100 kcal/kg.

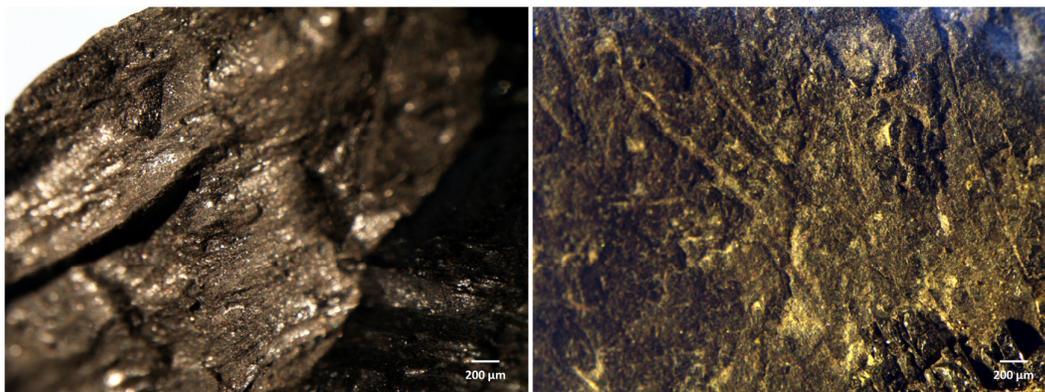


Figura 39 Imagens realizadas em lupa petrográfica para a fração energética obtida nos ensaios de separação por meio denso ferrossilício.

³ Proporção da geração média anual destes materiais.

Os resultados das análises petrográficas estão apresentados na Figura 40 e Tabela 25. As análises mostram que os macerais do grupo inertinita são os em maior abundância na amostra. Entretanto, confirmando os resultados da análise imediata, verifica-se um significativo predomínio de matéria mineral na amostra estudada com predominância de argila com aproximadamente 70% do total observado.

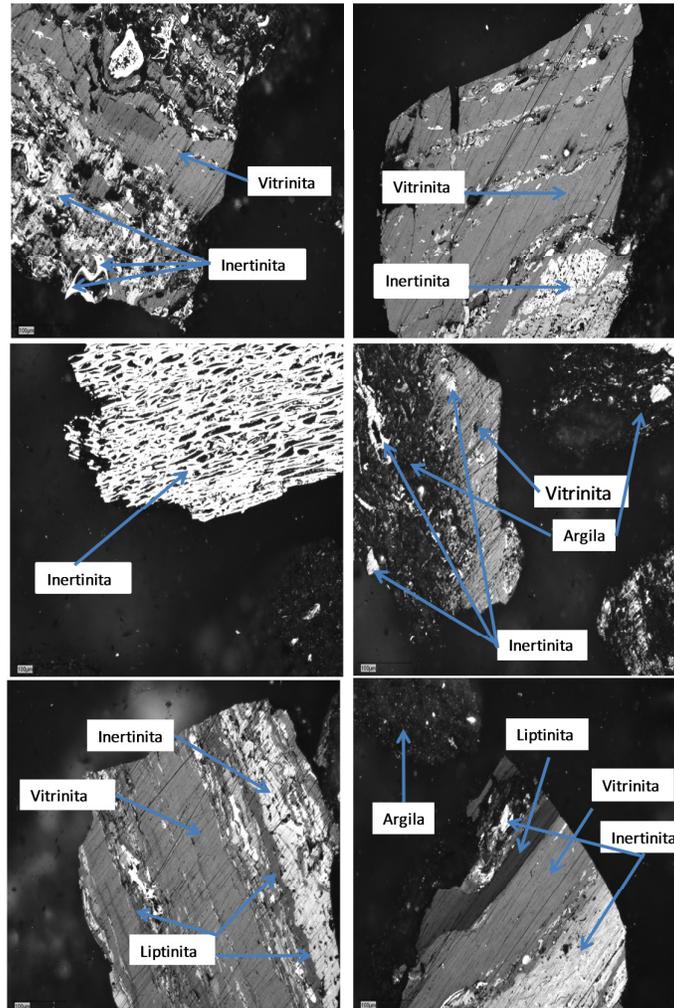


Figura 40 Imagens obtidas através de microscópio petrográfico de luz refletida com a identificação dos grupos dos macerais e matéria mineral encontrada na fração D<2,2.

Tabela 25 Proporção volumétrica de macerais e matéria mineral na fração D<2,2.

Vitrinita Total (%)	8,4
Liptinita Total (%)	3,4
Inertinita Total (%)	11,0
Matéria Mineral	
Argila (%)	69,8
Carbonato (%)	0,2
Quartzo (%)	6,0
Pirita (%)	1,2

Em termos de aplicação, o material poderia ser aplicado em:

- (a) queima em termoelétricas, após mistura com carvões de melhor qualidade;
- (b) gaseificação.

A aplicação mais imediata seria na queima em termoelétricas em sistemas de leito fluidizado circulante. Leito fluidizado circulante é uma tecnologia largamente conhecida e utilizada mundialmente para a queima de carvões e/ou outros materiais carbonosos com altos teores de cinzas e enxofre (Miller, 2005). Krishnan et al.(1991) mostraram que através da combustão de carvões com altos teores de cinzas e rejeitos de carvão (aproximadamente 65% de cinzas) é possível alcançar uma considerável eficiência energética utilizando leito fluidizado. Ainda, através da co-combustão de rejeitos de carvão com carvões de melhor qualidade ou com outros resíduos com alto poder calorífico é possível se obter energia (Li et al., 2006; Barbosa et al., 2009; Muthuraman et al. 2010; Li, et al., 2011; Hoffmann et al., 2012; Faé Gomes et Al., 2013). Na Tabela 26 estão listados alguns resíduos oriundos de outras atividades industriais que podem ser misturados a carvão com elevados teores de cinzas.

Tabela 26 Poder calorífico de resíduos de diversas atividades industriais que podem ser utilizados na co-combustão com carvão mineral.

Descrição	Poder Calorífico (kcal/kg)	Referencia
Biomassa de madeira	2.900	Hoffmann et al., 2012
Resíduo sólidos urbanos	4.200	Muthuraman et al., 2010
Resíduo de tabaco	---	Li, et al., 2011
Pneus usados	---	Li et al., 2006
Lodo de esgoto estabilizado	3.100	Barbosa et al., 2009
Casca de arroz	3.200	Faé Gomes et Al., 2013
Resíduo de acácia	4.200	Faé Gomes et Al., 2013
Resíduo de pinos	4.000	Faé Gomes et Al., 2013

Considerando o material energético obtido em um primeiro estágio de separação, misturado com o material obtido na separação sólido-líquido da água de processo dos circuitos de finos, com um poder calorífico de 2.100 kcal/kg, poderia se esperar uma produção mensal de cerca de 23.000 toneladas (somente pela CCSA) deste material para produção de energia. Isso equivale a aproximadamente 17.000 MW/h, levando em consideração uma eficiência de queima de 30% (Miller, 2005) em usinas de leito fluidizado circulante e um consumo médio de 0,2 MW/h por habitante (EPE, 2013). Energia suficiente para atender uma cidade com cerca de 85.000 habitantes.

Outra possibilidade seria a gaseificação. A gaseificação tem sido estudada e é citada por muitos autores como o futuro para o uso sustentável do carvão. Esta tecnologia de queima é uma alternativa mais eficiente e ambientalmente amigável às tecnologias de queima convencionais devido à redução na geração de emissões principalmente SOx e NOx. A conversão em energia em células de gaseificação pode alcançar valores superiores a 60% (Longwell et al., 1995; Miller, 2005). Com isto, a fração energética produziria cerca de 34.000 MW/h, algo suficiente para suprir mensalmente com eletricidade uma cidade de aproximadamente 170.000 habitantes.

4.3.2. Caracterização da fração com densidade intermediária

A Figura 41 mostra o aspecto geral da fração flutuada em 2,7 e afundada em 2,2 g/cm³. Petrograficamente, é um folhelho com cor acinzentada e não apresenta a presença de macerais a olho nu. O teor de carbono é de apenas 3,9% e o de enxofre é de 1,1%. Uma redução de 84% em relação ao teor de enxofre inicial.



Figura 41 Imagens realizadas em lupa petrográfica para a fração intermediária obtida nos ensaios densimétricos.

A Figura 42 apresenta o difratograma de raios x da fração com densidade intermediária. A distribuição relativa dos compostos cristalinos, pela análise gráfica dos picos, é apresentada na Figura 43. É possível observar que o quartzo (SiO₂) é o composto cristalino majoritário. Como compostos secundários são identificados a ilita ((K,H₃O)(Al,Mg,Fe)₂(Si,Al)₄O₁₀[(OH)₂,(H₂O)]), o gipso (CaSO₄.2H₂O), a caolinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄), o plagioclásio ((Ca,Na)Al(Al,Si)Si₂O₈ ou (Na,Ca)(Si,Al)₄O₈) e o feldspato alcalino (NaAlSi₃O₈ ou KAlSi₃O₈).

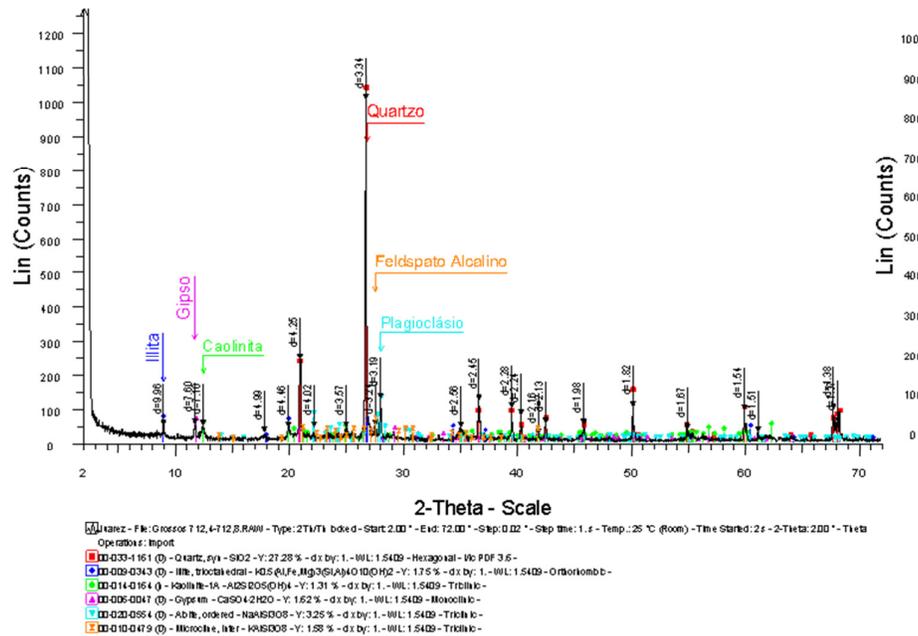


Figura 42 Difratoograma de raios X da fração com densidade intermediária.

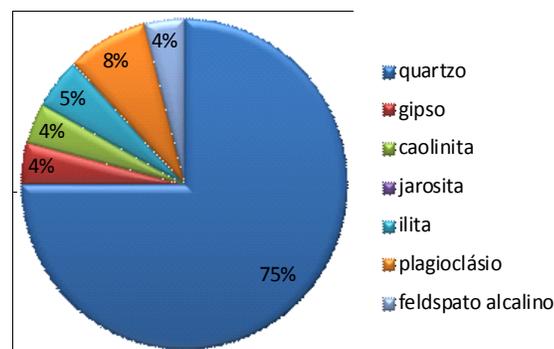


Figura 43 Resultados da análise semi-qualitativa de difração de raios-X da fração com densidade intermediária.

A análise elementar por FRX confirma esses resultados. Conforme apresentado na Figura 44, o silício e o alumínio (constituintes da sílica e aluminossilicatos) são os elementos majoritários na fração com densidade intermediária. Pode-se observar, também, quando comparado com a análise de FRX do rejeito bruto, que os valores de Fe e S (elementos constituintes da pirita) bem como de perda ao fogo são reduzidos substancialmente.

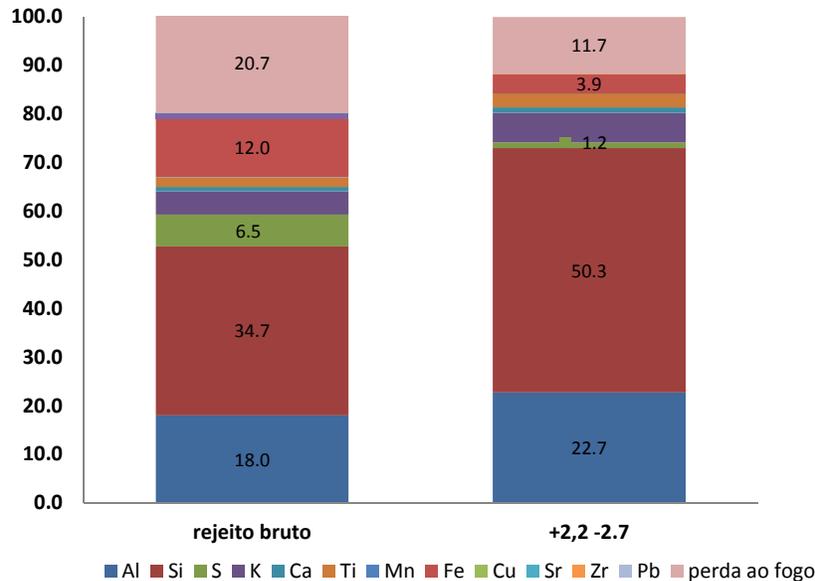


Figura 44 Comparação entre os resultados de FRX para o rejeito bruto e a fração após a remoção dos sulfetos.

