

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**TECNOLOGIAS MAIS LIMPAS NA MINERAÇÃO DE CARVÃO:  
MINIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS  
PELO MÉTODO DE ISOLAMENTO DE SULFETOS**

Jéssica Weiler

Porto Alegre

Dezembro de 2014.

**JÉSSICA WEILER**

**TECNOLOGIAS MAIS LIMPAS NA MINERAÇÃO DE CARVÃO: PREVENÇÃO  
DA GERAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS PELO MÉTODO DE  
ISOLAMENTO DE SULFETOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO  
APRESENTADO AO CURSO DE  
ENGENHARIA AMBIENTAL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO  
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Ivo André Homrich Schneider

Co-orientador: Juarez Ramos do Amaral Filho

Porto Alegre

Dezembro de 2014.

JÉSSICA WEILER

TECNOLOGIAS MAIS LIMPAS NA MINERAÇÃO DE CARVÃO: PREVENÇÃO DA  
GERAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS PELO MÉTODO DE ISOLAMENTO  
DE SULFETOS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul defendido e aprovado em / / pela comissão avaliadora  
constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider - Orientador

.....  
M.Sc. Beatriz Alicia Firpo Vasquez – UFRGS

.....  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Andrea Moura Bernardes

Conceito:.....

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela saúde, proteção e força para todas as mudanças de cunho pessoal que me tornaram uma pessoa mais tranquila e paciente ao longo desta jornada.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e seu corpo docente, por oportunizar a graduação em Engenharia Ambiental, pela infraestrutura e recursos disponibilizados.

Ao orientador Ivo Schneider e coorientador Juarez Amaral, pela realização deste trabalho e participação na minha Iniciação Científica, pelo tempo disponível, dedicação, palavras de incentivo e compartilhamento da sabedoria.

A minha família: a minha mãe, pelo amor, carinho, admiração, aos imensos esforços para que nada me faltasse e ao incentivo em todos os momentos da minha vida; ao meu pai, pelas palavras sábias e muitas vezes duras, que foram fundamentais para minha educação e pelo apoio em todas minhas decisões; e a minha irmã, Aline, pelo companheirismo e convivência durante a faculdade e por compreender minha ausência nos longos períodos de estudos.

A todas as pessoas especiais que cruzaram o meu caminho, pois são elas que fazem tudo valer a pena e que dão sentido à minha vida.

Aos amigos e amigas que tornam meus dias mais alegres, me trazem paz e me acalmam nos momentos difíceis.

Aos meus cachorros Teffi, Bob e Loop, pelo carinho, amor incondicional e a todos os momentos de descontração que me proporcionam.

## RESUMO

Os resíduos sólidos estão associados a todo processo produtivo e necessitam de gestão adequada para sua redução, tratamento e disposição final. O beneficiamento de carvão para a utilização em termoelétricas gera grandes quantidades de rejeitos contendo diversos minerais, entre eles a pirita (sulfeto de ferro -  $\text{FeS}_2$ ). A pirita, na presença de água e oxigênio se oxida e gera a drenagem ácida de minas (DAM), principal fonte de contaminação dos aquíferos e do solo na região carbonífera de Santa Catarina. Atualmente, a DAM é tratada pelo método de neutralização/precipitação de metais. Essa é uma técnica considerada de “fim-de-tubo”, com desvantagens econômicas e ambientais. Entretanto, com a aplicação de técnicas preventivas, baseadas nos princípios da produção mais limpa, é possível minimizar a geração de DAM e agregar valor à parte ou totalidade dos rejeitos de carvão. Assim, este trabalho teve como objetivo a minimização da geração da DAM através do método de isolamento de sulfetos. Neste estudo, os rejeitos foram processados para a remoção da pirita, eliminando a fonte geradora de acidez previamente a sua disposição final. A metodologia do trabalho consistiu na coleta de uma amostra típica de rejeito de carvão da Camada Barro Branco, Santa Catarina. A separação gravimétrica do rejeito foi realizada por meio denso de Fe-Si, obtendo-se frações nas seguintes densidades relativas: inferior a 2,2, entre 2,2 e 2,7 e superior a 2,7. Cada fração densimétrica e o rejeito bruto foram submetidos a análises imediata e elementar. Análises de FRX, ensaios estáticos e ensaios cinéticos foram conduzidos para avaliação da geração de acidez e periculosidade na fração com densidade intermediária e no rejeito bruto, para fins comparativos. Os resultados demonstraram que 69% do material possui densidade entre 2,2 e 2,7, com um potencial de geração de acidez até 90% menor do que o do rejeito bruto. A água lixiviada por esta fração também apresenta menores concentrações de metais (como o ferro) e sulfatos. Assim, conclui-se que, utilizando tecnologias mais limpas, há potencial para o reprocessamento de rejeitos de carvão e o material remanescente pode ser disposto de maneira mais segura e com custo reduzido.

**Palavras-chave:** rejeitos de carvão, drenagem ácida de minas, prevenção da poluição, meio ambiente.

## ABSTRACT

Solid wastes are involved throughout the production process and require proper management for its reduction, treatment and final disposal. Coal processing generates large amounts of waste containing several minerals, including pyrite (iron sulfide -  $\text{FeS}_2$ ). Sulphide minerals oxidize and give rise to acid mine drainage (AMD), the main source of contamination of aquifers and soil in coalfield from Santa Catarina. Currently, AMD is treated by neutralization / precipitation of metals method. This is a technique considered "end-of-pipe", with economic and environmental disadvantages. However, with the application of preventive techniques, based on the principles of cleaner production, it is possible to minimize the generation of DAM recovering the coal waste, concomitantly. Thus, this work aims to minimize the generation of DAM by the sulfide isolation method. In this study, the tailings were processed for the removal of pyrite, eliminating the source of acid before to its disposal. Sampling was carried out in a typical coal beneficiation plant from Barro Branco seam, Santa Catarina. The gravimetric separation of waste was carried out in two stages, using a dense medium separation apparatus, obtaining the following fractions relative density: less than 2.2, between 2.2 and 2.7 and greater than 2.7. Proximate and ultimate analyses were performed in each densimetric fraction obtained and in the coal waste discard pre intervention. XRF analysis, kinetic and static tests to evaluate the generation of acidic and hazardous tests were conducted in the fraction with an intermediate density and in the coal waste discard pre intervention for comparison purposes. The results showed that 69% of the material has a density between 2.2 and 2.7 with an acid generating potential of up to 90% less than the gross tailing. Water leached by this fraction in the kinetic tests also has lower concentrations in terms of metals and sulfates. Thus, it is possible to conclude that, using a cleaner technology, there is evident potential for reprocessing coal waste and the remaining material could be disposed more safely and with lower economic cost.

**Keywords:** coal waste, acid mine drainage, pollution prevention, environment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais distritos Carboníferos do sul do Brasil. (Fonte: Kalkreuth, 2006).....	15
Figura 2. Balanço de massa de um ciclo de beneficiamento das carboníferas de Santa Catarina.....	18
Figura 3. Vista superior e lateral das camadas de rejeitos de um módulo da Carbonífera Criciúma. ....	20
Figura 4. Produção brasileira acumulada de rejeitos de carvão no período de 1925 a 2009. (Fonte: SIECESC, 2013). ....	20
Figura 5. Drenagem ácida de minas típica da região carbonífera de Santa Catarina. ....	22
Figura 6. Procedimento para classificação dos resíduos sólidos. (Fonte: NBR 10.004, 2004) .....	27
Figura 7. Histórico das questões ambientais quanto ao resíduo produzido. (Fonte: adaptado de CNTL, 2003).....	29
Figura 8. Equipamento separador por meio denso de Fe-Si.....	32
Figura 9. Foto das células úmidas para realização dos ensaios cinéticos.....	36
Figura 10. Utilização do equipamento para os ensaios cinéticos. ....	36
Figura 11. Porcentagem em massa de cada fração densimétrica após os ensaios de separação gravimétrica por meio denso de Fe-Si do rejeito bruto. ....	38
Figura 12. Material com densidade inferior a 2,2 ( $d < 2,2$ ) – fração energética. ....	38
Figura 13. Material com densidade intermediária ( $2,2 < d < 2,7$ ) – fração inerte.....	38
Figura 14. Material com densidade superior a 2,7 ( $d > 2,7$ ) – fração pirítica. ....	39
Figura 15. 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.....	45
Figura 16. Quantidade lixiviada de sulfato, acidez e metais (Fe total, Al, Mn e Zn) em função do tempo (92 semanas) no ensaio nas células úmidas. ....	46
Figura 17. Acidez liberada do rejeito bruto em função da temperatura média semanal durante as 92 semanas monitoradas no ensaio cinético por células úmidas.....	47
Figura 18. Sistema produtivo tradicional (acima) e sistema produtivo alternativo (abaixo) para recuperação de produtos. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais processos de concentração do carvão mineral.....	17
Tabela 2. Métodos de controle segundo Kontopoulos (1998).....	24
Tabela 3. Principais diferenças entre as técnicas de “fim-de-tubo” e “PmaisL”. (Fonte: adaptado de CNTL, 2003). .....	30
Tabela 4. Resultados da análise imediata e elementar de amostras de rejeito de carvão para o rejeito bruto e cada densidade relativa obtida. ....	39
Tabela 5. Composição química do resíduo (laudo técnico número LCR 11591/11). .....	41
Tabela 6. Resultados do Ensaio de Lixiviação conforme a NBR 10.005:2004 (laudo técnico número LCR 11591/11). .....	42
Tabela 7 Resultados do Ensaio de Solubilização conforme a NBR 10.006:2004 (laudo técnico número LCR 11591/11). .....	42
Tabela 8. Resultados dos ensaios estáticos ABA tradicional e modificado realizados com a amostra de rejeito bruto e fração intermediária. ....	43
Tabela 9. Comparação dos resultados das análises de lixiviado acumuladas do rejeito bruto e fração intermediária. ....	47
Tabela 10. Características químicas dos efluentes tratados pelo neutralização/precipitação. ....	48
Tabela 11. Custo atual e projetado em reagente alcalino - (CaOH <sub>2</sub> ) - considerando a disposição exclusiva dos rejeitos com densidade entre 2,2 e 2,7. ....	49



## LISTA DE SIGLAS

ABA: Contabilização de Ácidos e Bases  
ABCM: Associação Brasileira de Carvão Mineral  
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AP: Potencial de Acidez  
APHA: American Public Health Association  
ASTM: American Society for Testing and Materials  
AWWA: American Water Works Association  
CETEM: Centro de Tecnologia Mineral  
CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente  
DAM: Drenagem Ácida de Minas  
DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral  
EPA: Environmental Protection Agency  
ICCP: International Committee for Coal And Organic Petrology  
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  
n/d: não detectado  
NBR: Norma Brasileira Registrada  
NNP: Potencial de Neutralização Líquido  
NP: Potencial de neutralização  
NPR: Razão do Potencial de Neutralização  
pH: Potencial Hidrogeniônico  
ROM: Rom-of-Mine  
SIECESC: Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina  
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
WCI: World Coal Institute  
WOO: World Oil Outlook

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. CARVÃO MINERAL: EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO.....	14
2.2. IMPACTO E CONTROLE DA POLUIÇÃO AMBIENTAL NA REGIÃO SUL DE SANTA CATARINA.....	19
2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS.....	25
2.4. PRODUÇÃO MAIS LIMPA.....	28
3. METODOLOGIA.....	31
3.1. AMOSTRA DE REJEITO DE CARVÃO.....	31
3.2. BENEFICIAMENTO DO REJEITO DE CARVÃO.....	32
3.3. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS.....	33
3.4. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO REJEITO BRUTO E DA FRAÇÃO COM DENSIDADE INTERMEDIÁRIA.....	33
3.4.1. Caracterização da periculosidade conforme da NBR 10.004.....	34
3.4.2. Avaliação da geração de acidez pelo método de contabilização de ácidos e bases... 34	34
3.4.3. Ensaio em células úmidas.....	35
3.4.4. Tratamento da drenagem ácida em escala de laboratório.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1. SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS PRODUTOS.....	37
4.1.1. Fração energética.....	40
4.1.2. Fração pirítica.....	40
4.2. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO REJEITO BRUTO E DA FRAÇÃO COM DENSIDADE INTERMEDIÁRIA.....	41
4.2.1. Periculosidade conforme NBR 10.004.....	41
4.2.2. Contabilização de ácidos e bases.....	43
4.2.3. Ensaio cinéticos em células úmidas.....	44
4.3. TRATAMENTO DA DAM EM ESCALA LABORATORIAL.....	48
4.4. CUSTO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	48
5. CONCLUSÕES.....	50
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS.....	51

## 1. INTRODUÇÃO

O carvão mineral é uma importante matéria prima para a produção de energia mundial. Mesmo sendo uma fonte de energia não renovável, é um combustível fóssil abundante e econômico e, enquanto houver reservas disponíveis, será muito utilizado mundialmente. Dessa forma, é importante que estudos sejam realizados com o objetivo de prevenir a poluição e reduzir os impactos ambientais inerentes ao processo de extração, beneficiamento e uso do mesmo.

No Brasil, as reservas de carvão estão localizadas nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Conforme dados da Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM), em 2011, estes Estados foram responsáveis, respectivamente, por 60%, 38% e 2% da produção de carvão energético no Brasil.

Na região Carbonífera de Santa Catarina, a extração do carvão é realizada predominantemente por mineração subterrânea. Devido à mecanização de lavra, pequena espessura das camadas de carvão, sua intercalação com rochas sedimentares (folhelhos, siltitos e arenitos) e a presença de nódulos de pirita (sulfeto de ferro –  $FeS_2$ ), o carvão ROM (“Run-of-Mine”) precisa ser beneficiado para atingir aos padrões de combustão das termoelétricas locais.

No processo de beneficiamento do carvão mineral, aproximadamente 65% do carvão ROM (“Run-of-Mine”) é descartado como resíduo sólido em depósitos de rejeitos, sem valor comercial. Durante anos, estes resíduos foram dispostos de forma imprópria, contaminando os solos e corpos hídricos superficiais e subterrâneos. Os resíduos da mineração, assim como os de qualquer processo produtivo, sejam eles perigosos ou não, necessitam gestão adequada para redução, tratamento e disposição final. Com a evolução da legislação ambiental, as indústrias foram obrigadas a cumprir normas e assumir suas responsabilidades ambientais. Assim, pôde-se perceber mudanças relativas à postura das empresas, que passaram a ter maior controle sobre a questão dos resíduos.

A Região Sul de Santa Catarina foi enquadrada pelo Decreto Federal nº 85.206/80 como a 14ª Área Crítica Nacional para efeito do “Plano Nacional para Controle da Poluição Ambiental”. Segundo estudos realizados, foram gerados aproximadamente 5.000

hectares de áreas degradadas devido à falta de gestão dos resíduos da mineração de carvão (Cassemiro, 2004).

De acordo com Kopezinski (2000), os principais problemas ambientais desses resíduos seriam a ocupação de grandes áreas para dispor os mesmos e a alteração da qualidade das águas subterrâneas e superficiais, em função da geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM). Esse efluente é gerado devido à composição do rejeito produzido na mineração de carvão (além do carvão residual, há também rochas sedimentares, como folhelhos e siltitos e nódulos de pirita) (Kalkreuth et al., 2010).

A DAM é formada pela oxidação de sulfetos metálicos, como a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), quando em contato com a água e o oxigênio. Possui uma elevada acidez e alta concentração de Fe (tanto na forma  $\text{Fe}^{2+}$  como  $\text{Fe}^{3+}$ ) e sulfatos. Devido ao seu baixo pH, esta drenagem acarreta na mobilização e solubilização de outros metais presentes no material geológico, como o Al, o Mn e o Zn.