Dentre as frações gravimétricas, essa é a que possui o maior volume e possivelmente a maior dificuldade para comercialização. Contudo, a redução do teor de enxofre representa um menor teor de pirita presente no material, o que significa em um menor potencial de geração de acidez. Os ganhos ambientais e econômicos da dessulfurização de rejeitos serão melhores discutidos, respectivamente, nas seções 4.4 e 4.5 da presente tese.

Em termos de aplicação, o material poderia ser aplicado em:

- (a) produção de agregados para construção civil;
- (b) material para produção de substratos;
- (c) estruturas de terra ou estradas;
- (d) fabricação de cerâmica;
- (e) solos fabricados.

Por exemplo, Nixon e Gartner, em 1980 já discutem possibilidades de processamento de rejeitos de carvão para uso como agregados na construção civil. Abordando técnicas de processamento mineral como concentração, cominuição, classificação, tratamento térmico e aglomeração.

Cañibano, em 1995, apresenta um artigo onde descreve a viabilidade técnica

da utilização de rejeitos de carvão como material de preenchimento em estruturas de terra armada, onde o rejeito de carvão obteve desempenho plenamente satisfatório. Comenta que, em 1994, foram construídas estruturas de terra armada utilizando 120.000 toneladas de rejeitos de carvão na rodovia Ujo-Caborana localizada em Asturias, Espanha. A publicação também comenta que, pela primeira vez, rejeitos de carvão foram utilizados como substrato para cultura hidropônica de vegetais e na produção de plantas ornamentais. Os resultados, tanto em termos de produção como de qualidade, foram semelhantes aos obtidos em culturas utilizando substratos convencionais. A Figura 45 mostra uma plantação de tomate em cultura hidropônica utilizando rejeito de carvão como substrato.

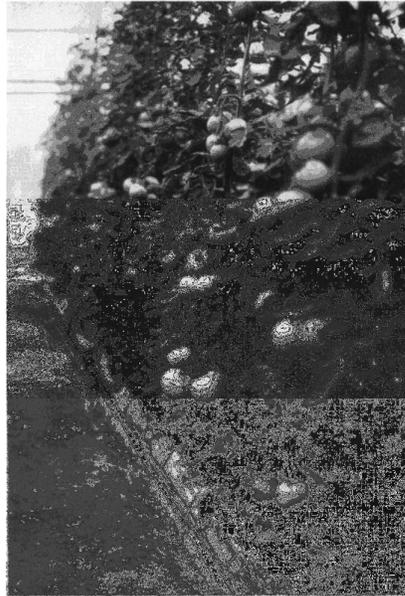


Figura 45 Cultura hidropônica de tomate na Espanha utilizando rejeito de carvão como substrato (Canibaño, 1995).

Lemeshev et al. (2004) demonstraram que é possível usar até 50% de rejeitos de mineração de carvão em substituição à argila utilizada no processo convencional de fabricação da cerâmica, atendendo as especificações das normas Russas e reduzindo concomitantemente os impactos associados à extração de carvão e argila no processo produtivo de fabricação de cerâmica.

Kinuthia et al. (2009), em estudos conduzidos no Reino Unido, também demonstraram que é possível utilizar rejeitos de carvão como agregados em concretos de baixa e média resistência, atingido valores de resistência a compressão aceitáveis. No artigo, valorizam os ganhos ambientais do procedimento. Contudo, os autores

observaram um aumento na relação água: cimento e efeitos negativos na trabalhabilidade do concreto; uma situação que pode ser somente parcialmente resolvida com aditivos. Também consideram a possibilidade que o rejeito não deva ser empregado como um todo, mas antes submetidos a procedimentos de processamento mineral para melhorar suas características granulométricas e mineralógicas; mesmo entendimento deste trabalho.

No que diz respeito ao carvão de Santa Catarina, estudos de laboratório com a fração com densidade intermediária demonstraram que é possível aplicar com sucesso o material como agregado miúdo na confecção de blocos de concreto. Santos et al. (2013) demonstraram que é possível substituir o agregado de areia natural por rejeitos de carvão. Blocos de concreto produzidos com 25% e 50% de substituição em relação ao agregado natural apresentaram resultados satisfatórios em termos de resistência mecânica sendo tecnicamente viável e com benefícios ambientais. Entretanto, os custos para a cominuição não foram discutidos. São apresentados na Figura 46 blocos de concreto para pavimentação produzidos com diferentes níveis de substituição de agregado miúdo por rejeitos de carvão.

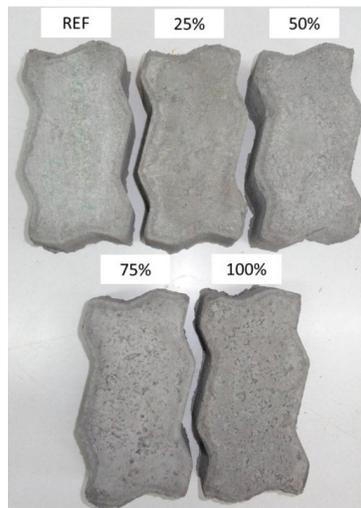


Figura 46 Blocos de concreto para pavimentação produzidos com diferentes níveis de substituição de agregado miúdo natural (areia de leitos de rios) por rejeitos de carvão (Santos et al., 2013).

Nesta mesma linha, solos fabricados a partir da mistura da fração de densidade intermediária de rejeitos de carvão britada com escória de aciaria e lodo de estação de tratamento de esgoto facilitaram o desenvolvimento de sorgo (*Sorghum bicolor*) e azevém (*Lolium multiflorum*), conforme apresentado na Figura 47. Desta maneira, estes

solos produzidos também são considerados como uma alternativa para materiais de cobertura de áreas degradadas, auxiliando na mitigação e/ou redução dos impactos ambientais relacionados à extração do carvão na região sul do Brasil entretanto os custos envolvidos com a preparação do material para este fim não são ainda debatidos (Firpo et al., 2013).

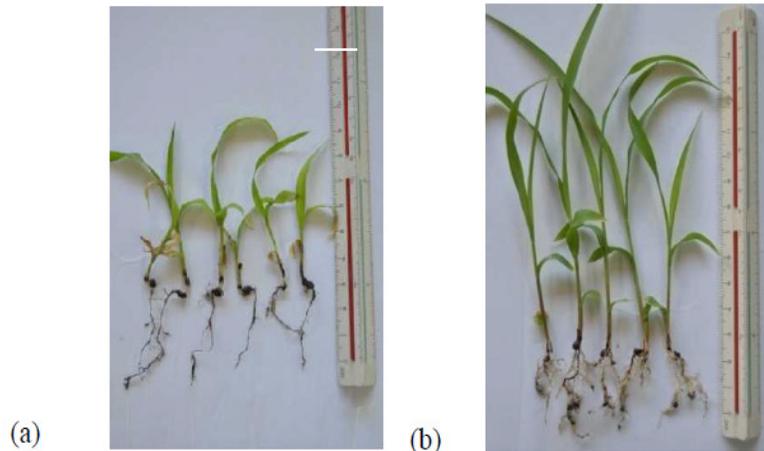


Figura 47 *Sorghum bicolor* de sete semanas de idade: (a) mudas desenvolvidas em solo nativo – controle e (b) mudas desenvolvidas em solo fabricado com rejeito de carvão, lodo e escória (Firpo et al., 2013).

4.3.3. Caracterização da fração pirítica

A Figura 48, obtida através da observação em lupa petrográfica, mostra o aspecto geral da fração pirítica, com $D > 2,7$. São observados nódulos de pirita cristalizados assim como disseminados. O teor de enxofre pirítico nesta fração é de 32,5% e a recuperação chega a 74% do teor inicial. Os resultados semi-quantitativos de DRX demonstram que 69% da amostra é pirita (Figura 49 e 50).

Em termos de aplicação, este concentrado de pirita poderia ter vários usos, como na produção de:

- (a) ácido sulfúrico;
- (b) sais e óxidos de ferro;
- (c) abrasivos.

Deve-se levar em conta que o Brasil produz somente 18% do enxofre que utiliza, e 67% deste enxofre provém do processo de ustulação de sulfetos metálicos. O enxofre e seus derivativos possuem as mais diversas aplicações, como nas indústrias metalúrgicas, de pigmentação, celulose, do petróleo, assim como baterias, detergentes, fungicidas, cosméticos, explosivos, no tratamento de água, entre outros. No entanto, o principal uso do enxofre é para produção de ácido sulfúrico para ser usado na indústria de fertilizantes (DNPM, 2009). A produção de ácido sulfúrico pode ser realizada pela ustulação da pirita, uma tecnologia estabelecida e largamente utilizada em âmbito mundial (Runkel e Sturm, 2009).

Levando em consideração a produção média anual dos últimos 5 anos de carvão ROM na região carbonífera de Santa Catarina, a geração mensal de rejeitos de beneficiamento de carvão chega a 410.000 toneladas, com teores na ordem de 6% de enxofre pirítico. Conforme exposto anteriormente, com o beneficiamento deste material em meio denso, pode-se obter concentrados com teores de aproximadamente 33% de enxofre pirítico e recuperações maiores do que 70%. Levando em consideração uma recuperação mássica de 14%, seria possível produzir cerca de 230.000 ton/ano de enxofre.

De acordo com o Sumário Mineral 2013 do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014), o Brasil produziu em 2012, 500.000 toneladas de enxofre. Desta forma, a produção brasileira passaria para 730.000 ton/ano, representando um aumento de cerca de 50% na produção anual, com um impacto positivo de 46 milhões de dólares na balança comercial Brasileira. A Tabela 27 apresenta os dados apresentados no Sumário Mineral 2013 (DNPM, 2014) e um cenário projeto com a recuperação da pirita contida no carvão ROM no estado de Santa Catarina.

Se considerarmos o aproveitamento do enxofre presente nos passivos (módulos de rejeitos), essa produção poderia ser ainda aumentada. Entretanto, na prática, os rejeitos da mineração do carvão contendo pirita permanecem sem aplicação, sujeitos a intempérie, gerando águas ácidas, com elevadas concentrações de íons sulfato, ferro e outros metais dissolvidos. Por exemplo, no Módulo de Rejeitos da

UM-II (Carbonífera Criciúma) estão depositados 13.000.000 de toneladas de rejeito de carvão com um percentual de pirita de 10,6%. Isso corresponde a 1.378.000 toneladas de pirita, que podem ser transformadas em produtos de valor agregado (ácido sulfúrico e sais e óxidos que podem ser aplicados como coagulantes, pigmentos e catalisadores). Em termos de ácido sulfúrico, considerando uma recuperação global do processo de 60%, o módulo poderia gerar 1.361.786 toneladas de ácido sulfúrico (744.145 m³), o que corresponde ao montante que Brasil importa em aproximadamente 2 anos.

Tabela 27 Dados do Sumário Mineral 2013 (DNPM, 2014) e um cenário projeto com a recuperação da pirita contida no carvão ROM no estado de Santa Catarina.

	Discriminação	Unidade	2010	2011	2012	projetado
Produção	Produção Total	(t)	454.825	477.880	500.000	730.000
	A partir do folhelho pirobetuminoso	(t)	24.803	17.744	21.746	21.746
	A partir do petróleo	(t)	143.147	170.136	222.561	222.561
	A partir da pirita ⁽¹⁾	(t)	-	-	-	230.000
	Outras formas ⁽²⁾	(t)	286.875	290.000	255.693	255.693
Importação	Enxofre	(t)	2.064.090	2.290.345	2.249.385	2.016.955
		(US\$-FOB)	267.431.000	504.594.000	449.023.000	403.269.983
Exportação	Enxofre	(t)	540	244	1.215	1.215
		(US\$-FOB)	440	217	728	728
Consumo Aparente ⁽³⁾	Enxofre	(t)	2.518.375	2.767.981	2.748.170	2.748.170
Preço	Importação S granel	(US\$/t)	128,73	210,61	199,94	199,94

Fonte: modificado de DNPM, 2014. (1) projetado a partir do aproveitamento da pirita; (2) Enxofre contido no H₂SO₄ produzido pela Votorantim Metais, Paranapanema, Anglo Gold Ashanti; (3) produção + importação – exportação.

Além do ácido sulfúrico outras tecnologias emergentes vêm sendo estudadas com intuito de se utilizar a pirita como matéria-prima para a utilização em diversos setores. A Tabela 28 demonstra estudos desenvolvidos para utilização de pirita em diversos setores industriais.