Segundo Kontopoulos (1998), os impactos da DAM não se restringem somente à área minerada. Os danos podem atingir corpos hídricos superficiais e subterrâneos distantes do empreendimento. Além disso, é um efluente de difícil controle e pode ocorrer por dezenas e até mesmo centenas de anos após esgotamento do depósito mineral, devido às reações químicas envolvidas no processo.

As soluções possíveis diante de um problema ambiental como esse podem ser agrupadas em duas categorias: as soluções de “fim-de-tubo” e as soluções que se baseiam nos princípios da “Produção mais Limpa” (PmaisL). Atualmente, as empresas do setor tratam a DAM através de sistemas ativos por neutralização/precipitação, utilizando o modelo de gestão “fim-de-tubo” (Silveira et al., 2009). Contudo, técnicas com abordagens preventivas, de acordo com os princípios da produção mais limpa, podem trazer benefícios econômicos e ambientais para as empresas de mineração.

Kontopoulos (1998) define que os métodos preventivos para controle e prevenção da DAM são aqueles nos quais é isolado um dos agentes causadores da drenagem (ar, água ou sulfetos), conseqüentemente inibindo as reações de geração de acidez. Alguns métodos preventivos já foram conduzidos em unidades experimentais, como o de coberturas secas (Gallato et al, 2007; Soares, et al, 2009). Nesse método, o objetivo é evitar a DAM pela ausência de água. O procedimento não reduz os volumes de rejeitos, apenas evita, através

de um sistema de impermeabilização, que a água entre em contato com a massa de resíduos. Outra possibilidade, que será o foco do presente trabalho, é o método de isolamento de sulfetos. Neste caso, os rejeitos da mineração necessitam ser processados para a remoção da pirita, havendo uma redução da massa de resíduos.

Conforme Amaral Filho (2009), através do beneficiamento gravimétrico de rejeitos de carvão, é possível se obter três produtos: (i) uma fração com significativo teor de carbono, a qual poderia ser utilizada para geração de energia; (ii) uma fração com maior teor de matéria mineral e menor teor de enxofre com reduzido potencial de geração de acidez; e (iii) uma fração rica em pirita que poderia ser utilizada para a produção de ácido sulfúrico. Assim, a geração da DAM pode ser reduzida pelo processamento de rejeitos do carvão, removendo-se a pirita e parte da fração carbonosa remanescente antes da disposição do material no meio ambiente.

Com base nisso, a técnica utilizada neste trabalho se baseou na abordagem preventiva de geração de resíduos, buscando o tratamento do resíduo com vistas a sua reutilização e/ou redução. O trabalho vai ao encontro dos atuais conceitos envolvendo tecnologias limpas, dentre as quais se relacionam o uso racional dos recursos minerais, atualização tecnológica de processos para separação e concentração mineral, conservação de energia, conservação de recursos naturais e desenvolvimento sustentável na mineração (Hilson, 2003; Reddick et al., 2008; McLellan et al. 2009; Haibin e Zhenling, 2010).

Os estudos foram conduzidos em laboratório, incluindo técnicas de concentração de minerais, caracterização dos materiais obtidos por meio da separação densimétrica e ensaios padronizados de avaliação do potencial de geração de acidez. Por fim, realizou-se uma avaliação comparativa dos custos envolvidos no tratamento da DAM entre a atual sistemática adotada pelas mineradoras e a abordagem sugerida neste trabalho.

Assim, o presente estudo teve como objetivo minimizar a geração da DAM através do processamento de rejeitos do carvão de forma a remover a pirita antes da disposição do material no meio ambiente.

Objetivos específicos foram:

- a) beneficiar os rejeitos de carvão para recuperação do material energético e da pirita;
- b) caracterizar em termos tecnológicos o rejeito bruto e as frações obtidas;

- c) apontar aplicações para as frações obtidas;
- d) avaliar ambientalmente as frações antes e depois do isolamento dos sulfetos em termos de periculosidade e potencial de geração de acidez;
- e) avaliar de forma comparativa, através de ensaios cinéticos de contabilização de ácidos de bases, a cinética geração de DAM com e sem a remoção de sulfetos ao longo de 92 semanas;
- f) avaliar economicamente o tratamento da DAM com e sem a remoção de sulfetos.

Deve-se enfatizar que esta pesquisa está delimitada ao rejeito de carvão produzido durante o beneficiamento de carvão ROM retirado da camada Barro Branco, no Município de Forquilha, Santa Catarina. Apesar da amostragem ter sido realizada de forma representativa em um determinado momento de produção, o material está sujeito a variações decorrentes dos parâmetros geológicos/ambientais ou de alterações no processo industrial.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. CARVÃO MINERAL: EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO**

O carvão mineral tem grande importância na geração de energia e, mesmo caracterizando-se como uma rocha combustível não renovável, possui importância mundial por ser o combustível fóssil mais abundante e econômico. Segundo relatórios da World Oil Outlook (WOO), o carvão ocorre na maioria dos países e deve estar disponível por pelo menos 130 anos, diferente do petróleo e do gás natural, que há previsão de apenas 42 e 60 anos, respectivamente.

Proveniente da fossilização da biomassa, como troncos, raízes, galhos e folhas de vegetais muito antigos, as características e possíveis aplicações do carvão variam de acordo com o ambiente em que foi encontrado, da matéria vegetal que lhe deu origem, do clima, da evolução geológica do local, entre outros. Geralmente contém elevados teores de carbono, entre 50% e 95%, o que lhe confere o poder de queima (Monteiro, 2004).

De acordo com o nível de carbonificação, ele é classificado em: turfa, de baixo conteúdo carbonífero; linhito; carvão betuminoso (hulha), o mais utilizado como combustível; e antracito, considerado um carvão praticamente livre de impurezas e com teor de carbono superior a 90%. O carvão mineral é formado basicamente pelos elementos carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e enxofre. Está associado muitas vezes a rochas e minerais como a pirita (Brasil, 2007). Dessa forma, é muito difícil obter um carvão puro, pois geralmente ele se apresenta com quantidades indesejáveis de materiais inertes que dificultam a queima em termoelétricas. Para separar esse material do carvão, é necessário um processo de beneficiamento, que acaba gerando, além do produto desejado, uma grande quantidade de rejeitos, que são dispostos em depósitos.

No Brasil, as reservas de carvão estão localizadas no RS, SC e PR. Os carvões encontrados no sul do país são considerados de baixa qualidade, pois possuem alta quantidade de cinzas (compostas por silicatos e quartzos), de enxofre e ferro (que se apresentam principalmente na forma de pirita –  $\text{FeS}_2$ ). Esta composição faz com que o carvão brasileiro tenha um baixo poder calorífico e, conseqüentemente, seja considerado de má qualidade para queima. Em Santa Catarina, especificamente, a lavra de carvão teve início no final do século XIX e foi favorecida com a crise de petróleo de 1973 (Soares, 2008). A Figura 1 apresenta os principais distritos carboníferos do sul do País.

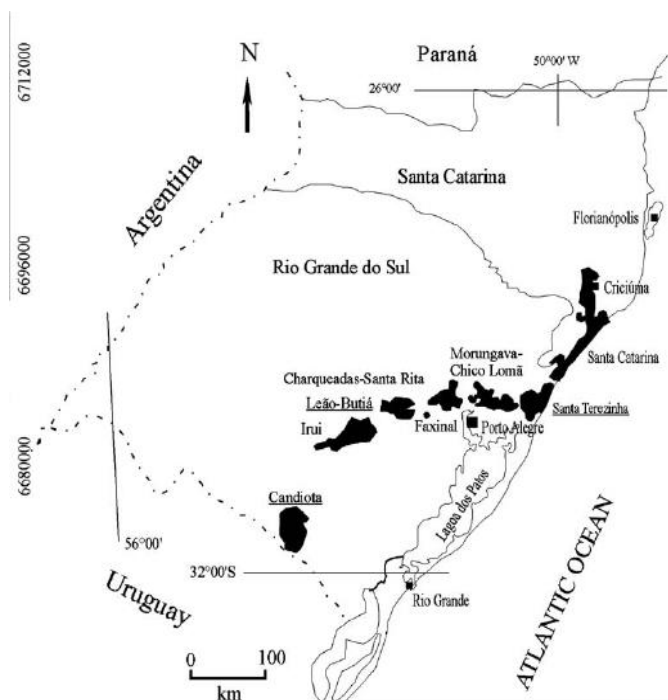


Figura 1. Principais distritos Carboníferos do sul do Brasil. (Fonte: Kalkreuth, 2006).

Os métodos de lavra utilizados são a céu aberto e subterrânea. A lavra a céu aberto ocorre pela remoção da camada de solo e/ou rocha que recobre a camada de carvão, para que o mesmo possa ser lavrado. No local onde estava o carvão, são dispostos os rejeitos (resíduo do beneficiamento do carvão que não tem qualidade para queima). Posteriormente, o material de cobertura retorna ao local, muitas vezes na mesma sequência litológica original. Ao final, a área mineirada é preparada para o recebimento de cobertura vegetal. O procedimento, como um todo, impede o contato com o meio externo (e indiretamente a passagem de ar para dentro do depósito). Este método é considerado menos impactante, pois o rejeito retorna ao seu local de origem. Este método de lavra predomina no Estado do Rio Grande do Sul.

Já a lavra subterrânea é feita pelo método de “câmaras e pilares”. O desmonte é realizado com explosivos ou mineradores contínuos. Como a retirada do carvão ocorre muitas vezes a grandes profundidades e a grandes distâncias do beneficiamento, torna-se inviável economicamente recolocar o rejeito do carvão extraído nestes locais. Esses rejeitos são então dispostos na superfície, formando um depósito de rejeitos.

Para possibilitar a queima de carvão em termoelétricas, o carvão passa pelo processo chamado de beneficiamento, com o objetivo de retirar impurezas associadas ao mesmo. Este método objetiva a concentração do mineral, ou seja, a separação do carvão do material inerte incombustível, de forma que o material esteja dentro das especificações de uso.

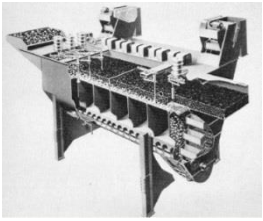


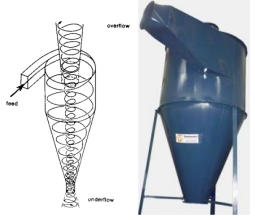
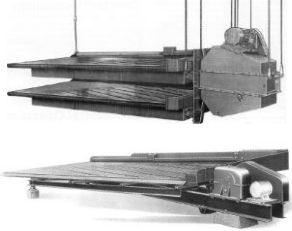

O processamento mineral do carvão ocorre basicamente em duas etapas. A primeira etapa consiste na preparação do carvão, com a cominuição (através de britagem) e classificação granulométrica (com o uso de peneira ou ciclones). A segunda etapa consiste na concentração do carvão. Para tal, empregam-se equipamentos como jigues, espirais, hidrociclones e mesas concentradoras.

De acordo com Tavares e Sampaio (2005), a densidade das partículas varia de acordo com a concentração relativa dos seus constituintes orgânicos e inorgânicos. Assim, quanto maior a concentração da matéria carbonosa no material, menor será sua densidade. A diferença de densidade é um dos principais pontos a serem considerados para a separação dos materiais. A Tabela 1 resume os principais processos de concentração de



carvão com a sua respectiva granulometria de aplicação, princípio de separação e imagem do equipamento.

Tabela 1. Principais processos de concentração do carvão mineral.

<b>Processamento mineral</b>			
<b>Processo</b>	<b>Tipo de partículas</b>	<b>Princípio de separação</b>	<b>Ilustração</b>
Jigue	Grossos	Partículas de diferentes densidades se separam em corrente pulsante de água	
Meio Denso	Grossos	Partículas de diferentes densidade se separam em um meio com densidade intermediária (polpa de água com magnetita ou água com ferrossilício)	
Espirais	Finos	Força centrífuga separa partículas mais pesadas das leves na superfície do canal da espiral	
Ciclone	Finos	As partículas estratificam-se de acordo com as diferenças de densidades e após, entram em fluxo ascendente durante a fase inicial de sua aceleração, na direção radial do ciclone	
Mesas concentradoras	Finos	Concentração de partículas em película de água, na direção da largura da mesa e estratificação das partículas de acordo com as diferenças em densidade, tamanho e forma na direção longitudinal da mesa.	
Flotação	Ultrafinos	Fenômenos físico-químicos superficiais, onde bolhas de ar aderem-se às partículas hidrofóbicas (carvão) levando-as à superfície	

Cabe observar que o beneficiamento de grossos pode ser realizado por jigagem (principal método aplicado no Brasil) ou por meio denso (a utilização desse método está crescendo atualmente). O método de meio denso apresenta uma maior eficiência, porém possui maior custo de investimento e operação, sendo menos utilizado comercialmente (Tavares e Sampaio, 2005). A separação por meio denso ocorre pela utilização de um fluido com densidade intermediária a dos produtos que se quer separar. Assim, o material mais leve flutua, enquanto o mais pesado afunda. De acordo com Leonard (1979), comparando este método com os demais, ele possui maior precisão na separação, uma vez que a densidade do fluido separador pode ser alterada através da modificação da sua composição.

A Figura 2 apresenta o balanço de massa do beneficiamento da mina que foi alvo de estudo no presente trabalho (Mina do Verdinho – Forquilha, SC). O processamento mineral inicia com a britagem e peneiramento do carvão ROM, onde é dividido nas granulometrias de grossos e finos. Os grossos são beneficiados em jigues. Os finos são classificados em hidrociclones, sendo que o *underflow* é processado em espirais e o *overflow* por flotação.

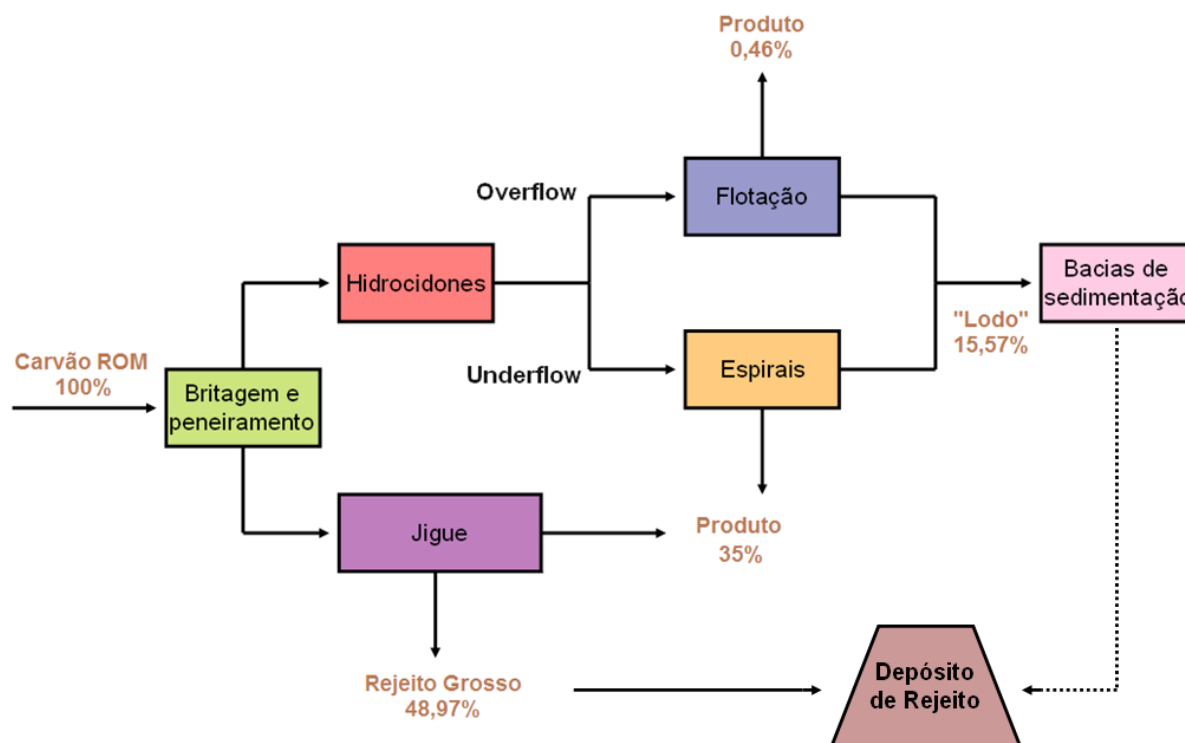


Figura 2. Balanço de massa de um ciclo de beneficiamento das carboníferas de Santa Catarina.