Tabela 28 estudos desenvolvidos buscando a aplicação de pirita em diversos setores produtivos

Titulo do artigo	Autores	Revista	Ano	Aplicações
Biohydrometallurgical/UV production of ferrous sulphate from pyrite present in coal tailings heptahydrate crystals	E.M. Vigânico; A. V. Colling; R. A. Silva & I. A. H. Schneider	Minerals Engineering	2011	Cristais de sulfato ferroso heptahidratado
Bioprocessing of pyrite concentrate from coal tailings for the production of the coagulant ferric sulphate	A.V. Colling; J.C.S.S. Menezes & I.A.H. Schneider	Minerals Engineering	2011	Coagulante a base de sulfato férrico
Electro deposition of pyrite thin-films for photovoltaic cells	S. Nakamura & A. Yamamoto	Solar Energy Materials & Solar Cells	2010	Películas condutoras para células fotovoltaicas
Formation of pyrite thin nano-films by thermal-sulfurating electro deposition films at different temperature	Y.Z. Dong; Y.F. Zheng; H. Duan; Y.F. Sun & Y.H. Chen	Materials Letters	2009	Películas condutoras para células fotovoltaicas
Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada	M. Benzaazoua; B. Bussière; I. Demers; M. Aubertin; É. Fried & A. Blier	Minerals Engineering	2008	Cimento-pasta para backfill
Potential use of pyrite as an amendment for calcareous soil	M.A. Castelo-Branco; J. Santos; O. Moreira; A. Oliveira; F. Pereira Pires; I. Magalhaes; S. Dias; L.M. Fernandes; J. Gamac; J.M. Vieira e Silva & J. Ramalho Ribeiro	Journal of Geochemical Exploration	2010	Correção de solos alcalinos
Pyrite film synthesized for lithium-ion batteries	H. Siyu; L. Xinyu; L. QingYu & C. Jun	Journal of Alloys and Compounds	2009	Películas condutoras para eletrodos
Specifying targets of future research in photovoltaic devices containing pyrite by numerical modelling	P.P. Altermatt; T. Kiesewetter; K. Ellmer & H. Tributsch	Solar Energy Materials & Solar Cells	2009	Películas condutoras para células fotovoltaicas

4.4. Avaliação ambiental do rejeito bruto e da fração com densidade intermediária.

Para se verificar o desempenho ambiental da dessulfurização dos rejeitos de beneficiamento de carvão na região de Santa Catarina, uma avaliação ambiental comparativa foi realizada levando em conta as seguintes situações:

- (a) disposição do rejeito conforme o atual modo de operação;
- (b) disposição da fração com densidade intermediária, após a separação para aproveitamento da fração mais rica em matéria orgânica e da fração pirítica.

Ainda, os dados obtidos nesta etapa permitem avaliar diversos cenários de disposição final dos rejeitos gerados nas etapas de beneficiamento mineral. Este estudo foi realizada em termos de periculosidade do resíduo conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004), potencial de geração de acidez conforme ensaios de contabilização de ácidos e bases e testes cinéticos em células úmidas. Por fim, foi realizada uma simulação do tratamento do efluente em laboratório utilizando o tratamento físico-químico convencional.

4.4.1. Periculosidade conforme NBR 10.004:2004

Os resultados realizados em laboratório cadastrado quanto à classificação de acordo com a NBR 10.004 demonstraram que o rejeito bruto é classificado como RESÍDUO CLASSE 2-A – NÃO INERTE e a fração intermediária ($2,2 < D < 2,7$) é classificada como RESÍDUO CLASSE 2-B - INERTE.

A Tabela 19 apresenta os resultados para composição química do resíduo. De acordo com a norma técnica NBR 10.004:2004, ambas as frações estudadas não se enquadram como resíduo perigoso de fontes específicas e não específicas. Ainda, de acordo com o laudo, as amostras não apresentaram propriedades que conferem características de corrosividade, reatividade, inflamabilidade, patogenicidade e toxicidade.

Tabela 29 Composição química do resíduo (laudo técnico número LCR 11591/11).

Parâmetro	Resultados da Amostra	
	Rejeito jigue	2,2<d<2,7
pH	7,1	7,6
Umidade (%)	1,1	0,6
Matéria Orgânica (%)	20,1	10,2
Cinzas (%)	78,8	89,2
Sulfeto (base seca) (mg/kg)	ND*	ND*
Cianeto (base seca) (mg/kg)	ND*	ND*
Mercurio (base seca) (mg/kg)	ND*	ND*
Chumbo (base seca) (mg/kg)	4,1	1,5
Cromo (base seca) (mg/kg)	5,7	2,9
Níquel (base seca) (mg/kg)	4,4	9,4
Cádmio (base seca) (mg/kg)	ND*	ND*
Extraíveis em Hexano (base seca) (%)	0,4	0,03
Hidrocarbonetos Totais (base seca) (mg/kg)	313,6	35,9

*não detectado

Na Tabela 30, são apresentados os resultados de lixiviação realizados conforme norma técnica ABNT NBR 10.005:2004. Observa-se que nenhum dos parâmetros, de ambas as amostras, foram detectados nos ensaios; e com isso, não ultrapassando o limite máximo no extrato previsto no Anexo F da NBR 10.004:2004.

Tabela 30 Resultados do Ensaio de Lixiviação conforme a NBR 10.005:2004 (laudo técnico número LCR 11591/11).

Parâmetro	Resultados da Amostra		Limites Máx. Anexo F NBR 10004
	Rejeito jigue	2,2<d<2,7	
<i>Inorgânicos</i>			
Arsênio (mg/L)	ND*	ND*	1,0
Bário (mg/L)	ND*	ND*	70,0
Cádmio (mg/L)	ND*	ND*	0,5
Chumbo (mg/L)	ND*	ND*	1,0
Cromo Total (mg/L)	ND*	ND*	5,0
Mercurio (mg/L)	ND*	ND*	0,1
Fluoreto (mg/L)	ND*	ND*	150,0
Prata (mg/L)	ND*	ND*	5,0
Selênio (mg/L)	ND*	ND*	1,0

*não detectado

Na Tabela 31 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de solubilização realizados conforme norma técnica ABNT NBR 10.006:2004. Os resultados mostram que o rejeito bruto do jigue ultrapassou os limites máximos previstos no Anexo G da NBR 10.004/2004 nos parâmetros alumínio e ferro, sendo assim classificada como Resíduo Classe II-A - Não Inerte. O rejeito de densidade intermediária (2,2<D<2,7) não teve nenhum dos parâmetros analisados com valores acima do previsto no Anexo G da NBR 10.004/2004,

sendo classificado como Resíduo Classe II-B, Inerte.

Tabela 31 Resultados do Ensaio de Solubilização conforme a NBR 10.006:2004 (laudo técnico número LCR 11591/11).

Parâmetros	Resultados da Amostra		Limites Máx. Anexo G NBR 10004
	rejeito bruto	2,2<d<2,7	
Fenóis Totais(mg/L)	ND*	ND*	0,001
Mercúrio(mg/L)	ND*	ND*	0,001
Arsênio(mg/L)	ND*	ND*	0,01
Bário(mg/L)	ND*	ND*	0,7
Cádmio(mg/L)	ND*	ND*	0,005
Chumbo(mg/L)	ND*	ND*	0,01
Cromo Total(mg/L)	ND*	ND*	0,05
Alumínio(mg/L)	0,3	ND*	0,2
Ferro(mg/L)	0,6	0,1	0,3
Manganês(mg/L)	0,1	ND*	0,1
Sódio(mg/L)	45,4	28,0	200,0
Zinco(mg/L)	ND*	ND*	5,0
Cobre(mg/L)	ND*	ND*	2,0
Prata(mg/L)	ND*	ND*	0,05
Selênio(mg/L)	ND*	ND*	0,01
Cianeto(mg/L)	ND*	ND*	0,07
Fluoreto(mg/L)	ND*	ND*	1,5
Nitrato(mg/L)	0,1	ND*	10,0
Cloreto(mg/L)	38,7	14,4	250,0
Sulfato(mg/L)	57,8	51,9	250,0
Surfactantes(mg/L)	ND*	ND*	0,5

*não detectado

4.4.2. Contabilização de ácidos e bases

Os resultados dos ensaios estáticos podem ser visualizados na Tabela 32. Para o rejeito bruto, o valor do potencial de neutralização líquido (NNP) foi de -217,3 kg CaCO₃/ton pelo método ABA tradicional e de -196,9 kg CaCO₃/ton pelo método ABA modificado. Já para a fração com densidade intermediária, o valor de NNP foi de -35,0 kg CaCO₃/ton pelo método ABA tradicional e de -22,5 kg CaCO₃/ton pelo método ABA modificado. Isso indica que o material processado, com densidade relativa entre 2,2 e 2,7, apresenta um potencial de geração de acidez líquido de 10 a 20% do rejeito de carvão original.

Tabela 32 Resultados dos ensaios estáticos ABA tradicional e modificado realizados com a amostra de rejeito bruto e fração intermediária.

	AP (kg CaCO ₃ /ton)		NP (kg CaCO ₃ /ton)		NNP (kg CaCO ₃ /ton)	
	Tradic.	Modific.	Tradic.	Modific.	Tradic.	Modific.
2,2<d<2,7	35,0	22,5	0,0	0,0	-35,0	-22,5
Rejeito Bruto	217,3	196,9	0,0	0,0	-217,3	-196,9

Como os valores de NNP foram inferiores a $-20 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$ em ambos os casos, espera-se a geração de acidez no sistema; talvez em elevado grau no rejeito bruto e de forma mais moderada na fração $2,2 < D < 2,7$. Esses dados contradizem o laudo de caracterização do resíduo quanto a periculosidade conforme a NBR 10.004:2004. O material apresenta potencial de reatividade, geração de acidez, corrosividade e inclusive de toxicidade (Machado, 2013), o que enquadraria o material como perigoso. É muito provável que isso ocorra devido ao curto período de tempo dos ensaios de lixiviação e solubilização, que são feitos, respectivamente, em 1 dia e 1 semana. Assim, para o entendimento das questões cinéticas envolvidas na disposição dos rejeitos de carvão foram conduzidos estudos em células úmidas conforme o Método ASTM D-5744/96 (ASTM, 2007) por um período de 92 semanas.

4.4.3. Ensaios cinéticos em células úmidas

Na Figura 51 são apresentados os resultados dos ensaios cinéticos para o rejeito de carvão bruto e para a fração com densidade intermediária. Os resultados mostraram uma alta variabilidade, decorrente das várias interferências no processo de lixiviação (temperatura, atividade microbiana, sistema de percolação, etc). Essa variabilidade é considerada normal para ensaios em células úmidas (Sapsford et al., 2009; Lengke et al., 2010). Pode-se observar que a água lixiviada do rejeito do jigote bruto sempre apresentou valores de pH inferiores do que o material com densidade entre 2,2 e 2,7. Em relação ao potencial redox, foi verificado um comportamento bastante oxidante para ambos os materiais, favorecendo a degradação de sulfetos. As análises de metais e sulfatos no rejeito beneficiado também foram menores no decorrer das 92 semanas. O tempo de latência foi de cerca de 15 semanas para a amostra sem intervenção e de 20 semanas para a amostra com $2,2 < D < 2,7$. Na Figura 52 são apresentadas as cargas lixiviadas de sulfato, acidez e metais (Fe total, Al, Mn e Zn) em função do tempo (92 semanas) no ensaio nas células úmidas. Observa-se que a partir da semana 80 os parâmetros analisados tendem a estabilizar para as amostras com menos teor de enxofre enquanto que para o rejeito bruto, sem a intervenção proposta, o material continua a liberar acidez, sulfatos e metais.