O balanço de massa mostra uma recuperação mássica de produtos de 35,46%. Os rejeitos correspondem a 64,54%, sendo que 48,97% são grossos oriundos do jigge e 15,57% são descartados nas espirais e na flotação. Observa-se que mais de 70% do rejeito gerado é oriundo da etapa de beneficiamento de grossos. O rejeito do jigge é disposto diretamente no módulo de rejeitos, enquanto que os dos circuitos de finos são destinados às bacias de sedimentação, secos e então conduzidos aos módulos.

Nos rejeitos de carvão encontra-se a pirita, o mineral responsável pela geração da drenagem ácida de minas. Caso a geração não seja controlada, os impactos no meio ambiente podem ser muito graves. Esse assunto será abordado a seguir.

## 2.2. IMPACTO E CONTROLE DA POLUIÇÃO AMBIENTAL NA REGIÃO SUL DE SANTA CATARINA

O processo de degradação do meio ambiente na região de sul de Santa Catarina iniciou-se com as atividades de mineração de carvão no final do século XX. A principal causa foi o descaso das empresas mineradoras e das poucas e ineficientes iniciativas das autoridades governamentais para minimizar o problema. Com o decorrer do tempo, os incentivos à mineração de carvão e a falta de cuidado com o meio ambiente levaram a um quadro sério de degradação (Casemiro, 2004).

A mineração de carvão é uma atividade antrópica que impacta o meio físico e se utiliza de recursos não renováveis do meio ambiente, sendo considerada de grande impacto ambiental. Diversos são os fatores que tornam a mineração uma atividade degradadora do meio ambiente. Entre eles, estão o desmatamento, alteração paisagística e topográfica, perda de solos superficiais férteis, alteração de níveis freáticos e qualidade de corpos da água, exposição de áreas a fenômenos como erosão e assoreamento. Além disso, deve-se levar em conta que no processo da extração são realizadas operações de desmonte, transporte e beneficiamento (com utilização de explosivos, energia elétrica, queima de combustíveis, produtos químicos, quantidades relevantes de água, entre outros), a estocagem de rejeitos em depósitos que exige o controle e o tratamento da drenagem ácida de minas (Kopezinski, 2000).

Os rejeitos da região carbonífera de Santa Catarina correspondem, em média, a

65% da massa de material retirado da mina, e são dispostos em pilhas de rejeitos em superfície (Soares, 2008). Para exemplificar, somente em um módulo de rejeitos de carvão localizado no Município de Forquilha, SC, já foram depositados 13 milhões de toneladas de rejeitos (ilustrado na Figura 3), com aproximadamente 5,7% em massa de enxofre. Nesse depósito são gerados 50 m<sup>3</sup>/h de DAM com pH em torno de 2,8 e altas concentrações de Fe, Al, Mn, Zn, entre outros. Estima-se que são desperdiçados anualmente na drenagem aproximadamente 6000 toneladas de ácido sulfúrico, 2500 toneladas de ferro, 315 toneladas alumínio, 31 toneladas de manganês e 22 toneladas de zinco (Menezes, 2009).

A Figura 4 apresenta a produção acumulada de rejeitos de carvão no Brasil. Estima-se que a produção acumulada de rejeitos de carvão em Santa Catarina ultrapasse 300 milhões de toneladas (SIECESC, 2013).



Figura 3. Vista superior e lateral das camadas de rejeitos de um módulo da Carbonífera Criciúma.

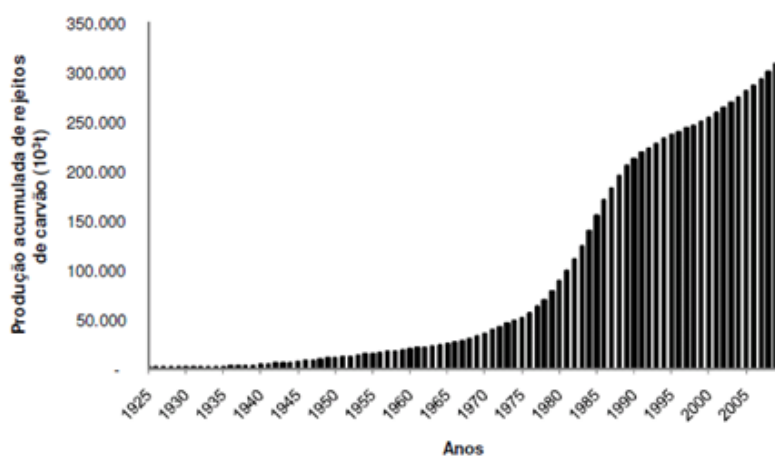


Figura 4. Produção brasileira acumulada de rejeitos de carvão no período de 1925 a 2009. (Fonte: SIECESC, 2013).

Entretanto, a relevância e importância econômica do uso de carvão para obtenção de energia é indiscutível, e, mesmo que o uso de energias renováveis seja fundamental para a matriz energética e para a qualidade do meio ambiente, de acordo com Piva (2010), o carvão não deixará de ser, tão cedo, um importante insumo para geração de energia, principalmente em países em desenvolvimento. O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), em um de seus levantamentos geológicos, divulgou que a região carbonífera de Santa Catarina tem mais de 75 anos de extração de carvão e que as reservas de minério ainda durarão 35 anos. Assim, a mineração de carvão irá permanecer por algum tempo, havendo a necessidade de se criar métodos que reduzam os impactos causados pela mesma.

Nesse contexto, é necessário pensar em soluções que se complementem: geração de valor econômico e redução da poluição, garantindo assim a sustentabilidade ambiental e econômica (Barreto, 2001).

Dentre os diversos fatores de redução de impacto, descritos por Barreto (2001), pode-se listar:

- buscar atuar sempre de forma a prevenir a degradação ambiental;
- reduzir a geração de resíduos e rejeitos descartados;
- reaproveitar ao máximo os rejeitos primários e secundários;
- reutilizar, reciclar e buscar novos usos para os minerais;
- promover a deposição segura, em especial dos resíduos perigosos, mantendo sua estabilidade, e efetuar o monitoramento contínuo;
- reduzir as drenagens ácidas desde o início do projeto até sua total estabilização, dentro de padrões aceitáveis;
- utilizar nos processos, de forma eficiente, a energia, a água, e as substâncias químicas;
- assegurar que a atividade mineira não represente ameaça para a qualidade das águas;
- proteger as águas superficiais e subterrâneas.

Em relação à poluição hídrica, sabe-se que tanto a quantidade quanto a qualidade da água são indispensáveis à vida. Para garantir o abastecimento adequado, são necessários alguns cuidados com os mananciais hídricos, tais como: prevenção, controle da poluição,

análise de custos associados à captação e tratamento, e remediação, quando necessário.

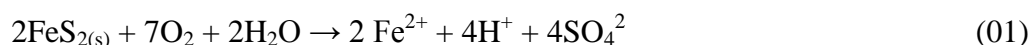
Segundo Farfán (2004), a DAM é o principal impacto ambiental relacionado à atividade de mineração em geral. Especificamente na região carbonífera de Santa Catarina, é a principal causa de contaminação das águas superficiais e subterrâneas. A contaminação dos mananciais por esse efluente prejudica a flora e a fauna, e além dos recursos hídricos, pode contaminar solos além das áreas restritas aos depósitos de materiais sulfetados, em função de inundações de planícies de rios contaminados (Schneider, 2006).

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 (Kontopoulos, 1998). Na Figura 5 pode-se observar o aspecto geral de uma DAM, como a coloração amarelo/avermelhada devido a presença de ferro trivalente.



Figura 5. Drenagem ácida de minas típica da região carbonífera de Santa Catarina.

A pirita é a maior fonte de geração de DAM em áreas de disposição de rejeitos de mineração de carvão (KOMNITSAS et al., 2001). A pirita é 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 for mantido, ocorrerá a oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  para  $\text{Fe}^{3+}$ , consumindo parte da acidez pelos íons  $\text{Fe}^{2+}$ :



Essa reação ocorre em valores de pH mais elevados (acima de 4,5). Em valores de pH menores que 3,5, a oxidação do íon ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) a férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) passa a ser muito baixa. Entretanto, a reação pode ser acelerada pela ação de bactérias quimiolitotróficas acidófilas do gênero *Thiobacillus*, que catalisam a reação 02 e aceleram a mesma em até  $10^6$  vezes.

Se o pH da solução for maior do que 3, o  $\text{Fe}^{3+}$  irá hidrolisar precipitando na forma de hidróxido e gerando acidez, conforme equação 03:



Se o  $\text{Fe}^{3+}$  gerado na reação 02 estiver dissolvido, poderá oxidar a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) pela reação indireta:



O  $\text{Fe}^{2+}$  resultante da reação 04 será oxidado para  $\text{Fe}^{3+}$  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 DAM apresenta valores significativos de alumínio, manganês e zinco; pode também apresentar traços de cobre, níquel, chumbo e outros metais, dependendo da região e gênese do carvão.

Segundo Kontopoulos (1998), as bactérias dos gêneros *Thiobacillus* e *Leptospirillum* têm um papel muito importante na oxidação da pirita, especialmente em pH menor que 4,0, uma vez que são responsáveis pela conversão do  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ . O gênero *Thiobacillus* inclui a espécie *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que é o microrganismo mais comumente envolvido na oxidação de sulfetos metálicos, além de ser capaz de oxidar o  $\text{Fe}^{2+}$  e o enxofre. A espécie *Acidithiobacillus thiooxidans* também é encontrada nas regiões onde há geração de DAM. A espécie *Leptospirillum ferrooxidans* participa dos processos de oxidação associados ao *Acidithiobacillus ferrooxidans*. A faixa de atuação das bactérias citadas é de pH entre 1,4 a 4,0 e temperatura de 5 °C a 35 °C, mas as condições ótimas estão em torno do pH 2 e da temperatura de 30-35 °C.

Existem diversos métodos para o controle da DAM, que podem ser divididos em três grupos: métodos preventivos, métodos de contenção e métodos de remediação

(Kontopoulos, 1998). A Tabela 2 apresenta os métodos de controle mais conhecidos.

Os métodos preventivos consistem em impedir a oxidação de sulfetos metálicos, como a pirita, evitando a geração da DAM. A grande vantagem é que, evitando a geração da efluente ácido, garante-se proteção ao meio ambiente além de economia em tratamento do mesmo. Alguns métodos preventivos são: remoção/isolamento de sulfetos, exclusão de oxigênio por cobertura de água, exclusão de oxigênio por cobertura seca, aditivos alcalinos e bactericidas.

Tabela 2. Métodos de controle segundo Kontopoulos (1998).

<b>CONTROLE DA DAM</b>		
<b>Métodos Preventivos</b>	<b>Métodos de Contenção</b>	<b>Métodos de Remediação</b>
✓ Remoção/isolamento de sulfetos	✓ Prevenção do fluxo de água	✓ Neutralização e precipitação
✓ Exclusão de oxigênio por cobertura de água	✓ Paredes reativas porosas	✓ Filtros de calcário
✓ Exclusão de oxigênio por cobertura seca	✓ Disposição em estruturas de contenção	✓ Drenos anóxicos de calcário
✓ Aditivos alcalinos		✓ Banhados Construídos
✓ Bactericidas		

Os métodos de contenção e remediação podem ser considerados mitigadores dos efeitos da DAM, pois tem como objetivo impedir a exposição da DAM ao meio ambiente, mas não impede que ela seja gerada. Alguns desses métodos de contenção são a prevenção do fluxo de água, paredes reativas porosas e a disposição em estruturas de contenção. Entre os métodos de remediação os mais aplicados são a neutralização e precipitação, filtros de calcário, drenos anóxicos de calcário e banhados construídos.

Atualmente, a técnica mais utilizada é o tratamento ativo da DAM, através da neutralização do efluente e precipitação dos metais. Para isso, o efluente ácido é captado e enviado até um reator onde ocorre o tratamento químico. Este tratamento consiste basicamente em uma dosagem de reagentes capazes de elevar o valor de pH do efluente a um valor que seja capaz de precipitar os metais presentes na DAM. A formação de lodo nessa etapa torna necessária a separação sólido-líquido, que é feita em decantadores, flotadores ou bacias de sedimentação. A secagem do lodo é realizada em leitos de secagem e o efluente tratado é descartado.



O pH ideal para a precipitação dos metais varia, para o  $\text{Fe}^{3+}$  a precipitação ocorre em pH acima de 3,5, para o  $\text{Fe}^{2+}$  o valor é acima de 8, para o  $\text{Al}^{3+}$  entre 4,5 e 9 e o  $\text{Mn}^{2+}$  precipita com pH acima de 8,5 (Menezes, 2009). Em vista disso, considera-se que o valor de elevação ideal de pH para o tratamento de um efluente com características de DAM é 8,5. Contudo, para elevar o pH característico da DAM, próximo de 2, até 8,5, são utilizadas grandes quantidades de reagente básico, como NaOH e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , tornando o tratamento caro.

Nesse contexto, e visando alternativas de tecnologias mais limpas, o controle da poluição causada pelos rejeitos de carvão pode ser feito com métodos preventivos, e o método escolhido neste trabalho foi o de remoção/isolamento de sulfetos dos resíduos sólidos provenientes da mineração. Dentro da contextualização do trabalho, os temas “Resíduos Sólidos” e “Produção Mais Limpa” são importantes, e os mesmos serão brevemente descritos a seguir.

### 2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS

Durante anos, o setor industrial se utilizou dos recursos naturais. O processo produtivo se dava de acordo com princípios econômicos e de lucratividade, sendo a preocupação com o meio ambiente negligenciada. Com o passar dos anos os impactos ambientais tornam-se cada vez maiores e mais perceptíveis, aumentando a conscientização da população e dos órgãos públicos. Assim, começou a se exigir mais controle por parte das empresas da sua matéria prima e do destino final do seu produto, além das modificações no processo produtivo que pudessem trazer menos prejuízos ambientais.

A gestão ambiental nas indústrias passou a ser necessária, sendo a sua principal finalidade compatibilizar o desenvolvimento econômico com o meio ambiente sustentável (princípios para reduzir e controlar impactos causados pelo processo produtivo). Nessa visão, os resíduos sólidos devem ser gerenciados de acordo com o princípio dos 3 R's:

**Redução:** medidas para minimização da geração de resíduos, diretamente na fonte ou durante o processo, evitando desperdícios. É a principal etapa e deve ser priorizada durante o processo produtivo, uma vez que evitará custos com tratamento e disposição final.

Reutilização: aproveitamento antes do descarte ou reciclagem, utilizando o máximo possível o produto dentro do ciclo produtivo. É a segunda etapa priorizada nos 3R's.

Reciclagem: aproveitar os resíduos, através de técnicas para transformar em outro produto também viável para utilização. É a última opção dentro de um sistema de gestão, pois o mais conveniente seria a sua não geração.

Assim, a gestão sustentável deve levar em consideração o princípio dos 3R's, de que prevenir é melhor do que remediar. A técnica de prevenção permite eliminar ou reduzir a geração, evitando o tratamento e a disposição do resíduo, que é cara e envolve riscos. A prevenção exige planejamento, criatividade, mudanças tanto de atitude quanto de processo (estes, aliados a investimentos em equipamentos e mão-de-obra), além da colaboração e boa vontade de toda a equipe da empresa. A gestão de resíduos objetiva garantir a preservação do meio ambiente (Tocchetto, 2005).

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), resíduos sólidos são definidos como: “Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

A norma referida anteriormente, classifica os resíduos em :

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;
  - resíduos classe II A – Não inertes.
  - resíduos classe II B – Inertes.

A classificação envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, verificação de seus constituintes e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A partir do conhecimento dos seus constituintes, verifica-se se os mesmos são perigosos. São perigosos os resíduos que se encontram nos anexos A ou B da norma, ou que apresentem

características de periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Também ficam incluídos como perigosos os resíduos que, quando submetidos às condições ao ensaio de lixiviação descrito na NBR 10.005 (ABNT, 2004b), tenham alguns dos parâmetros em níveis superiores aos listados na Tabela F da NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Caso contrário, o resíduo é classificado como não perigoso, e pode ser inerte ou não inerte. Para esta subclassificação, é utilizado ensaio de solubilização descrito na NBR 10.006 (ABNT, 2004c). Caso algum de seus constituintes for solubilizado em concentrações superiores ao anexo G da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004a), o resíduo é considerado Resíduo Classe II A - Não Inerte. Se todos os parâmetros encontrarem-se abaixo do listado no Anexo G, o material enquadra-se como Resíduo Classe II B – Inerte. O procedimento de classificação é demonstrado na Figura 6.

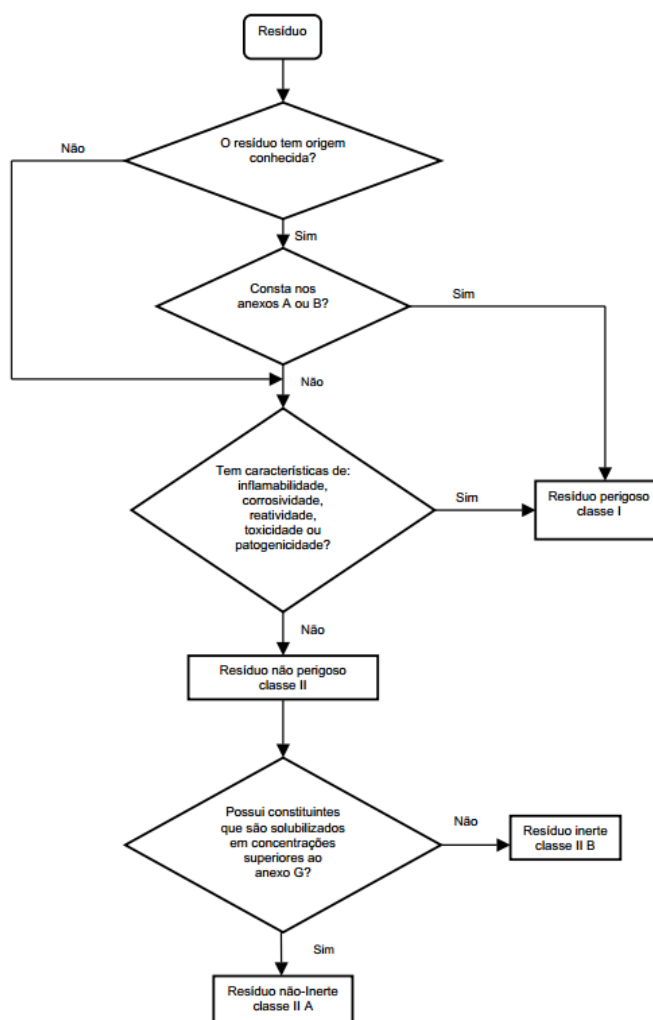


Figura 6. Procedimento para classificação dos resíduos sólidos. (Fonte: NBR 10.004, 2004)

Os resíduos sólidos provenientes da mineração não se enquadram como Resíduo Perigosos Classe I, segundo os anexos A e B. Contudo, mesmo não constando na lista, se apresentarem potencial de corrosividade, toxicidade e combustão espontânea, podem ser considerados como tal. Em virtude do disso, é interessante que sejam submetidos a ensaios de lixiviação e solubilização para a devida classificação.

#### 2.4. PRODUÇÃO MAIS LIMPA

No período compreendido entre a década de 50 e 90, os processos produtivos evoluíram muito nos métodos de tratamento e descarte de resíduos, abordagem conhecida como “fim-de-tubo”. Partir da década de 90, consolidou-se a importância da prevenção na geração de resíduos. A ideia mudou entre o convencional de “O que fazer com os resíduos?” para “O que fazer para não gerar resíduos?”.

A Produção mais Limpa (PmaisL) baseia-se justamente na segunda ideia, procurando sempre conhecer o que evita a geração de resíduos, para assim reduzir custos na disposição e tratamento bem como evitar possível contaminação do meio ambiente pelos mesmos (CNTL, 2003). Inicialmente, a expressão Produção mais Limpa foi proposta pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA, em Paris no ano de 1989 como sendo: “a aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva integrada aos processos, produtos e serviços para aumentar a eficiência e reduzir os riscos ao homem e ao meio ambiente”.

Em 1992 a UNEP (United Nations Environment Programme) publicou no Boletim de Produção Mais Limpa quatro importantes definições para responder à pergunta “O que é Produção Mais Limpa?” (BAAS, 1995):

- (a) A PmaisL significa aplicação contínua de uma estratégia ambiental integrada e preventiva para processos e produtos, reduzindo os riscos aos seres humanos e ao meio ambiente.
- (b) A técnica inclui a conservação de matérias-primas e energia, eliminando matérias-primas tóxicas e reduzindo a quantidade e toxicidade das emissões e dos resíduos.

(c) A estratégia de PmaisL para produtos foca na redução do impacto ambiental durante todo o ciclo de vida dos mesmos, desde a extração da matéria-prima até a disposição final.

(d) A PmaisL é atingida através da aplicação de conhecimentos, melhorias de tecnologia e mudança de atitudes.

Nos últimos anos o resíduo passou a ser visto com importância econômica e resultado da ineficiência do processo produtivo. Quanto menor a produção de resíduos, menor os custos com a matéria prima, com a disposição e tratamento dos mesmos. A Figura 7 apresenta o histórico das questões ambientais que levaram à abordagem PmaisL.

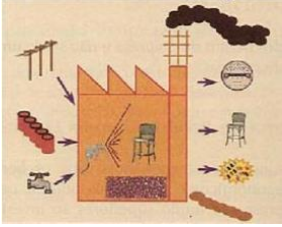
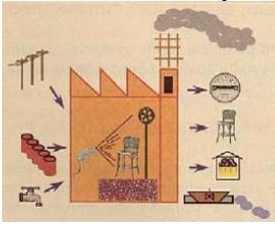
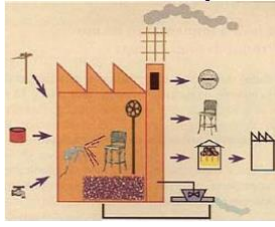
1950-1960	1970-1980	1990-atual
<b>Gestão Ambiental Passiva</b>	<b>Gestão Ambiental Reativa: abordagem “fim-de-tubo”</b>	<b>Gestão Ambiental Pró-ativa: Produção mais Limpa</b>
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Criação de padrões de qualidade e de emissões</li> <li>✓ Meio ambiente ainda suporta quantidade de resíduos gerados</li> <li>✓ Diluição de resíduos na água e emissões no ar</li> <li>✓ Irresponsabilidade empresarial com o impacto ambiental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sistema de licenciamento ambiental</li> <li>✓ Atitude reativa: cumprimento das normas ambientais</li> <li>✓ Controle do resíduo no modelo “fim-de-tubo”</li> <li>✓ Responsabilidade empresarial isolada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Atitude pró-ativa, além dos cumprimentos das normas</li> <li>✓ Tecnologias limpas e Análise do Ciclo de Vida dos Produtos</li> <li>✓ Integração total da responsabilidade na estrutura empresarial</li> </ul>

Figura 7. Histórico das questões ambientais quanto ao resíduo produzido. (Fonte: adaptado de CNTL, 2003).

Há uma grande diferença entre a abordagem de gestão dos resíduos convencional “fim-de-tubo” com a proposta de “PmaisL”. O principal objetivo da abordagem tradicional é atuar no fim do processo, quando o resíduo foi gerado e precisa de tratamento e disposição final adequada, evitando que o mesmo ocasione impacto ao meio ambiente. As soluções dadas aos resíduos resultam no aumento dos custos a longo prazo, além de risco de contaminação. Ao contrário, a “PmaisL” atua na fonte geradora, prevenindo e minimizando a geração de resíduos e, quando o resíduo não puder ser evitado, que o

mesmo possa ser reciclado internamente. Na Tabela 2 estão apresentadas as principais diferenças entre as duas abordagens, de “fim-de-tubo” e “PmaisL”.

Mesmo com diversos aspectos positivos e vantajosos em relação a gestão convencional, existem ainda muitas barreiras para o desenvolvimento de ações de “PmaisL”, tanto na área industrial, como governamental e no âmbito geral. De acordo com o relatório *Cleaner Production in Latin America and the Caribbean* (CETESB & UNEP, 2002), algumas delas são:

- falta de comprometimento governamental na priorização de ações de PmaisL;
- falta de suporte legislativo e legislação adequada que privilegie ações de caráter preventivo.
- pouco interesse e participação na implementação de ações de PmaisL por parte das indústrias, devido ao desconhecimento de alternativas tecnológicas e comportamento reativo dos empresários (que preferem a solução de problemas imediata);
- dificuldade em realizar novos investimentos, pelo desconhecimento de linhas de crédito em PmaisL, juros excessivos cobrados pelos bancos locais.
- pouca conscientização sobre o tema, mostrando a necessidade de maior treinamento e divulgação;

Tabela 3. Principais diferenças entre as técnicas de “fim-de-tubo” e “PmaisL”. (Fonte: adaptado de CNTL, 2003).

<b>Abordagem convencional “fim-de-tubo”</b>	<b>Produção Mais Limpa</b>
✓ Pretende reação.	✓ Pretende ação.
✓ Os resíduos, os efluentes e as emissões são controlados através do tratamento, após gerados.	✓ Prevenção da geração de resíduos, efluentes e emissões na fonte, procurando evitar matérias-primas potencialmente tóxicas.
✓ Proteção ambiental de competência de especialistas.	✓ Proteção ambiental é tarefa para todos.
✓ A proteção ambiental atua depois do desenvolvimento dos processos e produtos.	✓ A proteção ambiental atua como uma parte integrante do design do produto e da engenharia de processo.
✓ Não tem a preocupação com o uso eficiente de matérias-primas, água e energia.	✓ Uso eficiente de matérias-primas, água e energia.
✓ Leva a custos adicionais.	✓ Ajuda a reduzir custos.

Dentre as ações de Produção mais Limpa são possíveis modificações em vários níveis de atuação e aplicações de estratégias, devendo-se privilegiar o Nível 1 como prioritárias, seguidas do Nível 2 e Nível 3. Dessa forma, dá-se preferência a medidas que busquem eliminar ou minimizar resíduos, efluentes e emissões no processo onde são gerados, e não após sua geração. As opções de produção mais limpa são descritas a seguir (CNTL,2003).

Para minimização de resíduos e emissões:

Nível 1 - Redução na fonte: mudança no produto e processo (boas práticas de PmaisL, substituição de matérias primas, modificação tecnológica)

Nível 2 - Reciclagem interna

Já, se objetivando o reuso de resíduos, efluentes e emissões:

Nível 3 – Reciclagem externa

A proposta deste trabalho compreende as mudanças no produto e no processo produtivo, com redução de resíduos na fonte através da modificação tecnológica utilizada, atuando diretamente no Nível 1. Os rejeitos que, após o beneficiamento, seriam dispostos como resíduos, sem valor comercial, são reprocessados previamente à sua disposição final. O reprocessamento permite a separação das frações com possibilidade de reutilização, reduzindo consideravelmente os resíduos gerados.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. AMOSTRA DE REJEITO DE CARVÃO**

O rejeito de carvão utilizado foi proveniente da etapa de jigagem, circuito de grossos (com granulometria entre 2,0 e 50,8 mm), do processo de beneficiamento de carvão mineral da Mina do Verdinho da Carbonífera Criciúma S.A, Município de Forquilha, SC. Foram coletados aproximadamente 200kg de amostra, homogeneizada e quarteada conforme NBR 10.007 (ABNT, 2004d), até se obter aproximadamente 50kg de rejeito.

### 3.2. BENEFICIAMENTO DO REJEITO DE CARVÃO

A amostra de rejeito de carvão foi processada para a separação gravimétrica do material em meio denso de ferrossilício (Fe-Si), com o objetivo de se obter três frações densimétricas distintas: inferior a 2,2, entre 2,2 e 2,7 e superior a 2,7. De acordo com Amaral Filho, 2009, os parâmetros de recuperação foram baseados na 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.

Dessa forma, realizou-se a separação gravimétrica do material utilizando uma solução de ferrossilício 15% (água e liga de ferro-silício atomizado 15%). A água foi adicionada no equipamento e, em seguida, a liga de Fe-Si pulverizada até a suspensão atingir a densidade definida. A densidade do meio foi medida por um densímetro e o objetivo era que a fração mais pesada ( $d > 2,7$ ) afundasse em solução e a fração inferior a 2,2 flutuasse. Na Figura 25 é apresentado o equipamento utilizado na realização dos ensaios de beneficiamento (escala semi-piloto).



Figura 8. Equipamento separador por meio denso de Fe-Si.

Para a caracterização tecnológica, as amostras foram cominuídas manualmente com auxílio de grau e pistilo, e posteriormente peneiradas a um diâmetro de 025mm (Tyler #60). Essa granulometria foi escolhida devido às especificações das normas para realização das análises tecnológicas.



### 3.3. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS

Para cada fração densimétrica, realizou-se a análise imediata considerando o teor de cinzas, matéria volátil, carbono fixo, poder calorífico e umidade. A análise elementar levou em conta o teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. Também foram realizadas análises das formas de enxofre (pirítico, sulfático e orgânico). Além disso, a fração intermediária e o rejeito bruto foram submetidos à análise de fluorescência de raio - X.

Para obtenção do teor de cinzas, pesou-se 1 g de amostra em um cadinho de porcelana, o qual foi então colocado em forno mufla em temperatura de 800°C, por 1 hora, conforme a norma NBR 8289 (ABNT, 1983a). Para análise de matéria volátil, fez-se a queima de 1 g de rejeito de carvão, durante 5 minutos, em forno mufla a 950°C, de acordo com a norma NBR 8290 (ABNT, 1983b). O poder calorífico foi medido no equipamento Bomba Calorimétrica da marca IKA modelo C2000 (ASTM, 2004). O teor de umidade foi realizado seguindo o procedimento da norma NBR 8293 (ABNT, 1983c). As formas de enxofre pirítico e sulfático foram obtidas através de procedimentos titulométricos (ASTM, 2007). O enxofre total, assim como carbono, hidrogênio e nitrogênio, foram analisados instrumentalmente pelo equipamento Vario Macro Elementar. Por fim, o enxofre orgânico foi obtido pela subtração dos valores de enxofre pirítico e sulfático do enxofre total. Para análise instrumental de fluorescência de raios-X foi utilizado o equipamento Minipal-4 Panalitical.

### 3.4. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO REJEITO BRUTO E DA FRAÇÃO COM DENSIDADE INTERMEDIÁRIA.

Após a dessulfurização dos rejeitos, verificou-se o desempenho ambiental do novo resíduo obtido. O objetivo foi comparar ambientalmente o rejeito antes e depois da retirada da pirita, para verificar se houve ou não redução de geração da DAM e quão menor seriam os efeitos caso esse rejeito beneficiado fosse disposto em depósitos. Dessa forma, foi realizada uma avaliação ambiental comparativa, levando em consideração duas 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.