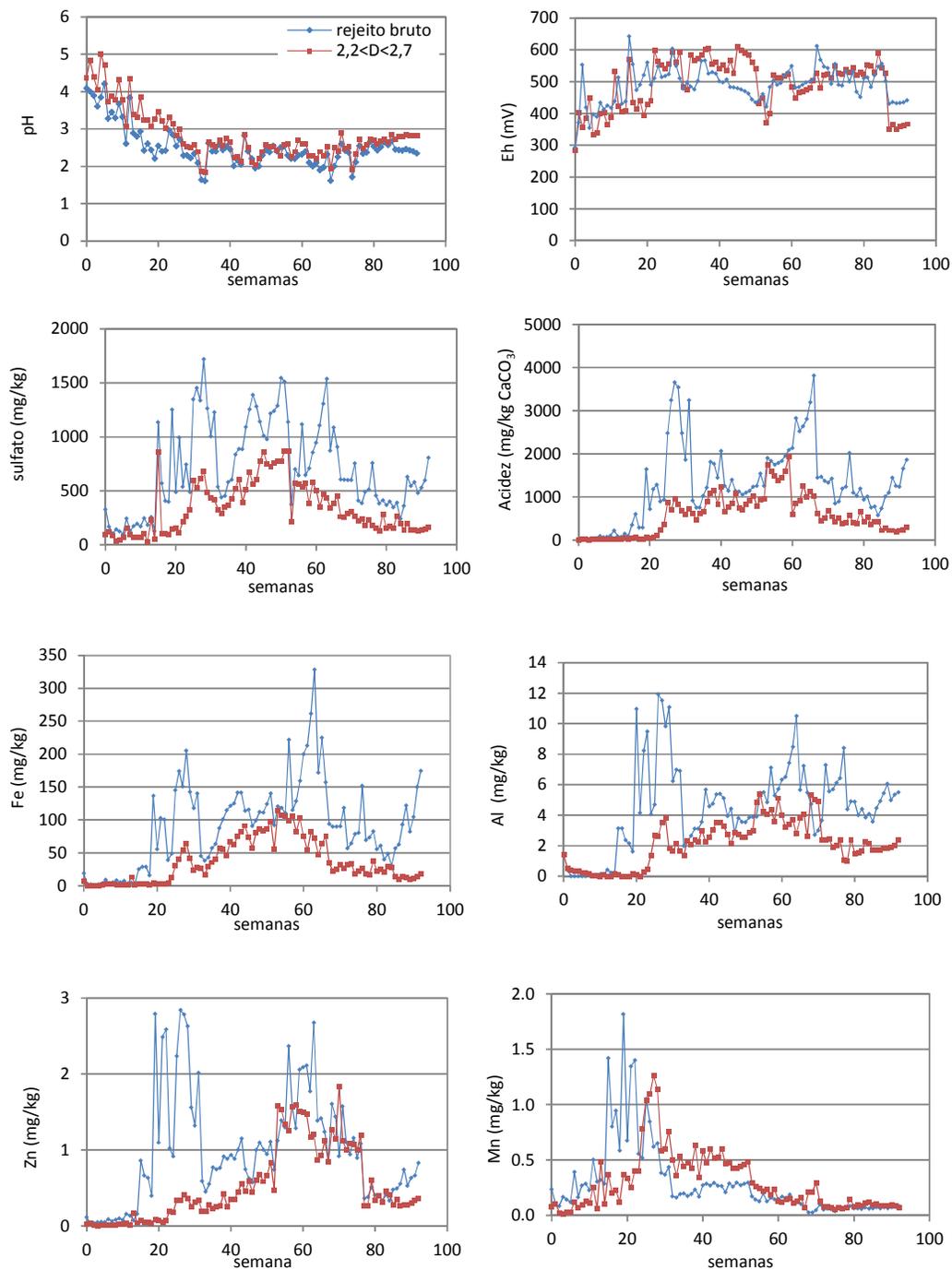


Figura 51 Qualidade da água lixiviada em termos de pH, Eh, sulfatos, acidez, metais (Fe total, Al, Mn e Zn) em função do tempo (92 semanas) no ensaio nas células úmidas.

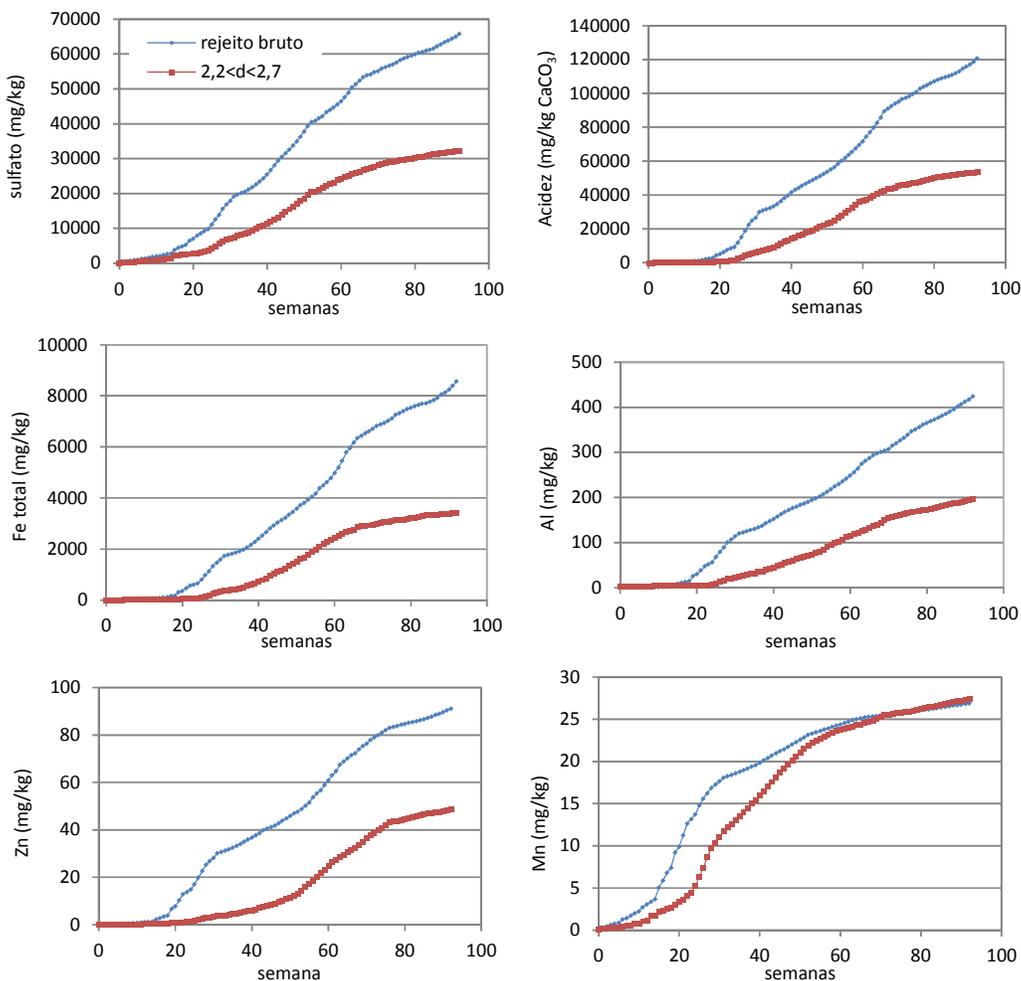


Figura 52 Carga lixiviada de sulfato, acidez e metais (Fe total, Al, Mn e Zn em função do tempo (92 semanas) no ensaio nas células úmidas.

Na Tabela 33 é apresentada uma comparação da carga total de metais, acidez e sulfato liberados em solução aquosa após 92 semanas de lixiviação. Observa-se que houve uma redução substancial na liberação de metais, acidez e sulfatos no rejeito pós-intervenção. A análise de acidez é possivelmente a que melhor expressa a demanda de agente alcalino necessária para neutralizar a acidez do sistema (dada pelo baixo pH e pela presença de metais hidrolisáveis). As curvas de acidez foram integradas, e os resultados mostram que, no período de 92 semanas, a acidez lixiviada pela fração com densidade intermediária liberou 45% da emitida pelo material original (redução de 55%).

Todavia, o principal benefício está relacionado ao tempo de emissão de acidez. De acordo com o balanço de massa do enxofre, durante o período de ensaio de 92 semanas, houve a remoção de 98% de S presente na célula que continha o material depirritizado. Em outras palavras, este período de tempo de 92 semanas (aproximadamente 1 ano e nove

meses), foi suficiente para que ocorresse praticamente toda a oxidação e lixiviação da pirita contida. Na célula contendo o rejeito bruto, 65% da pirita foi oxidada neste período,

Tabela 33 Comparação dos resultados das análises de lixiviado acumuladas do rejeito bruto (pré-intervenção) e fração intermediária (após remoção de sulfetos)

	Rejeito Bruto	2,2<D<2,7	Redução (%)
Fe (mg/kg)	8.595	3.434	60
Al (mg/kg)	424	196	54
Zn (mg/kg)	92	48	48
Mn (mg/kg)	27	27	0
Acidez(mg/kg CaCO ₃)	120.568	53.682	55
Sulfato (mg/kg)	65.746	32.289	51

A Tabela 34 complementa estes resultados, mostrando algumas análises realizadas no material após as 92 semanas de lixiviação. Houve uma redução na massa de amostras (de 12,0% no rejeito bruto e de 7,1% na fração 2,2<D<2,7). Observou-se também uma forte desagregação dos materiais, aumentando a quantidade de partículas finas e reduzindo a capacidade de escoamento do fluido através do meio. Ao final, o teor de enxofre pirítico no rejeito bruto foi medido em 2,2%, comprovando ainda uma presença significativa deste mineral. Na fração com 2,2<D<2,7, o teor de S pirítico foi medido em 0,1%, mostrando o esgotamento da pirita no meio.

Tabela 34 Características físicas e químicas do material antes e após 92 semanas de lixiviação

	Rejeito Bruto		2,2<D<2,7 g/cm ³	
	Semana 0	Semana 92	Semana 0	Semana 92
Amostra (g)	499,0	438,9	499,1	463,5
Retido em 2,0mm (g)	499,0	191,7	499,1	327,4
Passante em 2,0mm (g)	0,0	247,2	0,0	136,1
Enxofre total (%)	7,0	2,7	1,1	0,7
Enxofre pirítico (%)	6,3	2,2	0,7	0,1
Carbono total (%)	6,7	6,3	3,9	3,9
Cinzas (%)	82,7	82,9	88,3	86,4

A Figura 53 apresenta as relações Fe:S nos lixiviados das células úmidas. Pode-se observar que a relação apresenta-se abaixo da estequiometria da pirita, que seria 0,5. Este fato pode ser explicado pela alta solubilidade do sulfato e menor solubilidade do Fe³⁺. O sulfato, em quase toda a sua totalidade sai do sistema na água de lixiviação. O ferro, por sua vez, parte é adsorvido e parte é lixiviado. Pode-se observar, que com o passar do tempo, a relação Fe:S vai aumentando. Este mesmo comportamento foi observado por Sapsford et al., 2009. Por sua vez, no módulo de rejeitos, a relação Fe:SO₄²⁻ foi próxima a 0,5, o que poder ser explicado pelo predomínio do Fe na forma Fe²⁺, mais solúvel do que o Fe³⁺.

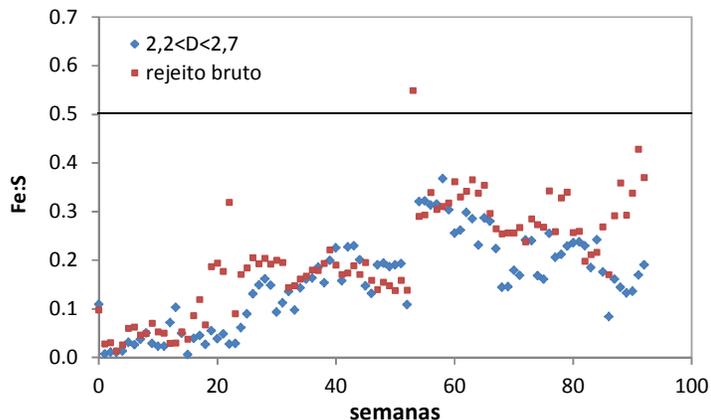


Figura 53 Relação Molar Fe:S nos lixiviados das células úmidas.

As taxas médias de oxidação da pirita, considerando as 92 semanas, nos ensaios em células úmidas foram calculadas como:

Rejeito Bruto

- g FeS_2 /($t_{\text{rejeito}} \cdot \text{dia}$) - 64
- g FeS_2 /($t_{\text{FeS}_2} \cdot \text{dia}$) - 2864

Fração 2,2<d<2,7

- g FeS_2 /($t_{\text{rejeito}} \cdot \text{dia}$) - 32
- g FeS_2 /($t_{\text{FeS}_2} \cdot \text{dia}$) - 1064

Pode-se verificar que estes valores são muito superiores aos obtidos no módulo, que foram calculados como em 0,45 g FeS_2 /($t_{\text{rejeito}} \cdot \text{dia}$) ou 4,15 g FeS_2 /($t_{\text{FeS}_2} \cdot \text{dia}$). Esta maior taxa de oxidação pode ser explicada pelos seguintes razões:

- nas células úmidas é propiciada uma condição oxidante, enquanto no módulo de rejeitos, pelas ações de adição de finos, compactação o ambiental é mais redutor;
- a razão água:massa de rejeitos nas células úmidas é de 4.500 L/ton.mês enquanto que no módulo a razão água:massa de rejeitos é de 5,5 L/ton.mês.
- o material nas células úmidas foi cominuído para granulometria entre 2 a 6 mm, o que proporciona um aumento da área superficial; no módulo, grande parte da pirita está na fração grosseira, com tamanho de partículas abaixo de 50 mm.

Por fim, observou-se também que existe uma correlação entre a temperatura média

do meio e a acidez liberada. A Figura 54 mostra a acidez liberada em função da temperatura média semanal e a Figura 55 mostra a acidez liberada em função da temperatura no dia da coleta. Ambos os gráficos mostram que os picos de acidez liberada no rejeito bruto coincidem com os períodos mais quentes (verão). Esse fato pode ser explicado pelo aumento da atividade das bactérias *A. ferrooxidans*, cuja temperatura ótima de crescimento é de 30°C (Lundgren *et al.*, 1972). A pequena defasagem do primeiro pico pode ser decorrente do parcial estabelecimento da população microbiana e aclimatação ao meio. O segundo pico de acidez liberada coincide muito bem com o período de maior temperatura. No caso do rejeito bruto, a taxa de oxidação da pirita foi de 70 g de $\text{FeS}_2/(\text{t}_{\text{rejeito}} \cdot \text{dia})$ no período de maio a setembro (semana 29 a 50) e de 90 g de $\text{FeS}_2/(\text{t}_{\text{rejeito}} \cdot \text{dia})$ no período de novembro a março (semana 56 a 76).

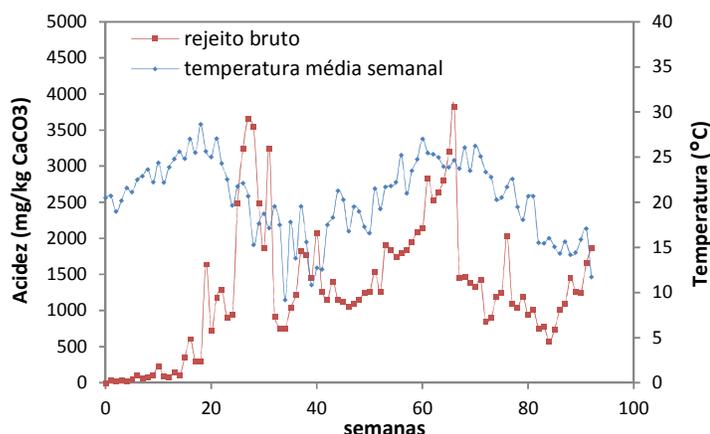


Figura 54 Acidez liberada do rejeito bruto em função da temperatura média semanal durante as 92 semanas monitoradas no ensaio cinético por células úmidas.

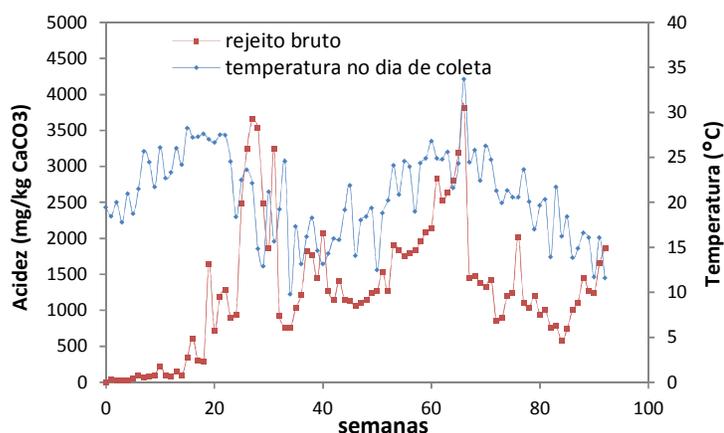


Figura 55 Acidez liberada do rejeito bruto em função da temperatura no dia de coleta durante as 92 semanas monitoradas no ensaio cinético por células úmidas.

4.4.4. Tratamento do efluente

No tratamento da DAM em laboratório, o consumo de Ca(OH)_2 para aumentar o pH (de aproximadamente 2 até 8,7) foi de $18,25 \text{ kg/m}^3$ para o rejeito bruto, e de $3,75 \text{ kg/m}^3$ para a fração com densidade intermediária, representando uma redução de cerca de 80% no consumo de agente neutralizante no tratamento de efluentes oriundos do depósito de rejeitos. Os valores obtidos nos testes de bancada estão de acordo com a redução de geração de acidez obtida nos testes cinéticos (Tabela 33). Os resultados das análises do efluente bruto e tratado das células contendo o rejeito original e o rejeito após a retirada dos sulfetos são apresentados na Tabela 35. Em ambos os tratamentos, os parâmetros analisados estão enquadrados nos limites de emissão da Resolução CONAMA 430/11.

Tabela 35 Características químicas dos efluentes tratados pelo neutralização/precipitação.

	Rejeito Bruto		2,2<D<2,7		CONAMA 430/11
	Efluente Bruto	Efluente Tratado	Efluente Bruto	Efluente Tratado	
Fe (mg/l)	325,1	0,6	94,2	0,8	15,0
Mn (mg/L)	1,5	0,3	2,3	0,1	1,0
Zn (mg/L)	5,6	<0,3	0,8	<0,3	5,0
Al (mg/L)	20,9	2,8	7,3	3,2	n/a
SO_4^{2-} (mg/L)	1397	869	574	425	n/a

n/a: não aplicável

4.5. Considerações técnicas e econômicas

A partir dos resultados anteriormente alcançados, algumas considerações técnicas e econômicas podem ser realizadas.

4.5.1. Custos no tratamento de efluentes

Para simular os custos envolvidos no tratamento de efluentes, foi utilizado como referência o módulo de rejeitos da Carbonífera Criciúma, que gera $20 \text{ m}^3/\text{h}$ de DAM. Ao final de um mês, a bacia de captação da ETE recebe 14.400 m^3 desta DAM. Na Tabela 36 são apresentados os custos relativos ao atual cenário e ao cenário projetado com a intervenção proposta, com exclusão da matéria carbonosa e da pirita (Figura 56).

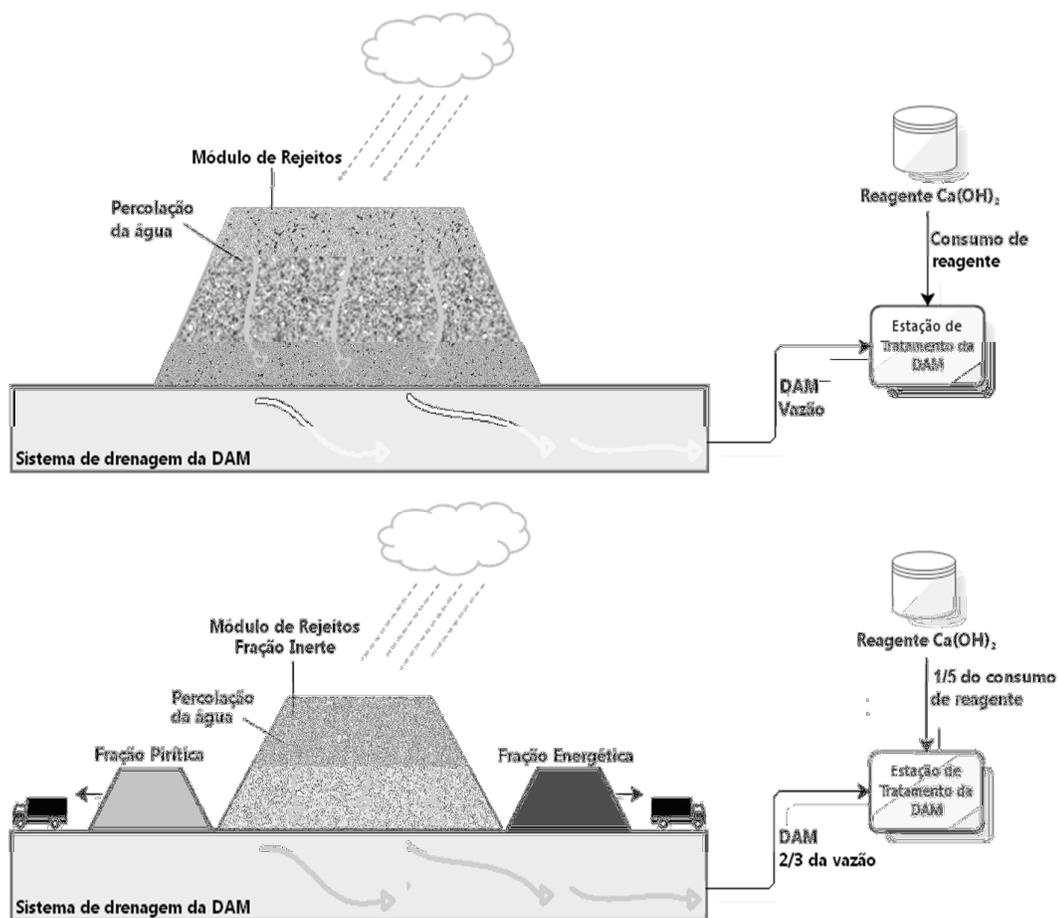


Figura 56 Sistema produtivo tradicional (acima) e sistema produtivo alternativo (abaixo) para recuperação de produtos (colaboração Jéssica Weiler).

Considerando uma redução de 1/3 no volume de rejeitos gerados e de 1/5 do consumo de agente alcalino, observa-se uma redução no custo mensal de aproximadamente 85% em relação ao gasto com reagentes. Cabe ressaltar, que 50% dos custos no tratamento de efluentes na região carbonífera de Santa Catarina é referente ao agente empregado no processo na correção do pH.

Tabela 36 Custo atual e projetado em reagente alcalino - $(\text{CaOH})_2$ - considerando a disposição exclusiva dos rejeitos com densidade entre 2,2 e 2,7.

	Atual	Projetado
Efluente gerado no modulo ($\text{m}^3/\text{mês}$)	14.400,00	9.600,00
Consumo de reagente (kg/m^3)	18,25	3,75
Preço cal hidratada (R\$/kg)	0,40	0,40
Consumo de reagentes ($\text{kg}/\text{mês}$)	262.800,00	36.000,00
Custo tratamento (R\$/mês)	105.120,00	14.400,00
Economia mensal (R\$)		90.720,00
Economia anual (R\$)		1.088.640,00

4.5.2. Pré-avaliação de investimentos em uma planta beneficiamento de rejeitos

Levando em consideração a média da produção de carvão ROM dos últimos 5 anos (conforme dados disponíveis em <http://www.carvaomineral.com.br>), somente na carbonífera Criciúma S.A., foram beneficiados 1.400.000 toneladas de carvão anualmente gerando 820.000 toneladas de rejeito e como atualmente não existe alternativas para a utilização deste material a empresa o envia para módulos ou depósitos rejeitos os quais geram DAM e seus já previamente discutidos impactos. Atualmente os produtos comercializados pela empresa são os carvões energéticos CE4300 e CE5000 que correspondem respectivamente a 91,1% e 0,5% do comercializado e o carvão metalúrgico correspondente a 8,4% da produção.

Realizou-se uma análise econômica simplificada de forma a avaliar o investimento em equipamentos para a separação das frações. O estudo foi efetuado considerando que um concentrado de pirita e um carvão energético serão produzidos com o beneficiamento dos rejeitos conforme esquema apresentado na Figura 57, já que, de acordo com o exposto anteriormente, as tecnologias para aproveitamento destas frações já existem e estão estabelecidas mundialmente. Já a fração intermediária, apesar de possuir resultados satisfatórios para sua utilização, envolve operações unitárias tais como britagem o que ocasionaria uma elevação significativa dos custos operacionais e os estudos desenvolvidos no Brasil para utilização desta fração ainda estão em fase inicial. Levando em consideração estes dados, será necessária uma planta de beneficiamento de rejeitos com capacidade de 60.000 ton/mês. Onde o processamento do material será realizado em dois estágios e em dois turnos, sendo um estágio de separação realizado por turno (por exemplo, no turno matutino será beneficiado o carvão energético e no turno vespertino será produzido o concentrado de pirita). A avaliação econômica foi realizada considerando uma planta em operação onde os rejeitos do circuito de grossos são encaminhados para uma planta de beneficiamento de carvão por meio denso previamente a disposição final no módulo e uma vida útil da mina de mais 10 anos. Os valores relacionados com a redução de custos na ETE não serão utilizados aqui pois a disposição do material com menor teor de enxofre não reduziria significativamente a concentração da DAM gerada a curto prazo.

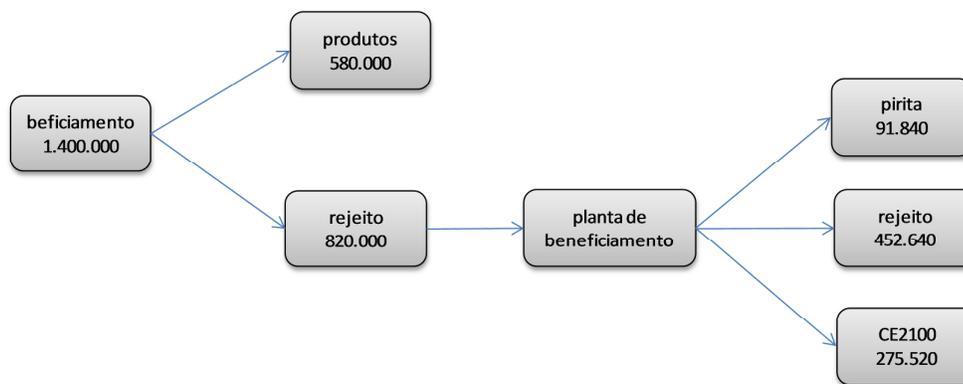


Figura 57 Balanço de massa, em toneladas, utilizado para a avaliação econômica

A Tabela 37 apresenta os custos de investimento para a instalação do equipamento de separação para o reaproveitamento dos rejeitos do beneficiamento de carvão. Estão listados na tabela os custos de aquisição dos equipamentos e serviços necessários à implantação de um novo sistema de separação.

Tabela 37 Investimentos necessários para implantação do projeto.