Neste estudo, realizou-se a caracterização dos resíduos sólidos conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), mediu-se o potencial de geração de acidez pelo método de contabilização de ácidos e bases e efetuou-se o teste cinético em células úmidas. Por fim, foi realizada uma simulação do tratamento do efluente em laboratório pelo método físico-químico convencional (neutralização e precipitação de metais).

#### 3.4.1. Caracterização da periculosidade conforme da NBR 10.004

Com o objetivo de 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, foram avaliadas 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 e 10.006 (ABNT, 2004b; ABNT, 2004c).

#### 3.4.2. Avaliação da geração de acidez pelo método de contabilização de ácidos e bases

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

Os ensaios estáticos foram realizados na amostra de densidade intermediária (entre 2,2 e 2,7) e na amostra de rejeito bruto. Empregaram-se os métodos tradicional e modificado de contabilização de ácido e base (ABA). Através desse ensaio pôde-se determinar o potencial de acidez (AP) e o potencial de neutralização (NP) e calcular o potencial de neutralização líquido (NNP).

$$\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP} \quad (1)$$

A determinação do potencial de acidez (AP) pelo método ABA tradicional foi realizada a partir da 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. De acordo com a estequiometria, um mol de  $\text{CaCO}_3$  é requerido por mol de S, logo:

$$AP \text{ (kg CaCO}_3\text{/t)} = (1000/32).\%S \quad (2)$$

A determinação do potencial de neutralização (NP) pelo método ABA tradicional foi realizada pelo ataque da amostra com ácido clorídrico aquecido a  $90^\circ\text{C}$ , 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 pela seguinte equação:

$$C = \frac{\text{mL NaOH}}{\text{mL HCl}} \quad (3)$$

$$\text{Eq. ácido consumido} = (\text{mL ácido adicionado}) - (\text{mL base adicionado}).C \quad (4)$$

$$\text{NP} = (\text{Eq ácido cons}).25.(N \text{ ácido}) \quad (5)$$

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.

#### 3.4.3. Ensaio em células úmidas

Os estudos cinéticos foram realizados pelo método de células úmidas, conforme procedimento ASTM D 5744 (ASTM, 1996), nas amostras de densidade intermediária (entre 2,2 e 2,7) e no rejeito bruto. O teste consistiu em colocar as amostras de 500 gramas cada, com granulometria inferior a 6,3 mm, em dois frascos fechados separados, por onde poderia ser injetado e retirado ar. Inicialmente, submeteram-se as amostras a duas lavagens de 1000ml com água destilada e na terceira lixiviação coletou-se o lixiviado para análise.

Após, submeteram-se as amostras ao ar seco por três dias, ao ar úmido por três dias e um dia para percolação de 500 mL água. O ciclo semanal se repetiu por todo o período de teste aplicado, que foi de 92 semanas. Na Figura 9 está ilustrado o equipamento utilizado no ensaio (a vidraria da esquerda contém sílica gel, onde é produzido o ar seco, e o Erlenmeyer da direita borbulha água para geração do ar úmido) e a Figura 10 mostra a utilização do equipamento para coleta do lixiviado.



Figura 9. Foto das células úmidas para realização dos ensaios cinéticos.



Figura 10. Utilização do equipamento para os ensaios cinéticos.

Os ciclos de lixiviação foram conduzidos por 92 semanas. As águas de lixiviação foram analisadas em relação aos seguintes parâmetros de qualidade de água: pH, potencial

redox, acidez, metais (Al, Mn, Zn, Fe) e sulfato. O pH foi medido em um pHmetro e os valores de potencial redox foram medidos em eletrodo de prata/cloreto de prata. Já a acidez foi obtida por titulometria. Os metais foram analisados instrumentalmente por Absorção Atômica em um equipamento Varian AA240FS. Já a análise de sulfatos foi realizada por cromatografia iônica em um equipamento DIONEX-ICS3000. Todas as análises foram realizadas, semanalmente, seguindo os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

#### 3.4.4. Tratamento da drenagem ácida em escala de laboratório

A fim de se avaliar o consumo de reagente no processo convencional de tratamento de 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. O tratamento consistiu basicamente na elevação do pH para 8,7 com adição de uma solução 0,1 mol/L de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e adição de 2,0 mg/L de polímero floculante (poliacrilamida aniônica de alto peso molecular). 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, respectivamente, por espectroscopia de absorção atômica e cromatografia iônica. Os procedimentos de análise seguiram as metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS PRODUTOS

A separação gravimétrica por meio denso de Fe-Si permitiu obter 3 frações com diferentes densidades: inferior a 2,2 ( $d < 2,2$ ), entre 2,2 e 2,7 ( $2,2 < d < 2,7$ ) e superior a 2,7 ( $d > 2,7$ ), ilustrado na Figura 11. A primeira fração, que corresponde a 17% em massa do material, apresenta potencial de uso em blendagem com carvões de melhor qualidade. A terceira fração (com massa de 14%), rica em pirita, apresenta potencial para ser

comercializada na produção de ácido sulfúrico e/ou sais e óxidos de ferro. O material remanescente, com pequena quantidade de pirita, ficou na faixa de densidade intermediária (69% em massa).

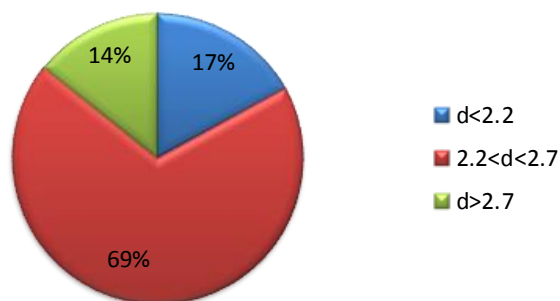


Figura 11. Porcentagem em massa de cada fração densimétrica após os ensaios de separação gravimétrica por meio denso de Fe-Si do rejeito bruto.

As imagens das amostras de diferentes frações densimétricas podem ser observadas nas Figuras 12, 13 e 14.

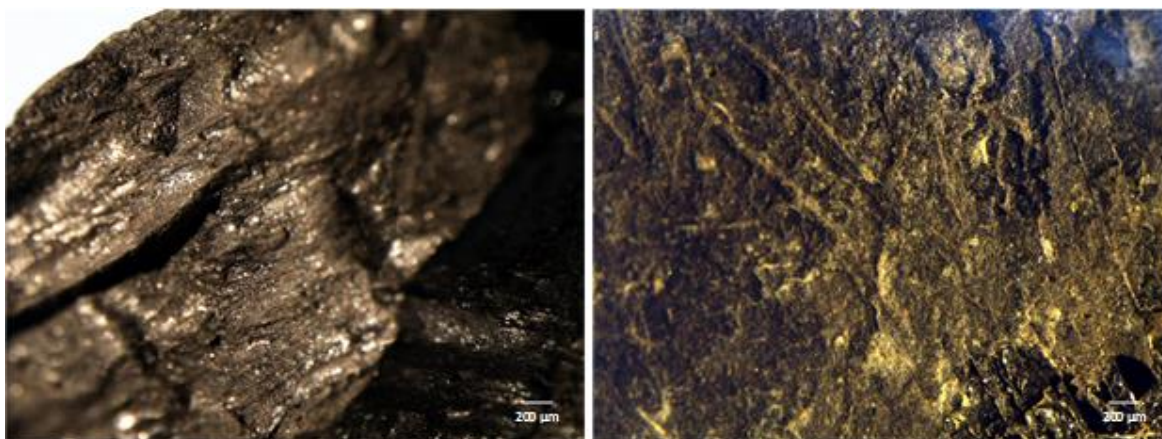


Figura 12. Material com densidade inferior a 2,2 ( $d < 2,2$ ) – fração energética.



Figura 13. Material com densidade intermediária ( $2,2 < d < 2,7$ ) – fração inerte.

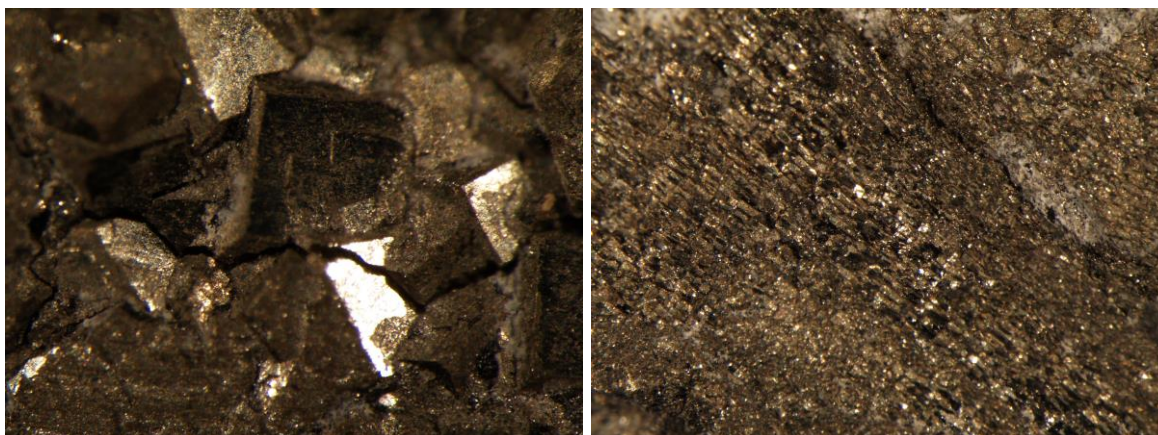


Figura 14. Material com densidade superior a 2,7 ( $d > 2,7$ ) – fração pirítica.

A Tabela 4 resume os valores encontrados na análise imediata e elementar das três frações densimétricas obtidas. Em relação à análise elementar, pode-se observar que a fração com densidade inferior a 2,2 contém maior quantidade de carbono, nitrogênio e hidrogênio (fração energética). A fração com densidade intermediária possui a maior quantidade de cinzas (88,3%) e menor quantidade de enxofre (1,1%). A fração com densidade superior a 2,7 é a que apresenta o maior teor de enxofre. Essa a fração possui 32,5% de enxofre pirítico e aproximadamente 60% de pirita –  $\text{FeS}_2$ . É possível observar que o rejeito bruto, com 7% de enxofre, após ser beneficiado, reduz para 1,1% na fração com densidade entre 2,2 e 2,7.

Tabela 4. Resultados da análise imediata e elementar de amostras de rejeito de carvão para o rejeito bruto e cada densidade relativa obtida.

<b>Parâmetro (base seca)</b>	<b>Rejeito Bruto</b>	<b><math>d &lt; 2,2</math></b>	<b><math>2,2 &lt; d &lt; 2,7</math></b>	<b><math>d &gt; 2,7</math></b>
Cinzas (%)	79,3	75,8	88,3	64,8
Matéria volátil (%)	11,2	11,6	8,4	27,6
Carbono fixo (%)	3,4	10,5	1,0	6,9
Poder calorífico (cal/g)	-	1072	303	-
C (%)	6,7	16,4	3,9	8,9
H (%)	1,3	1,8	1,1	0,9
N (%)	0,3	0,5	0,3	0,3
S (%)	7,0	1,8	1,1	37,6
S - Pirítico (%)	6,3	1,3	0,7	32,5
S - Sulfático (%)	0,1	0,2	0,1	0,4
S - Orgânico (%)	0,6	0,3	0,3	4,8

#### 4.1.1. Fração energética

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) mostram que através da combustão de carvões com altos teores de cinzas e rejeitos de carvão é possível obter uma considerável eficiência energética utilizando leito fluidizado. Ainda, através da co-combustão de rejeitos de carvão com carvões de melhor qualidade ou outros rejeitos contendo consideráveis teores de carbono, é possível obter energia e ainda reduzir a quantidade de resíduos sólidos gerados em outras atividades industriais (Li et al., 2006; Barbosa et al., 2009; Muthuraman et al., 2010; Li, et al., 2011).

Assim, de acordo com os dados obtidos para a fração com densidade inferior a 2,2, esse material poderia ser aplicado na mistura com carvões de melhor qualidade em termoelétricas que aceitem carvões com alto teor de cinza (cuja especificação é de no máximo 67% de cinzas e 3,2% de enxofre), em termoelétricas convencionais (cuja especificação é de no máximo 42% de cinzas e 2,3% de enxofre) ou em termoelelétricas de co-processamento carvão com outros resíduos industriais.

#### 4.1.2. Fração pirítica

O interesse na produção do enxofre é de grande importância, uma vez que o ácido sulfúrico, por exemplo, é utilizado na indústria em diversos setores: produtos químicos, papel e celulose, açúcar, siderurgia e fertilizantes. Atualmente o Brasil importa enxofre, sendo que o potencial mineral em relação aos sulfetos associados à mineração de carvão não é aproveitado.

A fração pirítica, com aproximadamente 60% de  $\text{FeS}_2$ , atende as especificações para a produção de ácido sulfúrico, podendo ser facilmente comercializada. De acordo com Colling et al (2011), a pirita pode ser utilizada ainda na fabricação de sulfato férrico, um produto químico muito usado como coagulante em operações de tratamentos de água para abastecimento público e no tratamento de efluentes industriais e sanitários. Outras possibilidades de aproveitamento são na produção de sulfato ferroso (VIGÂNCIO et al,



2011) e pigmentos à base de óxidos de ferro como a magnetita (preto), hematita (vermelho) e goetita (amarelo) (SILVA et al, 2012).

Assim, conclui-se que, em relação à fração pirítica, 14% do material pode ser reaproveitado com a comercialização de um concentrado de pirita.

#### 4.2. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO REJEITO BRUTO E DA FRAÇÃO COM DENSIDADE INTERMEDIÁRIA.

##### 4.2.1. Periculosidade conforme NBR 10.004.

Os resultados da classificação de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), realizada em laboratório terceirizado, demonstraram que o rejeito bruto é classificado como Resíduo Não Perigoso Classe II A – Não Inerte e a fração intermediária ( $2,2 < d < 2,7$ ) é classificada como Resíduo Não Perigoso Classe II B – INERTE.

A Tabela 5 apresenta os resultados da composição química do resíduo. De acordo com o laudo (Anexo 1 e Anexo 2), as frações não se enquadram como resíduo perigoso de fontes específicas e não específicas, nem apresentam propriedades que conferem características de corrosividade, reatividade, inflamabilidade, patogenicidade e toxicidade, conforme laudo técnico.

Tabela 5. Composição química do resíduo (laudo técnico número LCR 11591/11).

Parâmetro	Resultados da Amostra	
	Rejeito bruto	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*
Mercúrio (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

Os resultados de lixiviação realizados conforme norma técnica ABNT NBR 10.005:2004 estão apresentados na Tabela 6, e dos ensaios de solubilização, de acordo com a norma técnica ABNT NBR 10.006 (2004c), estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 6. 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 10.004
	Rejeito Bruto	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
Mercúrio (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

Tabela 7 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 10.004
	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

Observa-se que nenhum dos parâmetros analisados foram detectados nas amostras, logo, não ultrapassaram o limite máximo previsto no Anexo F da NBR 10.004:2004 e assim, não se enquadram como resíduo perigoso. Nesse ensaio, o rejeito bruto ultrapassou os limites máximos do Anexo G da NBR 10.004 (2004a) para os parâmetros alumínio e ferro, sendo assim classificado 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 nesse anexo, sendo classificado como Resíduo Classe II B - Inerte.

#### 4.2.2. Contabilização de ácidos e bases

Os resultados dos ensaios estáticos são apresentados na Tabela 8. Para o rejeito bruto, o valor do potencial de neutralização líquido (NNP) foi de -217,3 kg CaCO<sub>3</sub>/ton pelo método ABA tradicional e de -196,9 kg CaCO<sub>3</sub>/ton pelo método ABA modificado. Já para a fração com densidade intermediária, o valor de NNP foi de -35,0 kg CaCO<sub>3</sub>/ton pelo método ABA tradicional e de -22,5 kg CaCO<sub>3</sub>/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 90% menor quando comparado ao rejeito bruto.

Tabela 8. Resultados dos ensaios estáticos ABA tradicional e modificado realizados com a amostra de rejeito bruto e fração intermediária.