	Valor R\$
Projeto de Engenharia	250.000,00
Equipamentos	6.000.000,00
Licenciamento da Tecnologia	100.000,00
Obras Civis (mão de obra)	1.750.000,00
Total	8.100.000,00

Depois de realizado todo o estudo técnico para avaliar os custos de implementação da tecnologia, faz-se necessário a elaboração de um estudo econômico de forma a se estimar os custos de operação e manutenção dos equipamentos bem como do retorno econômico. Na Tabela 38 verifica-se as despesas mensais após a implementação do projeto e na Tabela 39 verifica-se as receitas mensais após a implementação do projeto.

Tabela 38 Despesas mensais da planta de beneficiamento de rejeitos.

Despesas	Total (R\$)
Mão de obra	20.000,00
Transporte	110.000,00
Manutenção	20.000,00
Insumos	50.000,00
Total mês	200.000,00

Tabela 39 Receitas mensais da planta de beneficiamento de rejeitos.

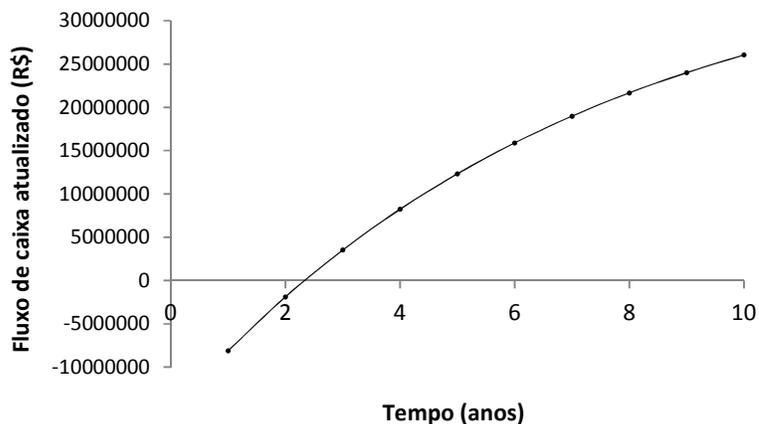
Receitas	Total (R\$)
Faturamento Pirita	105.000,00
Faturamento CE 2100	946.830,00
Receita Total	1.051.830,00

Na Tabela 40 verifica-se o resultado financeiro da receita total já descontada as despesas mensais após a implantação do projeto.

Tabela 40 Receita total da planta de beneficiamento de rejeitos.

	Total (R\$)
Receita mensal bruta	1.051.830,00
Despesa mensal bruta	200.0000,00
Lucro	851.830,00

A Figura 58 apresenta o tempo de retorno do investimento utilizando uma taxa de atualização de 6%, e 30% de impostos sobre a receita tributável. É observado que o investimento seria recuperado em pouco mais de 2 anos.

**Figura 58** Tempo de retorno do investimento (*payback*).

5. Barreiras, limitações e vantagens para reaproveitamento de rejeitos de carvão.

Esta tese se propôs a determinar se por meio de intervenções baseadas no desenvolvimento sustentável seria possível se obter uma abordagem viável técnica e economicamente para reduzir os impactos ambientais, particularmente aos envolvidos na disposição final de rejeitos, da indústria de mineração de carvão do estado de Santa Catarina. Os resultados do estudo caso demonstraram a existência e a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento de rejeitos em uma indústria local. Entretanto através de estudos específicos em cada uma das mineradoras, esta abordagem poderia ser expandida para toda a cadeia produtiva local.

Atualmente, no Brasil, a indústria mineral em geral não vem adotando práticas na intenção de utilizar seus rejeitos ou gerenciá-los de uma maneira sustentável. Isto ocorre muito provavelmente devido à existência de uma série de barreiras gerenciais, tecnológicas, econômicas e legislativas. Mesmo com os benefícios ambientais e econômicos gerados por abordagens focadas nos princípios do desenvolvimento sustentável, tais como, Produção mais Limpa, Prevenção da Poluição, *Eco-design* e Eco-eficiência, as tomadas de decisão no setor mineral e, especificamente, neste caso, no setor de extração e beneficiamento de carvão são tomadas baseadas no aspecto financeiro à curto prazo, limitando assim o orçamento para questões ambientais tanto para fechamento da mina quanto para novos empreendimentos.

Os investimentos em meio ambiente geralmente são limitados. A atual abordagem para tratamento e disposição final de rejeitos é a de fim-de-tubo, que busca o simples cumprimento de exigências legais. Entretanto, como demonstrado nesta tese e em inúmeros casos de estudo exemplificados na literatura internacional, uma estratégia preventiva pode trazer benefícios econômicos, ao invés de custos adicionais. Devido ao crescimento destas abordagens mais sustentáveis em outros setores industriais, tanto no cenário internacional quanto nacional, espera-se que os benefícios econômicos associados encorajem o setor carbonífero nacional.

A falta de consciência é por si mesma outra barreira a ser quebrada. Conceitos mais pró-ativos buscando a incorporação de práticas mais sustentáveis na indústria mineral não são incorporados no projeto e no processo de beneficiamento mineral e muito por falta de conhecimento dos técnicos responsáveis por estas operações em relação aos aspectos

econômicos e socioambientais relacionados às estratégias voltadas à redução e conservação de recursos. As barreiras tecnológicas e de infraestrutura são provavelmente a principal causa da não utilização de técnicas mais preventivas pela indústria. O poder público, apesar de exigir o cumprimento da legislação e solicitar a recuperação das áreas que foram degradadas não leva em consideração o potencial energético presente nas reservas de carvão nacional e seu potencial de geração termoelétrica e os aspectos relacionados com a co-geração térmica de energia pela mistura de rejeitos industriais, já que tecnologias de queima como leito fluidizado circulante e gaseificação são largamente conhecidas e aplicadas mundialmente. De uma maneira mais evidente, o tratamento da pirita como um rejeito de mineração que só onera a cadeia produtiva mostra a inoperância da gestão pública em relação às reservas de enxofre disponíveis no Brasil. Abreu (1943), já dizia que o aproveitamento da pirita brasileira só dependia do desenvolvimento de um mercado consumidor, já que os lucros com a extração de carvão aumentariam com a venda da pirita. Durante muito tempo a Indústria Carboquímica Catarinense processou concentrados piritosos na região para a fabricação de ácido sulfúrico. Entretanto, foi desativada e nunca cumpriu o papel socioambiental a que foi concebida.

Assim, para a estratégia apresentada nesta tese possa ser efetivamente implantada uma mudança cultural deve ocorrer tanto a nível empresarial quanto a nível governamental.

6. CONCLUSÕES

- O módulo de rejeitos estudado no presente trabalho (Módulo B da Mina do Verdinho da Carbonífera Criciúma S.A) possui 29 anos de operação, ocupa uma área de 625.600 m² e apresenta uma altura de 30 metros. A massa estimada de rejeitos depositada é de 14 milhões de toneladas e os teores médios de enxofre total e cinzas são de 5,8% e 77,5%, respectivamente.
- Com a DAM gerada no módulo B foram desperdiçados anualmente aproximadamente 3.710 toneladas de ácido sulfúrico, 1.350 toneladas de ferro, 181 toneladas de alumínio, 34 toneladas de manganês e 8 toneladas de zinco.
- No atual modelo de gestão de rejeitos de carvão, o módulo B de rejeitos levará 660 anos para cessar a geração de acidez, onerando a empresa com o tratamento ou gerenciamento adequado do módulo mesmo após o término das atividades de mineração no local.
- Aproximadamente 25% da massa de material encaminhada ao módulo de rejeitos são oriundas do circuito de finos e ultrafinos, os quais, juntos, apresentam 1,2% de enxofre total e aproximadamente 60% de cinzas. Os 75% restantes são referentes ao material grosso oriundo do jigue, com 81,2 % de cinzas e 5,6 % de enxofre. Estima-se que 90% do enxofre total no módulo são provenientes dos rejeitos grossos.
- O processo ideal para o rebeneficiamento dos rejeitos grossos de carvão é por meio denso de ferro-silício. Com o beneficiamento gravimétrico do material em dois estágios é possível recuperar material carbonoso para aproveitamento energético, uma massa de material rochoso com baixo teor de enxofre e um concentrado de pirita.
- Em relação ao aproveitamento do material com potencial energético, a fração fina possui um considerável poder calorífico (2.700 kcal/kg). Essa fração pode ser misturada com os grossos de densidade menor que 2,2 g/cm³, sendo possível obter um produto energético com poder calorífico de 2.100 kcal/kg.
- Outro produto é uma fração com alto teor de cinzas (90%) e baixo teor de enxofre (1,1%), que pode ser utilizada para a fabricação de solos e agregados para construção civil.

- No processo gravimétrico, é possível também obter uma fração com teores superiores a 70% de pirita, a qual apresenta qualidade suficiente para ser utilizada como matéria-prima para produção de ácido sulfúrico.
- De acordo com os testes estáticos de contabilização de ácidos e bases, com o isolamento de sulfetos pré-disposição final, é possível reduzir em até 90% o potencial de geração de acidez. Os resultados dos testes cinéticos por células úmidas mostraram que o rejeito dessulfurizado, assim como o bruto, geram acidez. Contudo, o rejeito dessulfurizado apresenta menor carga de acidez e metais bem como uma perspectiva de tempo de liberação de acidez menor.
- O manejo adequado dos resíduos gerados nesta etapa da cadeia produtiva do carvão mineral é determinante para o aproveitamento dos materiais, conservação dos recursos naturais e redução dos impactos ambientais.
- A dessulfurização dos rejeitos de carvão pode ser aplicada pelas indústrias carboníferas para controlar a geração de DAM e, concomitantemente, minimizar custos no tratamento de efluentes. A disposição final da fração após a recuperação dos sulfetos acarreta em uma redução de até 80% nos custos de tratamento da DAM.
- Com a operação de uma planta de queima avançada e o desenvolvimento de um mercado consumidor para a pirita é possível que as empresas mineradoras locais obtenham outras fontes de recursos financeiros, conservando ainda recursos naturais.
- O modelo de gestão apresentado somente é possível através da quebra de paradigmas e uma mudança cultural por parte das empresas locais e do poder público.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar técnicas de produção de pirita ultrapura (flotação, floto-elutriação) para a aplicação em outros setores que exijam esta especificação (células fotovoltaicas, filmes condutores);
- Estudo de avaliação do ciclo de vida para verificar o impacto desta abordagem em diversos níveis de abrangência;
- Estudos de gaseificação e combustão em leito fluidizado circulante da fração carbonosa com resíduos gerados em outras atividades industriais;
- Estudos para verificação da possibilidade de aplicação da metodologia apresentada em outras camadas de carvão.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10005**: Lixiviação de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004b.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10006**: Solubilização de resíduos: procedimento. Rio de Janeiro, 2004c.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8289**: Carvão mineral: Determinação do teor de cinzas: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8290**: Carvão mineral: Determinação do teor de materiais voláteis: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983b.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8293**: Carvão mineral: Determinação de umidade: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983c.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8299**: Carvão Mineral: Determinação do carbono fixo: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983d.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8738**: Carvão Mineral: Ensaios Densimétricos. Rio de Janeiro, 1985.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001.
- ABREU, A.P. **A recuperação da pirita de carvão nos Estados Unidos**. Rio de Janeiro: DNPM, 1943. Laboratório da Produção Mineral.
- AKCIL, A; KOLDAS, S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. **Journal of Cleaner Production**, v.14, n.12-13, p.1139-1145, 2006.
- AMARAL FILHO, J.R. **Avaliação Ambiental e do Potencial de Aproveitamento de um Módulo de Rejeitos de Carvão na Região Carbonífera de Santa Catarina**. 2009. 79p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF, 2002.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Ministério das Minas e Energia**. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>. Acesso em: 02 de Junho de 2014.
- APHA – American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington DC, 2005.

- ARAÚJO, A.C. Introdução. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAÚJO, A.C. (Org). **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007, cap. 1, p.8-45.
- ASTM – American Society for Testing and Material. **D-2492**: Standard Test Method for Forms of Sulfur in Coal. Philadelphia, 2007.
- ASTM – American Society for Testing and Material. **D5744-07**: Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Humidity Cell. Philadelphia, 2007.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. **D2015-91**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter. Philadelphia, 1991.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. **D5373-93**: Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke. Philadelphia, 2002.
- AUTY, R.M.; WARHURST, A. Sustainable development in mineral exporting economies. **Resources Policy**, v.19, n. 1, p.14-29, 1993.
- AUTY, R.M; MIKESELL, R.F. **Sustainable Development in Mineral Economies**. Oxford: Clarendon Press, 1998.
- AZAPAGIC, A. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. **Journal of Cleaner Production**, v.12, p.639-662, 2004.
- BENZAOUA, M. et al. Integrated mine tailings management by combining environmental desulfurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. **Minerals Engineering**, v. 21, p.330-340, 2008.
- BIAN, Z. et al. Environmental issues from coal mining and their solutions. **Mining Science and Technology**, v.20, p.215-223, 2010.
- BLOWES, D.W. et al. Mill Tailings: Hydrogeology and Geochemistry, In: JAMBOR, J.L.; BLOWES, D.W.; RITCHIE, A.I.M. (Eds.). **Environmental Aspects of Mine Wastes**: Short Course Series 31. Mineralogical Society of Canada, 2003.
- BLOWES, D.W. et al. The Geochemistry of Acid Mine Drainage. In: Lollar, B.S. (Ed.) **Environmental Geochemistry**. Vol 9 Treatise on Geochemistry (eds. HOLLAND, H.D.; TUREKIAN, K.K.), Elsevier-Pergamon, Oxford, 2005.
- BORMA, L.S.; SOARES, P.S.M. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. In: TRINDADE, B.E.; BARBOSA FILHO, O. (Eds) **Extração de Ouro – Princípios, tecnologia e meio ambiente**, CETEM, Rio de Janeiro, 2002.
- BRANDÃO, P.R.G. et al. Caracterização Mineralógica e Tecnológica. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAÚJO, A.C. (org.). **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: editora UFMG, 2007.
- BROADHURST, J.L. et al. Waste Characterization and Water-related Impact Predictions for Solid Mineral Wastes: A New Approach, Water Research Commission of South Africa. **Relatório N° 1550/1/07**, Cidade do Cabo, 2007.
- BROADHURST, J.L. **Generalised Strategy for Predicting Environmental Characteristics of Solid Mineral Wastes - A Focus on Copper**. 2007. 256p. Tese de Doutorado - Universidade da Cidade do Cabo, África do Sul, 2007.