	AP (kg CaCO <sub>3</sub> /ton)		NP (kg CaCO <sub>3</sub> /ton)		NNP (kg CaCO <sub>3</sub> /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

Contudo, em ambos os casos, os valores de NNP foram inferiores a -20 kg CaCO<sub>3</sub>/ton, de forma que se espera a geração de acidez no sistema (mesmo que possivelmente maior no rejeito bruto). Esses dados contradizem o laudo de caracterização do resíduo quanto a periculosidade conforme a NBR 10.004 (2004a), pois o material apresenta potencial de reatividade, geração de acidez, corrosividade e inclusive de toxicidade, o que enquadraria o material como perigoso.

A causa disso pode ser decorrente do curto período de tempo dos ensaios de lixiviação e solubilização previsto nas NBR's 10.005 (ABNT, 2004b) e 10.006 (ABNT, 2004c) que são feitos, respectivamente, em 1 dia e 1 semana. Dessa forma, foram realizados estudos cinéticos em células úmidas conforme o Método ASTM D-5744/96 (ASTM, 2007) por um período de 92 semanas, para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na disposição dos rejeitos de carvão ao longo do tempo.

#### 4.2.3. Ensaios cinéticos em células úmidas

Os resultados dos ensaios cinéticos para o rejeito de carvão bruto e para a fração com densidade intermediária são apresentados na Figura 15. A alta variabilidade nos resultados decorre das interferências inerentes ao processo de lixiviação (temperatura, atividade microbiana, sistema de percolação, etc), considerada normal para ensaios em células úmidas (SAPSFORD et al., 2009).

Observa-se que o pH da água lixiviada do rejeito bruto foi inferior ao do rejeito processado durante todo o período de condução do ensaio, e ambos foram bastante ácidos desde as primeiras semanas. O pH dos materiais, quando comparado à análise da composição química do Laudo da NBR 10.004, é mais ácido, e isso pode decorrer do fato da coleta do lixiviado nas células úmidas ter sido realizada após duas lavagens dos materiais.

Em relação ao potencial redox, foi verificado um comportamento bastante oxidante para ambos os materiais, o que favorece a degradação de sulfetos. As concentrações de metais e sulfatos no rejeito beneficiado também foram menores no decorrer das 92 semanas. O tempo de latência foi de aproximadamente 15 semanas para a amostra bruta e de 20 semanas para a amostra com densidade intermediária.

Na Figura 16 são apresentadas as quantidades 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, a partir da semana 80, a maior tendência de estabilização dos parâmetros analisados para o rejeito processado enquanto que para o rejeito bruto, sem a retirada da pirita, o material continua liberando acidez, sulfatos e metais.

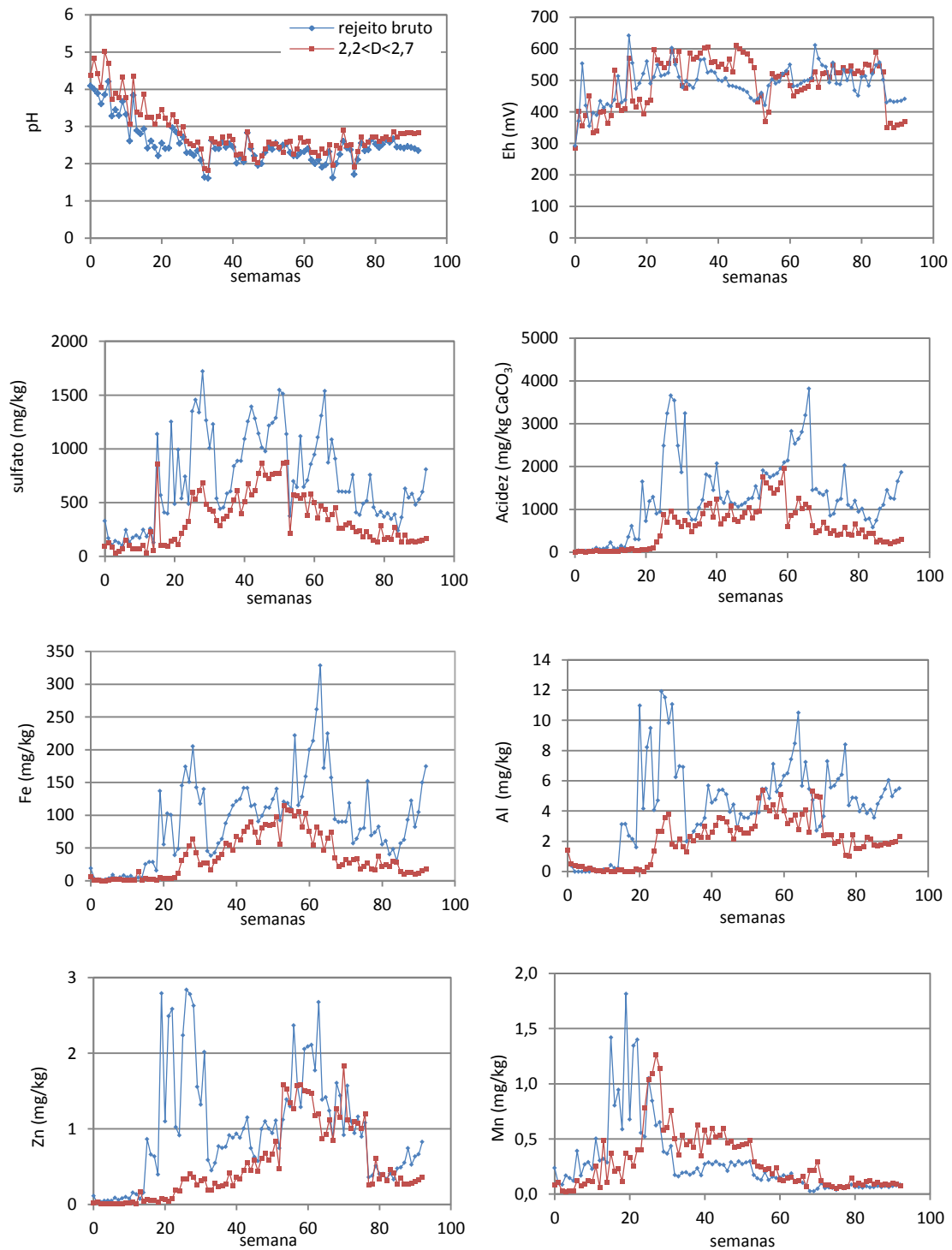


Figura 15. Qualidade da água lixiviada em termos de pH, Eh, sulfatos, acidez, metais (Fe total, Al, Mn e Zn) em função do tempo (92 semanas) no ensaio nas células úmidas.

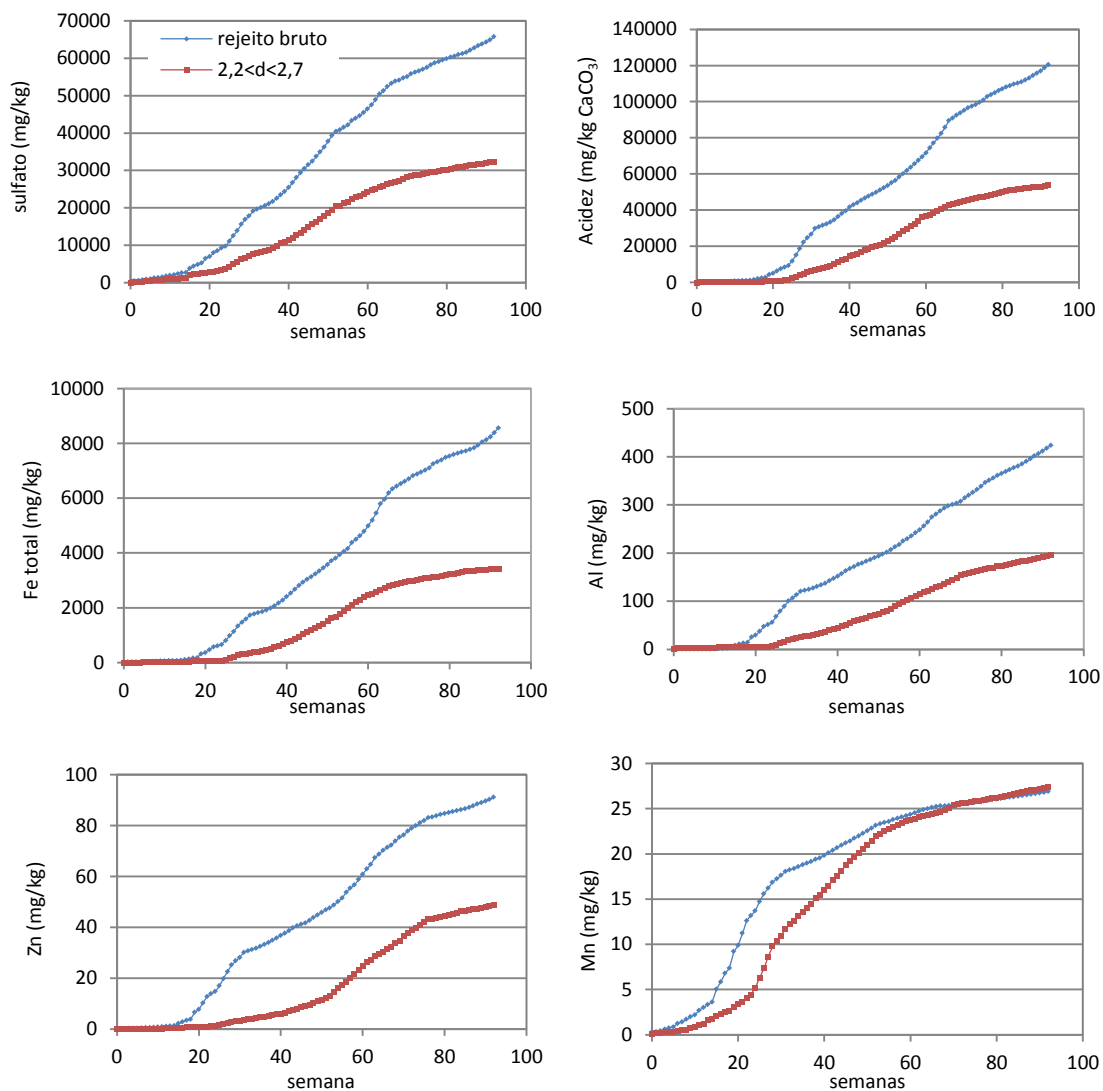


Figura 16. Quantidade lixiviada de sulfato, acidez e metais (Fe total, Al, Mn e Zn) em função do tempo (92 semanas) no ensaio nas células úmidas.

A partir desses dados, construiu-se uma tabela comparativa da quantidade total de metais, acidez e sulfato liberados em solução lixiviada após 92 semanas de ensaio (Tabela 9). É possível observar uma grande redução na liberação de metais, acidez e sulfatos entre as duas amostras. As curvas de acidez foram integradas, e os resultados mostram que, no período de 92 semanas, a acidez liberada pela amostra da fração intermediária foi de apenas 45% da emitida pelo material original (redução de 55%). Essa análise permite expressar a menor demanda de agente alcalino necessária para neutralizar a acidez do sistema (que possui baixo pH e presença de metais hidrolisáveis).

Contudo, o maior benefício da remoção de sulfetos do rejeito bruto 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 remoção de 98% de enxofre presente na célula do material intermediário. Logo, este período foi suficiente para que ocorresse praticamente toda a oxidação e lixiviação da pirita contida, diferente da célula contendo o rejeito bruto, onde apenas 65% da pirita foi oxidada.

Tabela 9. Comparação dos resultados das análises de lixiviado acumuladas do rejeito bruto e fração intermediária.

	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 <sub>3</sub> )	120.568	53.682	55
Sulfato (mg/kg)	65.746	32.289	51

Analisou-se, por fim, a correlação entre a temperatura do meio e a acidez. A Figura 17 mostra a acidez liberada em função da temperatura média semanal.

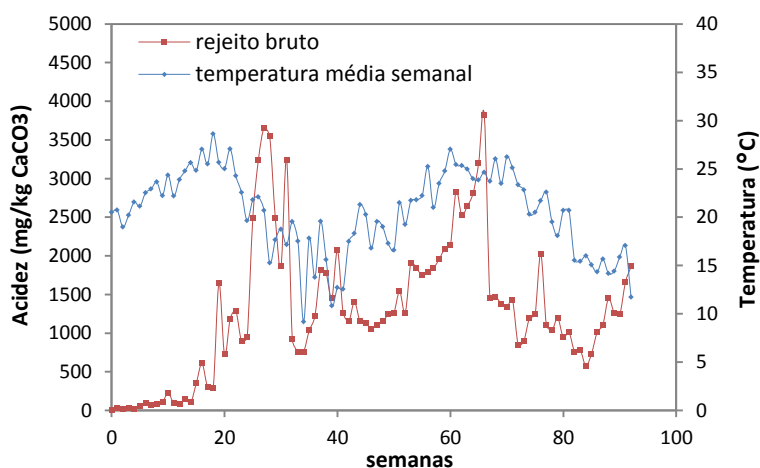


Figura 17. Acidez liberada do rejeito bruto em função da temperatura média semanal durante as 92 semanas monitoradas no ensaio cinético por células úmidas.

O gráfico mostra que os picos de acidez liberada pelo rejeito bruto coincidem aproximadamente com os períodos mais quentes (verão). Isso pode ser explicado pelo aumento da atividade das bactérias *A. ferrooxidans*, pois a temperatura ótima de crescimento das mesmas corresponde a 30°C (Lundgren *et al.*, 1972). No primeiro pico observa-se uma defasagem, provavelmente pelo fato de que a população microbiana não

está totalmente estabelecida. Já 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 foram 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).

#### 4.3. TRATAMENTO DA DAM EM ESCALA LABORATORIAL

No tratamento da DAM em laboratório, o consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  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 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 10. Em ambos os tratamentos, os parâmetros analisados estão enquadrados nos limites de emissão da Resolução CONAMA 430/11.

Tabela 10. 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
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	2794	1739	1147	851	n/a

n/a: não aplicável

#### 4.4. CUSTO 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  $\text{m}^3$  desta DAM. Na Tabela 11 são apresentados os custos relativos ao atual cenário e ao cenário projetado com o trabalho proposto (Figura 18).



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 são referentes ao agente empregado no processo da correção do pH.

Tabela 11. Custo atual e projetado em reagente alcalino - ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) - 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 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	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	

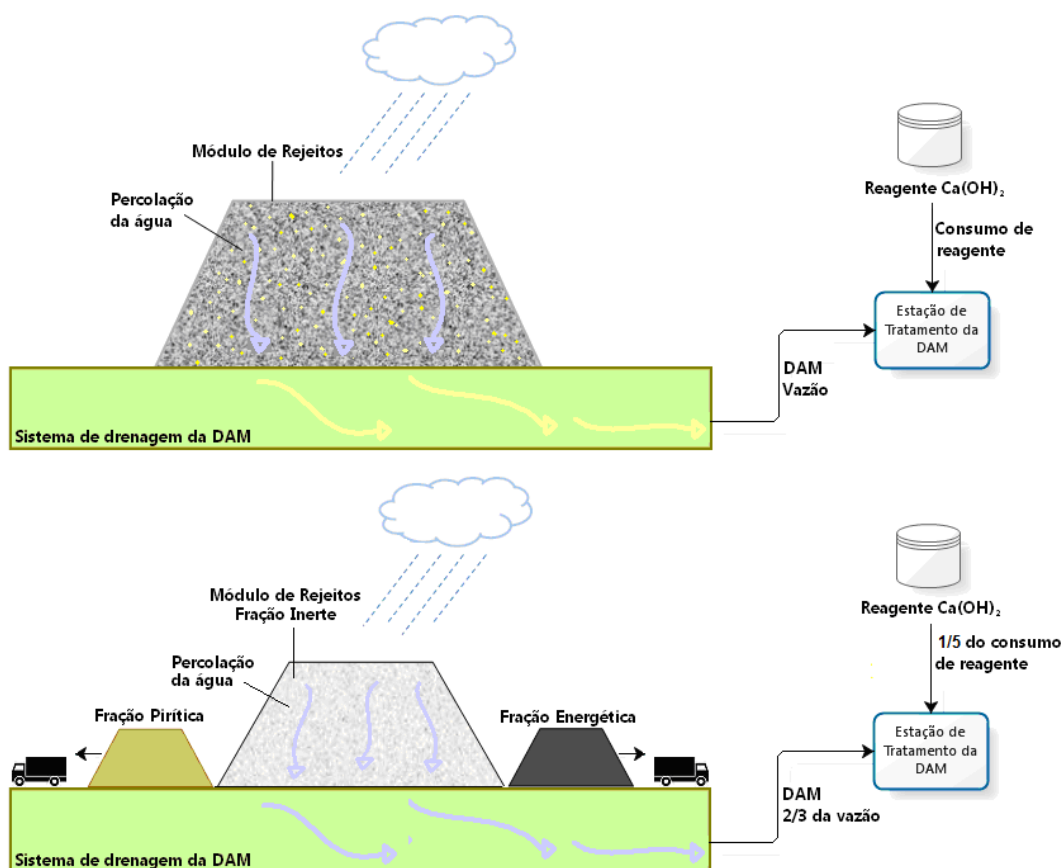


Figura 18. Sistema produtivo tradicional (acima) e sistema produtivo alternativo (abaixo) para recuperação de produtos.

## 5. CONCLUSÕES

Com beneficiamento gravimétrico de rejeitos de carvão por meio denso foi possível obter:

(a) um produto com maior teor de matéria carbonosa, que corresponde a 14% em massa do rejeito bruto, com potencial uso energético;

(b) uma fração rica em pirita, com 17% em massa, que pode ser utilizada na fabricação de ácido sulfúrico e/ou sais e óxidos de ferro;

(c) e um material inerte rico em silicatos e com baixo teor de enxofre, que corresponde a 69% da massa, com um potencial de geração de acidez aproximadamente 90% inferior ao do rejeito bruto.

A remoção dos sulfetos e da fração carbonosa permite uma redução de 1/3 da massa de rejeitos. O material com densidade entre 2,2 e 2,7 gera uma quantidade de acidez equivalente a no mínimo 1/5 do rejeito bruto. Os resultados indicam que a abordagem utilizada no trabalho minimiza a carga poluidora lançadas nas bacias hidrográficas da região em 87%. Ainda, no tratamento do efluente proveniente do rejeito processado, há uma redução significativa no consumo de reagente alcalino, e conseqüentemente nos custos envolvidos nas estações de tratamento da DAM.

A aplicação deste estudo na mineração de carvão pode proporcionar um melhor aproveitamento dos recursos minerais, sendo possível reduzir a massa de rejeitos, os riscos ambientais, os custos associados ao controle e tratamento da drenagem ácida de minas e, ainda, obter produtos com valor comercial agregado. O trabalho vai ao encontro dos atuais conceitos envolvendo tecnologias mais limpas, dentre as quais se relacionam o uso racional dos recursos minerais, atualização tecnológica dos processos para separação e concentração mineral, conservação de energia e de recursos naturais e desenvolvimento sustentável na mineração, aliados aos benefícios econômicos para as empresas do setor.

O processamento dos rejeitos pode ser realizado em circuitos de beneficiamento gravimétricos já existentes na região de estudo, com benefícios econômicos e ambientais obtidos pela utilização de métodos mais sustentáveis na mineração. Entretanto, cabe ressaltar que a aplicação efetiva destes conceitos necessita superar barreiras para se tornar viável, passando necessariamente por mudanças tecnológicas, gerenciais, estruturais e culturais de todas as partes interessadas – sociedade, empresas e poder público.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizou a avaliação ambiental comparativa entre o rejeito bruto e a fração com densidade intermediária levando em consideração somente os aspectos da caracterização do resíduo e da predição da DAM, através de ensaios estáticos e cinéticos. Contudo, para uma avaliação mais ampla, sugere-se para um trabalho futuro o estudo de avaliação do ciclo de vida das amostras, para verificar o impacto desta abordagem em diversos níveis de abrangência.

Sugere-se, ainda, avaliação econômica completa, levando em conta, por exemplo, os aspectos envolvidos no processo de separação densimétrica por ferrossilício.

## REFERÊNCIAS

AMARAL FILHO, J.R. Avaliação Ambiental e do Potencial de Aproveitamento de um Módulo de Rejeitos de Carvão na Região Carbonífera de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 90 p., 2009.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21. Ed. Washington D.C: APHA/AWWA/ WEF, 2005. 1134p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. ASTM D-5744: Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell. 1996, 13p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM D-5865: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. 2004, 9p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. Standard Test Method for Forms of Sulfur in Coal. ASTM D-2492. 2007, 5p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Carvão Mineral – Determinação do Teor de Cinza. NBR 8289. Rio de Janeiro, 4p., 1983a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Carvão Mineral

- Determinação do Teor de Matéria Volátil. NBR 8290. Rio de Janeiro, 3p., 1983b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Carvão Mineral – Determinação de Umidade. NBR 8293. Rio de Janeiro, 6p., 1983c.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Resíduos Sólidos – Classificação. NBR 10.004. Rio de Janeiro, 77p., 2004a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Lixiviação de resíduos – procedimento. NBR 10005. Rio de Janeiro, 16p., 2004b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Solubilização de resíduos – procedimento. NBR 10006. Rio de Janeiro, 3p., 2004c.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Amostragem de resíduos sólidos. NBR 10.007. Rio de Janeiro, 25p., 2004d.
- BAAS, L. W. Cleaner production: beyond projects. *Journal of Cleaner Production*, Great Britain, v. 3, p. 55-59, 1995.
- BARBOSA, R.; LAPA, N.; BOAVIDA, D.; LOPES, H.; GULYURTLU, I.; MENDES, B. Co-combustion of coal and sewage sludge: Chemical and ecotoxicological properties of ashes. *Journal of Hazardous Materials*, V. 170, p. 902–909, 2009.
- BARRETO, Maria Laura. Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2007.
- BRASIL. Decreto Federal nº 85.206, de 25 de setembro de 1980. Altera o artigo 8º do Decreto nº 76.389, de 3 de outubro de 1975, que dispõe sobre as medidas de prevenção e controle da poluição Industrial. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-85206-25-setembro-1980-434622-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 15/12/2014.
- CASSEMIRO, Eliane; ROSA, Luciano; CASTRO NETO, José Luís de. O passivo ambiental da região carbonífera do sul de santa catarina, 2004. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004\\_Enegep1004\\_0433.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep1004_0433.pdf)>. Acesso em: 18/10/2014.

CETESB & UNEP. Status report: Cleaner Production in Latin America and The Caribbean. Paris: UNEP; São Paulo: CETESB, 68 p., 2002.

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

COLLING, A.V.; MENEZES, J.C.S.S.; SCHNEIDER, I.A.H. Bioprocessing of pyrite concentrate from coal tailings for the production of the coagulant ferric sulphate. *Minerals Engineering*, v.24, p.1185-1187, 2011.

CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 9 p. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol\\_lanceflue\\_30e31mar11.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol_lanceflue_30e31mar11.pdf)>. Acesso em: 15/12/14.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Acid Mine Drainage Prediction. EPA 530-R-94-036. 48p., 1994. (Technical Document).

FARFÁN, J.R.J. Zumarán. Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral/ J.R.J. Zumarán Farfán; O. Barbosa Filho; V.P. de Souza. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

HAIBIN, L; ZHENLING, L. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. *Resources, Conservation and Recycling* n.54, p.1331-1340, 2010.

GALATTO, S.L.; LOPES, R.P.; BACK, A.J.; BIF, D. Z.; SANT, E.L. Emprego de coberturas secas no controle da drenagem ácida de minas – estudos em campo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 12, n. 2, p. 229-236, 2007.

HILSON, G. Defining “Cleaner Production” and “Pollution Prevention” in the mining context. *Minerals Engineering*, n.16, p.305-321, 2003.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; MACHADO, G.; MEXIAS, A.; SILVA, M.; WILLETT, J.; FINKELMANN, R.; BURGER, H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal geology*, v.68, p.79–116, 2006.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; MEXIAS, A.; BALBINOT, M.; LEVANDOWSKI, J.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. 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.

KOMNITSAS K, PASPALIARIS I, ZILBERCHMIDT M e GROUDEV S. Environmental Impacts at Coal Waste Disposal Sites - Efficiency of Desulfurization Technologies. *Global Nest: The International Journal*, p.109-116, 2001.

KONTOPOULOS, A. Acid Mine Drainage Control. In: CASTRO, S.H. et alii. (Eds.). *Effluent Treatment in the Mining Industry Chile: University of Concepción*, p.57-118, 1998.

KOPEZINSKI, I. Mineração x Meio Ambiente: Considerações Legais, Principais Impactos Ambientais e seus Processos Modificadores, Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 103 p., 2000.

KRISHNAN, R.P; ANTHONY, J.; RAJAVEL, M.; SRINIVASAN, S.V.; RAO, A.V.J. Combustion of high ash Indian coals in a fluidized bed combustor. *Fuel*, V. 70, n. 10, p. 1125–1135, 1991.

LEONARD, J. W. Coal Preparation. 4th edition, Leonard JW (ed.) The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., Nova York, EUA, cap.9-10, 1979.

LI, X.G.; MA B.G; XU L.; HU Z.W.; WANG X.G. 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.; LV, Y.; MA, B.G.; JIAN, S.W.; TAN, H.B. Thermogravimetric investigation on co-combustion characteristics of tobacco residue and high-ash anthracite coal. *Bioresource Technology*. V. 102, p. 9783–9787, 2011.

MCLELLAN, B.C.; CORDER, G.D., GIURCO, D., GREEN, S. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – Review and analysis of current approaches. *Journal of Cleaner Production*, n.17, p.1414-1425, 2009.

MENEZES, J.C.S.S, Produção de Coagulantes Férricos na Mineração de Carvão. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Metais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS,

2009.

MILLER, B. G. Coal Energy Systems. Estados Unidos: Elsevier, 542p., 2005.

MONTEIRO, K. V.; ORTIZ, L.; MARCUZZO, S. F.; FONSECA, J.; BARCELLOS, C.; SANTOS, T.; BACKES, P. Carvão: o combustível de ontem. Porto Alegre: Núcleo amigos da Terra Brasil, 2004. Disponível em: <[www.natbrasil.org.br/Docs/carvao\\_combustiveldeontem.pdf](http://www.natbrasil.org.br/Docs/carvao_combustiveldeontem.pdf)>. Acesso em 02/12/14.

MUTHURAMAN, M.; NAMIOKA, T.; YOSHIKAWA, K. 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.

PIVA, R.B. Economia ambiental sustentável: os combustíveis fósseis e as alternativas energéticas. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 81p., 2010.

REDDICK, J.F.; BLOTTNITZ, H. VON; KOTHUIS, B. 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.

SAPSFORD DJ, BOWELL RJ & WILLIAMS KP. Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage. Minerals Engineering, 22:25-36, 2009.

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

SIECESC. Comunicação Eletrônica via e-mail, 2011.

SIECESC – Sindicato Das Indústrias Extratoras de Carvão do Estado de Santa Catarina (2013) Dados estatísticos. Disponível em: <http://www.satc.edu.br/siecesc/estatistica.asp>. Acesso em: 02/12/2014.

SILVA, R.A.; CASTRO, C.D.; VIGÂNICO, E.M.; PETTER, C.O.; SCHNEIDER, I.A.H. Selective precipitation/UV production of magnetite particles obtained from the iron recovered from acid mine drainage. *Minerals Engineering*, v. 29, p.22-27, 2012.

SILVEIRA, A.N.; SILVA, R.D.R.; RUBIO, J. 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.

SOARES, A.B., UBALDO, M.O., SOUZA, V.P., SOARES, P.S.M., BARBOSA, M.C., MENDONÇA, M.G. 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.; SANTOS, M. D. C.; POSSA, M. V. (Comp.). *Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 243-272.

SOBEK, A. A., SCHULLER, W. A., FREEMAN, J. R., SMITH, R. M. *Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils*, EPA 600/2-78-054,1978. 203 p.

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

TOCCHETTO, Marta Regina Lopes. *Gerenciamento de resíduos industriais*. Departamento de Química – CCNE, Curso de Química Industrial - UFSM. 97 p., 2005.

VIGÂNICO, E.M.; COLLING, A.V.; SILVA, R.A.; SCHNEIDER, I.A.H. Biohydrometallurgical/UV production of ferrous sulphate heptahydrate crystals from pyrite present in coal tailings. *Minerals Engineering*, v. 24, p. 1146-1148, 2011.

WOO - *World Oil Outlook*. Vienna: OPEC Secretariat, 2010. Disponível em: <[http://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/downloads/publications/WOO\\_2010.pdf](http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2010.pdf)>. Acesso em 10 de jan. 2010.



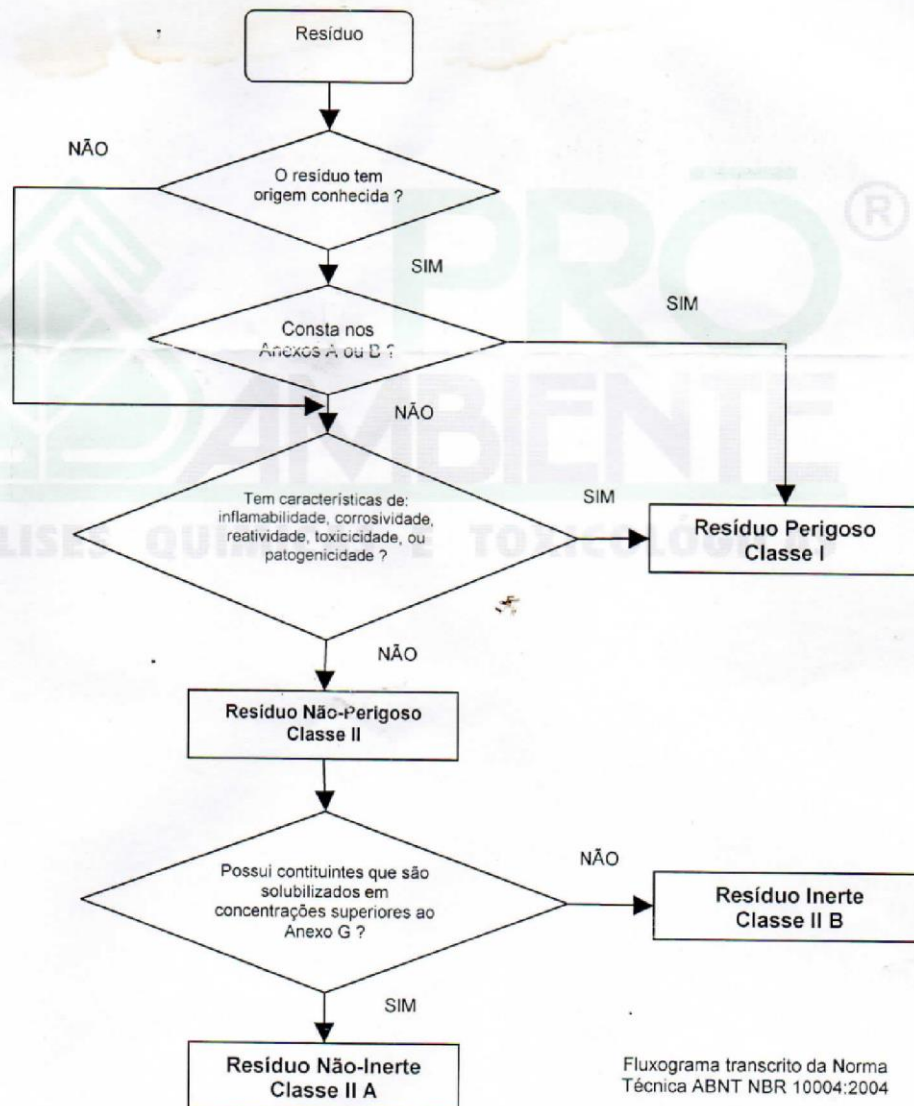
ANEXO 1 – Laudo de Classificação do Rejeito Bruto Conforme NBR 10.004.