- BROUGHTON, L.M.; ROBERTSON, A.M. Acid mine drainage from mines: where we are now. In: MINERALS, METALS AND THE ENVIRONMENT CONFERENCE. IMM, Manchester, UK. February 4-6, 1992.
- BROWN, D.S. Minerals and the environment in the 21st century. **Nonrenewable Resources**, v. 2, n. 3, p. 181-186, 1993.
- BRUYNESTEYN, A. HACKL, R.P. Evaluation of acid production potential of mining waste materials. **Minerals and the Environment**, v. 4, n. 1, p.5-8, 1984.
- BRYAN, C.G. **A study of the microbiological populations of mine wastes**. 2006. Tese de Doutorado, Escola de Ciências Biológicas, Universidade do País de Gales, 2006.
- BRYAN, C.G. et al. Mobilisation of metals in mineral tailings at the abandoned São Domingos copper mine (Portugal) by indigenous acidophilic bacteria. **Hydrometallurgy**, v. 83, p. 184-194, 2006.
- CANIBAÑO, J.G. Latest Developments in the Utilization of Coal Mining Wastes. **Coal Science and Technology**, v.24, p. 1629-1632, 1995.
- CASSEMIRO, E. et al. O passivo ambiental da região carbonífera do sul de Santa Catarina. In: XXIV ENCONTRO NAC. DE ENG. DE PRODUÇÃO – ENEGEP, Florianópolis, SC, Brasil, 2004, p. 5257-5263.
- CHAVES, A.P. RUIZ, A.S. Considerations on the Kinetics of Froth Flotation of Ultrafine Coal Contained in Tailings. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 29, n. 6, p. 289-297, 2009.
- CHIKKATUR, A.P. et al. Sustainable development of the Indian coal sector. **Energy**, v. 34, p. 942-953, 2009.
- CHOWDHURY, R. et al. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, p. 250-255, 2010.
- COASTECH RESEARCH. **Acid Rock Drainage Prediction Manual**. Energy Mines and Resources, Canada, MEND Project Report 1.16.1b. Disponível em: <<http://www.mend-nedem.org>>, 1991. Acesso em: junho de 2014.
- DAHLSTROM, K.; EKINS, P. Eco-efficiency trends in the UK steel and aluminium industries. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 171-188, 2005.
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral **Economia Mineral do Brasil**. Brasília, DF, 2009.
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=3165>>. Acesso em: Julho de 2014.
- DRIUSSI, C.; JANSZ, J. Technological options for waste minimization in the mining industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 8, p. 682-688, 2006.
- ENGLERT, A.H.; RUBIO, J. Beneficiation of pyrite-rich tailings from coal jig processing by aqueous elutriation. In: PROCEMIN2011 - 8TH INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING SEMINAR. Santiago, 2011. p. 418-426.

- EPA – United States Environmental Protection Agency **EPA/600/R-06/060**: Life Cycle Assessment: principles and practice. Washington DC, 2006.
- EPA – United States Environmental Protection Agency. **Abandoned mine site characterization and cleanup handbook**. Washington DC, 2000. Disponível em: <<http://water.epa.gov>>. acesso em Junho 2014.
- EPA – United States Environmental Protection Agency. **Acid mine drainage prediction**. Washington DC, 1994. Disponível em: <<http://water.epa.gov>>. acesso em: junho de 2014.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2013.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2012.
- FAÉ GOMES, G.M. et al. Aspects for a cleaner production approach for coal and biomass use as a decentralized energy source in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 85-95, 2013.
- FAN, G. et al. Reduction and utilization of coal mine waste rock in China: A case study in Tiefs coalfield. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 24-33, 2014.
- FARIAS, C.E.G. Mineração e Meio Ambiente no Brasil. **Relatório para CGEE-PNUD**. 2002. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf>. acesso em: Maio de 2014.
- FÉRIS, L.A. **Aproveitamento de subprodutos do beneficiamento de carvão mineral na remoção de poluentes por sorção-flotação FAD**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- FIRPO, B.A. et al. Fabricated Soil Using Coal Mine Waste. In: ANNUAL INTERNATIONAL MINE WATER ASSOCIATION CONFERENCE - RELIABLE MINE WATER TECHNOLOGY. Reliable Mine Water Technology. 2013. Proceeding. Denver: Publication Printers, 2013, v. 2, p.977-983.
- FRANKS, D.M. et al. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. **Resources Policy**, v. 36, p. 114-122, 2012.
- FREEMAN, H. et al. Industrial pollution prevention: a critical review. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 42, n. 5, p. 618-656, 1992.
- GALERY, R. et al. Fragmentação. In: Valadão GES & Araújo AC (org.) **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: editora UFMG, 2007, p. 38-59.
- GARCIA, C. et al. Pyrite behaviour in a tailings pond. **Hydrometallurgy**, v. 76, p. 25-36, 2005.
- GHOSE, M.K. Promoting cleaner production in the Indian small-scale mining industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, p.167-174, 2003.
- GIURCO, D.P. et al. The role of LCA in performance assessment in minerals processing – a copper case study. In: SINGHAL R; MEHROTRA A (eds.) **Environmental issues and management of waste in energy and mineral production**. Rotterdam, p.267-73, 2000.
- GLAVIC, P. LUKMAN, R. Review of sustainability terms and their definitions. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 1875-1885, 2007.

- GOES, M.A.C. **Amostragem de minérios**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Rio de Janeiro, 1991.
- GOMES, C.J.B. et al. The Environmental Impact of Coal Mining: A Case Study in Brazil's Sangão Watershed. **Mine Water and the Environment**, v. 30, n. 3, p.159-168, 2011.
- GONZÁLEZ, D.G.B. et al. Flotação de Lodos do Beneficiamento de Carvão para Recuperação de Matéria Carbonosa. ANAIS DO IV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, Gramado, 2013, p.151-157.
- GOULD, W.D.; KAPOOR, A. The microbiology of acid mine drainage. In: JAMBOR J.L.; BLOWES D.W.; RITCHIE A.I.M. (eds.). **Environmental Aspects of Mine Wastes: Short Course Series 31**, Mineralogical Society of Canada, 2003, p. 203-226.
- GROSSMANN, I.E. Challenges in the new millennium: Product discovery and design, enterprise and supply chain optimisation, global life cycle assessment. **Computers and Chemical Engineering**, v. 29, p. 29-39, 2004.
- GUINÉE, J.B. et al. **Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NL), 1972.
- GUMA, M. et al. A Systems Approach for the Application of Eco-Efficiency Indicators for Process Design in the Minerals Industry. In: SDIMI CONFERENCE GOLD COAST, QLD, 6 - 8 July 2009, pp.301-312.
- HAIBIN, L.; ZHENLING, L. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, p. 1331-1340, 2010.
- HANSEN, Y. **Environmental Impact Assessment of Solid Waste Management in the Primary Industries- A New Approach**. 2004. Tese de doutorado. Universidade de Sydney, Australia.
- HESKETH, A.H. An integrated approach to AMD mitigation through sulfide removal from tailings. 2010. 99 p. Dissertação de Mestrado, Universidade da Cidade do Cabo, África do Sul, 2010.
- HESKETH, A.H. et al. (2010a) Biokinetic test for the characterisation of AMD generation potential of sulfide mineral wastes. **Journal of Hydrometallurgy**, v. 104, v.3-4, p.459-464, 2010a.
- HESKETH, A.H. et al. Mitigating the generation of acid mine drainage from copper sulphide tailings impoundments in perpetuity: A case study for an integrated management strategy. **Minerals Engineering**, v. 23, p. 225-229, 2010b.
- HILSON, G. Barriers to implementing cleaner technologies and cleaner production (CP) practices in the mining industry: a case study of the Americas. **Minerals Engineering**, v.13, n. 7, p. 699-717, 2000.
- HILSON, G. Defining “Cleaner Production” and “Pollution Prevention” in the mining context. **Minerals Engineering**, v. 16, p. 305-321, 2003.
- HOFFMANN, B.S. et al. An evaluation of the techno-economic potential of co-firing coal with woody biomass in thermal power plants in the south of Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 45, p. 295-302, 2012.

- HORNBERGER, R.J.; BRADY, K.B.C. Kinetic (Leaching) Tests for the Prediction of Mine Drainage Quality. In: BRADY, K.B.C; SMITH, M.W; SCHUECK, J (eds). **Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania**. Department of Environmental Protection, Pennsylvania, 1998.
- HORSFALL, D.W. **Coal preparation for plant operators**. Cape and Transvaal Printers Ltd, Cape Town, 1980.
- HUPPES, G. ISHIKAWA, M. A framework for quantified ecoefficiency analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 25-41, 2005.
- ICME – International Council on Metals and the Environment **Eco-efficiency and materials**: Foundation paper. Ottawa, 2001.
- INAP – International Network for Acid Prevention. **Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)**, 2005. Disponível em: <<http://www.gardguide.com/>>. Acesso em: maio de 2014.
- International Classification of in-Seam Coals Economic Commission for Europe, Committee on Sustainable Energy, United Nations, Geneva, 1998.
- ISO - International Organization for Standardization **ISO 157**: Hard coal: determination of forms of sulfur. Genebra, 1996.
- ISO - International Organization for Standardization. **ISO 7404/5**: Methods for the Petrographic Analysis of Bituminous Coal and Anthracite: Part 5: Method of Determining Microscopically the Reflectance of Vitrinite. Genebra, 1984.
- JOHNSON, D.B.; HALLBERG, K.B. Acid mine drainage remediation options: a review. **Science of the Total Environment**, v. 338, n. 1-2, p. 3-14, 2005.
- JOHNSON, J.; MURRAY, G. Managing Sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage. In: **Best Practice Environmental Management in Mining**. Environment Australia, Federal Department of the Environment, Sports and Territories, Australia, 1997.
- KALKREUTH, W. et al. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. **International Journal of Coal Geology**, v. 84, p. 213-236, 2010.
- KAZADI MBAMBA, C. et al. Mitigating acid rock drainage risks while recovering low-sulfur coal from ultrafine colliery wastes using froth flotation. **Minerals Engineering**, v. 29, p. 13-21, 2012.
- KESTERING, D.A. et al. Modelagem e Simulação da Fluidodinâmica Computacional da Gasificação do Carvão Mineral Brasileiro em um Reator de Leito Fluidizado Circulante. In: ANAIS DO IV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, Gramado, Rio Grande do Sul, 2013, p.410-423.
- KINUTHIA, J. et al. Sustainable Medium-Strength Concrete (Cs-Concrete) from Colliery Spoil in South Wales Uk. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 15, n. 2, p. 149-157, 2009.
- KOMNITSAS, K. et al. Environmental Impacts at Coal Waste Disposal Sites - Efficiency of Desulfurization Technologies. **Global Nest: The International Journal**, v. 3, n. 2, p. 109-116, 2001.

- KONTOPOULOS, A. Acid mine drainage control. In: CASTRO, S.H.; VERGARA, F.; SÁNCHEZ, M.A. (Eds) **Effluent treatment in the mining industry**. University of Concepción, p.57-118, 1998.
- KORTELAINEEN, M. KUOSMANEN, T. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v.9, n. 4, p. 59-72, 2005.
- KRISHNAN, R.P. et al. Combustion of high ash Indian coals in a fluidized bed combustor. **Fuel**, v. 70, n. 10, [p. 1125-1135](#), 1991.
- LAPAKKO, K. Evaluation of Tests for Predicting Mine Waste Drainage pH. Draft report to the Western Governors' Association, 1992.
- LAWRENCE, R.W. et al. Strategies for the prediction of acid mine drainage. In: 13TH ANNUAL BRITISH COLUMBIA MINE RECLAMATION SYMPOSIUM. 1989. Vernon, BC, Canadá.
- LAWRENCE, R.W.; SCHESKE, M. A method to calculate the neutralization potential for mining wastes. **Environmental Geology**, v.32, n. 2, p. 100-106, 1997.
- LEFEBVRE, R. et al. Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage, 1: Conceptual model and system characterization. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 52, p. 137-164, 2001.
- LEMESHEV, V.G. et al. Utilization of Coal-Mining Waste in the Production of Building Ceramic Materials. **Glass and Ceramics**, v. 61, p. 308-311, 2004.
- LEONARD, J.W. et al. **Coal Preparation**. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., Nova York, EUA, 1979.
- LI, X.G. et al. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. **Thermochimica Acta**, v. 441, p. 79-83, 2006.
- LI, X.G. et al. Thermogravimetric investigation on co-combustion characteristics of tobacco residue and high-ash anthracite coal. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 9783-9787, 2011.
- LONGWELL, J.P. et al. Coal: Energy for the Future. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 21, p. 269-360, 1995.
- MACHADO, L.A. **Controle da Geração da Drenagem Ácida da Mineração de Carvão pelo Método de Aditivos Alcalinos com Escória de Aciaria Elétrica**. 2013. 187 p. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.
- MACHADO, L.A. **Ensaio Estáticos e Cinéticos para a Prevenção da Geração de Drenagem Ácida de Minas na Mineração de Carvão com Cinzas de Termoelétrica e Escória de Aciaria**. 2007. 99 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- MADEIRA, V. S. **Aproveitamento de Resíduos da Mineração de Carvão para a Fabricação de Produtos com Elevado Valor Agregado**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.
- MAJUMDER, A.K.; BARNWALL, J.P. Development of a new coal washability index. **Minerals Engineering**, v. 17, p. 96-96, 2004.

- MALULEKE, W.J. **An Experimental Investigation of Leachate Generation Predictions of Waste from Copper Sulphide Ore Processing**. 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade da Cidade do Cabo, 2006.
- MCLELLAN, B.C. et al. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – Review and analysis of current approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 1414-1425, 2009.
- MIKESSELL, R. Sustainable development and mineral resources. **Resources Policy**, v. 20, p. 83-86, 1994.
- MILHELICIC, J. et al. Sustainability science and engineering: The emergence of a new metadiscipline. **Environmental Science and Technology**, v. 37, p. 5314-5324, 2003.
- MILLER, B.G. **Coal Energy Systems**. Elsevier Academic Press, Estados Unidos, 2005.
- MME – Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030)**. Brasília, DF, 2011.
- MONTEIRO, K.V. **Carvão: O Combustível de Ontem**. Núcleo Amigos da Terra, Porto Alegre, 2004.
- MUNIZ, A.R.C. et al. Gaseificação do Carvão de Candiota – RS em Leito de Arraste. In: ANAIS DO IV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, Gramado, Rio Grande do Sul, 2013, p.470-480.
- MUTHURAMAN, M. et al. A comparative study on co-combustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash Indian coal: A thermogravimetric analysis. **Fuel Processing Technology**, v. 91, p. 550-558, 2010.
- NAPIER-MUNN, T. et al. Managing ARD Potential through Mine Planning and Mineral Processing Practice. In: SIXTH AUSTRALIAN WORKSHOP ON ACID AND METALLIFEROUS DRAINAGE, Burnie, Tasmania, 2008.
- NASCIMENTO, F.M.F. et al. **Impactos ambientais nos recursos hídricos da exploração de carvão em Santa Catarina**. CETEM, Rio de Janeiro, 2002.
- NIETO, J.M. et al. 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.
- NIEUWLAAR, E. et al. Supply curves for eco-efficient environmental improvements using different weighting methods. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 85-96, 2005.
- NIXON, P.J. GARTNER, E.M. An assessment of processes for the manufacture of synthetic aggregates from colliery spoil. **The International Journal of Lightweight Concrete**, v. 2, n. 3, p. 141-164, 1980.
- NORDSTROM, D.K.; ALPERS, C.N. Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund site, California. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, v. 96, p. 3455-3462, 1999.
- NRC – National Research Council. **Sustainable development and minerals and metals**. Minerals Strategy Branch, Minerals and Metals Sector, Natural Resources. Ottawa, 1995.

- PACHECO, E.T. **Estudo a seco do carvão da Mina de Candiota – RS**. 2008. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- PARKER, G.K.; ROBERTSON, A. Acid Drainage, AMEEF Occasional paper no. 11, **Australian Minerals and Energy Environment Foundation**, Melbourne, pp. 101-117, 1999.
- PASTORE, E.L.; MIOTO, J.A. Impactos Ambientais em Mineração com Ênfase à Drenagem Ácida e Transporte de Contaminantes. **Solos e Rochas**, v. 23, n. 1, p. 33-53, 2000.
- PEREIRA NETO, J. **Perda do Poder Calorífico do Carvão de Candiota Durante Estocagem em Pilhas**. 1990. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre.
- PERES, A.E.C. et al. Métodos de Concentração. In: VALADÃO G.E.S ; ARAÚJO A.C (org.) **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: editora UFMG, cap.6, p.105-140, 2007.
- POMPEO, A.A. et al. Depiritização de rejeitos da jigagem de carvão mineral (SC) por elutriação aquosa e flotação com microbolhas. In: XXV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA & VIII MEETING OF THE SOUTHERN HEMISPHERE ON MINERAL TECHNOLOGY, Goiânia, 2013..
- POSSA, M.V.; LUZ, A.B. **Amostragem para beneficiamento mineral**. Centro de Tecnologia Mineral: Rio de Janeiro, 1984.
- PRICE, W.A. et al. Guidelines for the prediction of acid rock drainage and metal leaching for mines in British Columbia: Part II Recommended procedures for static and kinetic testing. 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE, Vancouver, British Columbia, 1997, p. 15-30.
- REDDICK, J.F. et al. Cleaner production in the South African coal mining and processing industry: A case study investigation. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 28, n. 4, p. 224-236, 2008.
- REID, C. et al. Life cycle assessment of mine tailings management in Canada. **Journal of Cleaner Production**, v.17, p. 471-479, 2009.
- RUBIO, J. **Carvão Mineral Caracterização e Beneficiamento**. Porto Alegre: Nova Linha Artes Gráficas, 1988.
- RÜDENAUER, I. et al. Integrated environmental and economic assessment of products and processes: A method for eco-efficiency analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 102-116, 2005.
- RUIZ, A.S. CHAVES, A.P. Flotação do carvão contido em um rejeito carbonoso. **Revista da Escola de Minas - REM**, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 315-322, 2009.
- RUNKEL, M.; STURM, P. Pyrite roasting, an alternative to sulphur burning. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 109, p. 491-496, 2009.
- SALAMA, A.I.A. Coal washability characteristics index utilizing the M-curve and the CM-curve. **International Journal of Mineral Processing**, v.55, p. 139-152, 1998.
- SALING, P. et al. Eco-efficiency analysis by BASF: The method. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.7, n. 4, p. 203-218, 2002.

- SAMPAIO, C.H. **Caracterização para o beneficiamento do carvão candiota**. 1983. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 1983.
- SANTOS, C.R. et al. Use of Coal Waste as Fine Aggregates in Concrete Paving Blocks. **Geomaterials**, v. 03, p. 54-59, 2013.
- SANTOS, R. et al. Spontaneous Vegetation on Overburden Piles in the Coal Basin of Santa Catarina, Brazil. **Restoration Ecology**, v. 16, n. 3, p. 444–452, 2008.
- SAPSFORD, D.J. et al. Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage. **Minerals Engineering**, v. 22, p. 25-36, 2009.
- SAVITZ, A.W. **The triple bottom line: how today's best-run companies are achieving economic, social, and environmental success – and how you can too**. John Wiley & Sons, Inc. USA, 2006.
- SCHNEIDER, C.H. **Caracterização do Impacto Ambiental e Tratamento da Drenagem de Minas com Resíduos Alcalinos na Mineração de Carvão de Santa Catarina: Mina Um Il Verdinho, Criciúma**. 2006. 133 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.
- SIECESC – Sindicato Das Indústrias Extratoras de Carvão do Estado de Santa Catarina. **Dados estatísticos**, 2014. Disponível em: <<http://www.satc.edu.br/siecesc/estatistica.asp>>. Acesso em: junho de 2014
- SILVA, R.D.R.; RUBIO, J. Treatment of acid mine drainage (AMD) from coal mines in south Brazil. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 29, p. 192-202, 2009.
- SILVEIRA, A.N. et al. Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil. Comparative active processes and water reuse. **International Journal of Mineral Processing**, v. 93, n. 2, p. 103-109, 2009.
- SKOUSEN, J. et al. **A Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage**. Morgantown: National Mine Land Reclamation Center at West Virginia University, 1998.
- SMART, R. et al. **ARD Test Handbook**. AMIRA International: Melbourne, 2002.
- SOARES, A.B. et al. Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil. I: Materials Characterization and Numerical Modeling. **Mine Water and Environment**, v. 28, n. 3, p. 219-231, 2009.
- SOARES, P.S.M.; TRINDADE, R.B.E. Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas: Uma Experiência de Gestão. In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA. Recife, Pernambuco, 2002.
- SOBEK, A.A. et al. **Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils**. US EPA, 1978.
- SOUZA, M.R.R. **Estudo da Qualidade da Água Percolada em Rejeito de Carvão com Diferentes Tipos de Cobertura Seca**. 2012. 79 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2012.

- STEWART, M. **The application of life cycle assessment to mining, minerals and metals.** Report of the MMSD workshop on life cycle assessment, Nova Iorque, 2001.
- STEWART, M.; PETRIE, J. A process systems approach to life cycle inventories for minerals: South African and Australian case studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, p. 1042-1056, 2006.
- STEWART, W.A. et al. Advances in Acid Rock Drainage (ARD) Characterisation of Mine Wastes. 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE. ICARD, 2006, p. 2098-2119.
- TAGGART, A.F. **Handbook of Mineral Dressing.** New York: John Wiley & Sons, 1945.
- TAULBEE, D.N. et al. Density gradient centrifugation separation and characterization of macerals groups from a mixed maceral bituminous coal. **Energy & Fuels**, v. 3, p. 662-670, 1989.
- TAVARES, L.M.M.; SAMPAIO, C.H. **Beneficiamento Gravimétrico.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- TILTON, J. Exhaustible resources and sustainable development. **Resources Policy**, v. 23, n. 1-2, p. 91-97, 1996.
- TRAN, A.B. et al. Geochemical and Mineralogical Characterisation of Two Contrasting Waste Rock Dumps — The INAP Waste Rock Dump Characterisation Project. In: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE (ICARD), Cairns, Australia, 2003.
- UNEP – United Nations Environmental Program. **Government Strategies and Policies for Cleaner Production.** UNEP Industry and Environmen. Paris, 1994.
- VAN BERKEL, R. Eco-efficiency in primary metals production: Context, perspectives and methods. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 51, p. 511-540, 2007b.
- VAN BERKEL, R. Eco-efficiency in the Australian minerals sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 772-781, 2007a.
- VAN BERKEL, R. NARAYANASWAMY, V. Eco-efficiency for design and operation of mineral processing plants. In: CHEMICAL ENGINEERING CONFERENCE IN AUSTRALIA, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne, Austrália, 2005.
- VAN BERKEL, R. The Sustainable Development Challenge for Technology: Will It Work in Time? In: CONFERENCE AUSTRALIA AT THE CROSSROADS, SCENARIOS AND STRATEGIES FOR THE FUTURE, Perth, Australia, 2000.
- VAN WEENEN, J.C. **Waste Prevention: Theory and Practice.** Castricum Publishers, Delft, The Netherlands, 1990.
- VAZ, P.A.B. Reparação do dano ambiental – caso concreto: mineração em Santa Catarina e o meio ambiente. **Revista CEJ**, Brasília, v. 22, p. 42-48, 2003.
- VILLNEUVE, M., et al. Assessment of interpretation methods for kinetic tests performed on tailings having a low acid generating potential. In: SECURING THE FUTURE AND 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE (ICARD), June 22-26, 2009, Skellefteå, Suécia.

- WARD, C.R. Analysis and significance of mineral matter in coal seams. **International Journal of Coal Geology**, v. 50, n. 1-4, p. 135-168, 2002.
- WARHURST, A.; NORONHA, L. Integrated Environmental Management Through Planning for Closure from the Outset: The Challenges. In: WARHURST, A. NORONHA, L. (Eds.), **Environmental Policy in Mining: Corporate Strategy and Planning for Closure**. CRC Press, UK, 2000.
- WBCSD – World Business Council for Sustainable Development. **Eco-efficiency: Creating more value with less impact**, report. Geneva, 2000.
- WCED – World Council for the Environmental Development. **Our Common Future**. World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- WCI – World Coal Institute. **The coal resource: a comprehensive overview of coal**, Londres, 2005.
- WILLS, B.A. **Mineral Processing Technology**. Butterworth-Heinemann, 1997.
- WILLS, B.A.; NAPIER-MUNN, T. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. Butterworth-Heinemann, 2006.
- WU, A. et al. Study on preferential flow in dump leaching of low-grade ores. **Hydrometallurgy**, v. 87, p. 124–132, 2007.
- YOON, R.H. et al. **Advanced systems for producing superclean coal**. Virginia Center for Coal and Minerals Processing, Blacksburg, VA (USA), Technical Report, 1990.