**LAUDO TÉCNICO DE CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO**

**1 Objetivo**

Classificar resíduo sólido quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente, aplicando para tal a Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

**2 Metodologia de Caracterização e Classificação de Resíduos**




### **3 Informações sobre o Resíduo**

#### 3.1 Empresa Geradora e Dados Cadastrais

Razão Social: **FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT**  
C.N.P.J. : **92.971.845/0001-42**  
Endereço: **Avenida Bento Gonçalves, nº 9500**  
Município / Estado: **Porto Alegre / RS**

#### 3.2 Denominação do Resíduo

#### **REJEITO DE CARVÃO**

#### 3.3 Processo Gerador, Matérias-Primas e Insumos Envolvidos

Rejeito gerado no beneficiamento gravimétrico meio denso ferro silício.

### **4 Enquadramento como Resíduo Perigoso de Fontes Específicas e Não-Específicas**

De acordo com a natureza do resíduo, o mesmo não é enquadrável diretamente nos Anexos A e B da Norma Técnica ABNT NBR 10.004:2004.

### **5 Amostragem**

5.1 *Data da Coleta:* Não informada pelo cliente.

5.2 *Data de Registro da Amostra no Laboratório:* 02.09.2011 (Registro 9587)

5.3 *Segregação, Forma de Acondicionamento e Armazenamento do Resíduo no Gerador*  
Material armazenado em bombona de 100 litros.

5.4 *Aspecto da Amostra*

Sólido, homogêneo, fragmentado, cinza e inodoro.

5.5 *Procedimento de Amostragem*

Conforme NBR 10007:2004.

5.6 *Responsável Técnico pela Amostragem*

Sra. Viviana Nedel Reckziegel – CREA RS 167211.



## 6 Análises de Composição Química do Resíduo

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra
pH (mistura 1:1 em água)	-	7,1
Umidade	(%)	1,1
Matéria Orgânica	(%)	20,1
Cinzas	(%)	78,8
Sulfeto (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Cianeto (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Mercurio (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Chumbo (base seca)	(mg/kg)	4,1
Cromo (base seca)	(mg/kg)	5,7
Níquel (base seca)	(mg/kg)	4,4
Cádmio (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Extraíveis em Hexano (base seca)	(%)	0,4
Hidrocarbonetos Totais (base seca)	(mg/kg)	313,6

## 7 Avaliação de Corrosividade

A mistura da amostra de resíduo com água, na proporção de 1:1 em peso, apresentou pH igual a 7,1, caracterizando caráter alcalino discreto. O pH não se insere na faixa alcalina que indica corrosividade (pH superior a 12,5), conforme o item 4.2.1.2 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

## 8 Avaliação de Reatividade

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem reatividade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.3 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

## 9 Avaliação de Inflamabilidade

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem inflamabilidade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.1 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

## 10 Avaliação de Patogenicidade

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem patogenicidade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.5 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.



## 11 Avaliação de Toxicidade

### 11.1 Presença de Substâncias que Conferem Periculosidade ao Resíduo

A amostra do resíduo não apresentou concentração significativa de substâncias ou elementos que conferem periculosidade aos resíduos, listados no Anexo C da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

### 11.2 Presença de Substâncias Tóxicas e Agudamente Tóxicas

A amostra do resíduo não é constituída por restos de embalagens, nem por materiais resultantes de derramamentos, nem por produtos fora de especificação ou de validade. Assim, não é enquadrável como resíduo que contém substâncias agudamente tóxicas (Anexo D da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004) ou substâncias tóxicas (Anexo E da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004).

### 11.3 Resultados do Ensaio de Lixiviação (conforme a NBR 10.005:2004)

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra	Limites Máximos (NBR-10.004)
<i>Inorgânicos</i>			
Arsênio	(mg/L)	ND*	1,0
Bário	(mg/L)	ND*	70,0
Cádmio	(mg/L)	ND*	0,5
Chumbo	(mg/L)	ND*	1,0
Cromo Total	(mg/L)	ND*	5,0
Mercúrio	(mg/L)	ND*	0,1
Fluoreto	(mg/L)	ND*	150,0
Prata	(mg/L)	ND*	5,0
Selênio	(mg/L)	ND*	1,0

ND\* = Não Detectado



LCR 9587/11 (página 5 de 5)

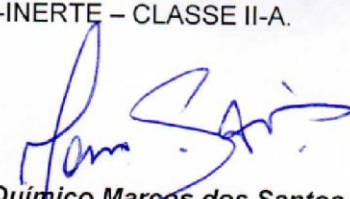
**12 Resultados do Ensaio de Solubilização (conforme a NBR 10.006:2004)**

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra	Limites Máximos (NBR-10.004)
Fenóis Totais	(mg/L)	ND*	0,001
Mercurio	(mg/L)	ND*	0,001
Arsênio	(mg/L)	ND*	0,01
Bário	(mg/L)	ND*	0,7
Cádmio	(mg/L)	ND*	0,005
Chumbo	(mg/L)	ND*	0,01
Cromo Total	(mg/L)	ND*	0,05
Alumínio	(mg/L)	0,3	0,2
Ferro	(mg/L)	0,6	0,3
Manganês	(mg/L)	0,1	0,1
Sódio	(mg/L)	45,4	200,0
Zinco	(mg/L)	ND*	5,0
Cobre	(mg/L)	ND*	2,0
Prata	(mg/L)	ND*	0,05
Selênio	(mg/L)	ND*	0,01
Cianeto	(mg/L)	ND*	0,07
Fluoreto	(mg/L)	ND*	1,5
Nitrato	(mg/L)	0,1	10,0
Cloreto	(mg/L)	38,7	250,0
Sulfato	(mg/L)	57,8	250,0
Surfactantes	(mg/L)	ND*	0,5

ND\* = Não Detectado

**13 Parecer Final de Classificação**

De acordo com as prescrições da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004, o resíduo objeto deste Laudo Técnico é classificado como RESÍDUO NÃO-INERTE – CLASSE II-A.

  
Eng. Químico Marcos dos Santos Aidos  
CREA RS 81632  
CRQ 5ª Região 132091850

P.S.: O presente laudo é válido enquanto persistirem a origem, a natureza e a composição química do resíduo. Quaisquer alterações tecnológicas no processo de geração e/ou mudanças nas matérias-primas e insumos envolvidos no processo gerador, a análise deverá ser repetida, de forma a garantir a sua confiabilidade técnica.

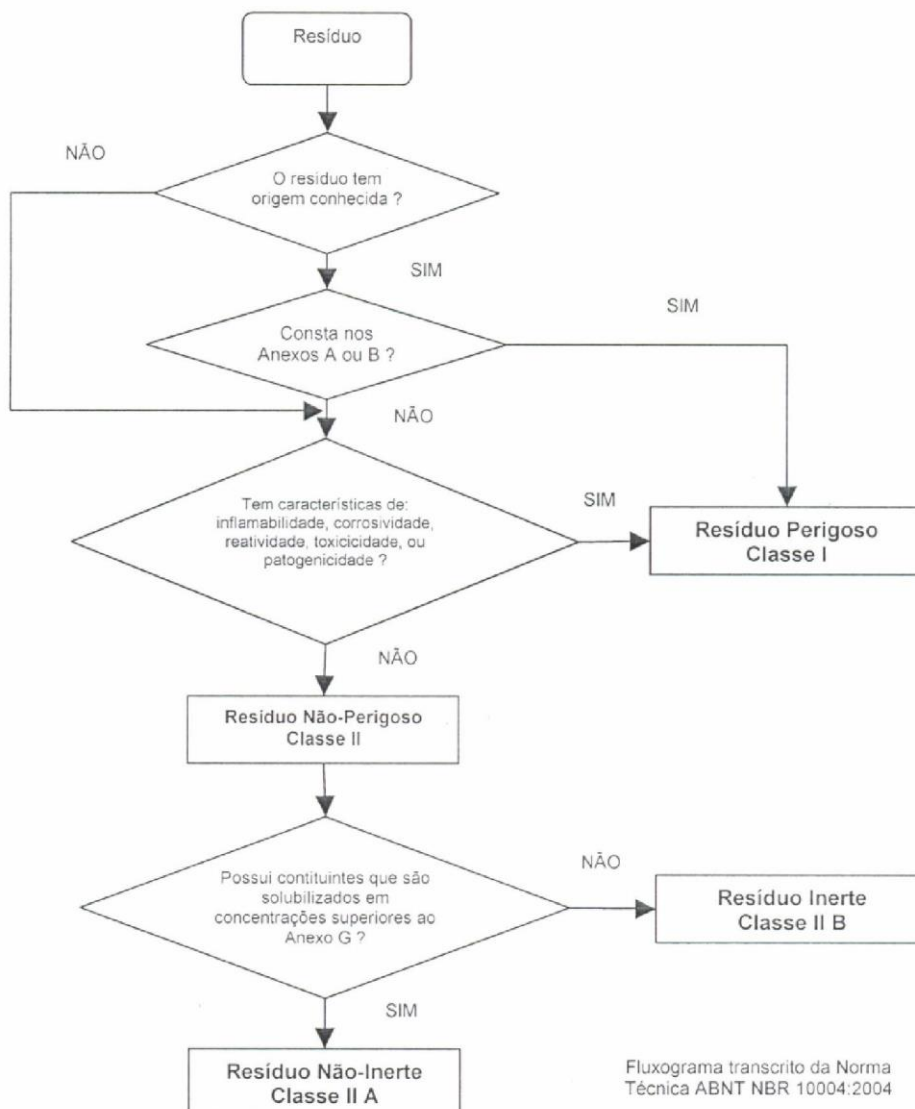
ANEXO 2 – Laudo de Classificação da Fração Intermediária Conforme NBR 10.004.

## LAUDO TÉCNICO DE CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO

### 1 Objetivo

Classificar resíduo sólido quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente, aplicando para tal a Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

### 2 Metodologia de Caracterização e Classificação de Resíduos






LCR 11591/11 (página 2 de 5)

### **3 Informações sobre o Resíduo**

#### 3.1 Empresa Geradora e Dados Cadastrais

Razão Social: **FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT**  
C.N.P.J. : **92.971.845/0001-42**  
Endereço: **Avenida Bento Gonçalves, nº 9500**  
Município / Estado: **Porto Alegre / RS**

#### 3.2 Denominação do Resíduo

**REJEITO DE CARVÃO + 2,2 – 2,7**

#### 3.3 Processo Gerador, Matérias-Primas e Insumos Envolvidos

Rejeito gerado no beneficiamento gravimétrico meio denso ferro silício.

### **4 Enquadramento como Resíduo Perigoso de Fontes Específicas e Não-Específicas**

De acordo com a natureza do resíduo, o mesmo não é enquadrável diretamente nos Anexos A e B da Norma Técnica ABNT NBR 10.004:2004.

### **5 Amostragem**

5.1 *Data da Coleta:* Não informada pelo cliente.

5.2 *Data de Registro da Amostra no Laboratório:* 28.10.2011 (Registro 11591)

5.3 *Segregação, Forma de Acondicionamento e Armazenamento do Resíduo no Gerador*

Material armazenado em bombona de 100 litros.

5.4 *Aspecto da Amostra*

Sólido, homogêneo, fragmentado, cinza e praticamente inodoro.

5.5 *Procedimento de Amostragem*

Conforme NBR 10007:2004.

5.6 *Responsável Técnico pela Amostragem*

Engº Ambiental Juarez Amaral Filho.



## 6 Análises de Composição Química do Resíduo

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra
pH (mistura 1:1 em água)	-	7,6
Umidade	(%)	0,6
Matéria Orgânica	(%)	10,2
Cinzas	(%)	89,2
Sulfeto (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Cianeto (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Mercurio (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Chumbo (base seca)	(mg/kg)	1,5
Cromo (base seca)	(mg/kg)	2,9
Níquel (base seca)	(mg/kg)	9,4
Cádmio (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Extraíveis em Hexano (base seca)	(%)	0,03
Hidrocarbonetos Totais (base seca)	(mg/kg)	35,9

## 7 Avaliação de Corrosividade

A mistura da amostra de resíduo com água, na proporção de 1:1 em peso, apresentou pH igual a 7,6, caracterizando caráter alcalino discreto. O pH não se insere na faixa alcalina que indica corrosividade (pH superior a 12,5), conforme o item 4.2.1.2 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

## 8 Avaliação de Reatividade

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem reatividade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.3 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

## 9 Avaliação de Inflamabilidade

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem inflamabilidade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.1 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

## 10 Avaliação de Patogenicidade

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem patogenicidade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.5 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.



## 11 Avaliação de Toxicidade

### 11.1 Presença de Substâncias que Conferem Periculosidade ao Resíduo

A amostra do resíduo não apresentou concentração significativa de substâncias ou elementos que conferem periculosidade aos resíduos, listados no Anexo C da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

### 11.2 Presença de Substâncias Tóxicas e Agudamente Tóxicas

A amostra do resíduo não é constituída por restos de embalagens, nem por materiais resultantes de derramamentos, nem por produtos fora de especificação ou de validade. Assim, não é enquadrável como resíduo que contém substâncias agudamente tóxicas (Anexo D da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004) ou substâncias tóxicas (Anexo E da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004).

### 11.3 Resultados do Ensaio de Lixiviação (conforme a NBR 10.005:2004)

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra	Limites Máximos (NBR-10.004)
<i>Inorgânicos</i>			
Arsênio	(mg/L)	ND*	1,0
Bário	(mg/L)	ND*	70,0
Cádmio	(mg/L)	ND*	0,5
Chumbo	(mg/L)	ND*	1,0
Cromo Total	(mg/L)	ND*	5,0
Mercúrio	(mg/L)	ND*	0,1
Fluoreto	(mg/L)	ND*	150,0
Prata	(mg/L)	ND*	5,0
Selênio	(mg/L)	ND*	1,0

ND\* = Não Detectado



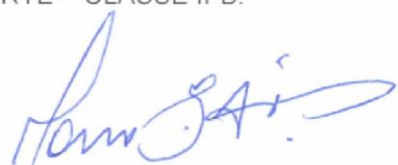
**12 Resultados do Ensaio de Solubilização (conforme a NBR 10.006:2004)**

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra	Limites Máximos (NBR-10.004)
Fenóis Totais	(mg/L)	ND*	0,001
Mercúrio	(mg/L)	ND*	0,001
Arsênio	(mg/L)	ND*	0,01
Bário	(mg/L)	ND*	0,7
Cádmio	(mg/L)	ND*	0,005
Chumbo	(mg/L)	ND*	0,01
Cromo Total	(mg/L)	ND*	0,05
Alumínio	(mg/L)	ND*	0,2
Ferro	(mg/L)	0,1	0,3
Manganês	(mg/L)	ND*	0,1
Sódio	(mg/L)	28,0	200,0
Zinco	(mg/L)	ND*	5,0
Cobre	(mg/L)	ND*	2,0
Prata	(mg/L)	ND*	0,05
Selênio	(mg/L)	ND*	0,01
Cianeto	(mg/L)	ND*	0,07
Fluoreto	(mg/L)	ND*	1,5
Nitrato	(mg/L)	ND*	10,0
Cloreto	(mg/L)	14,4	250,0
Sulfato	(mg/L)	51,9	250,0
Surfactantes	(mg/L)	ND*	0,5

ND\* = Não Detectado

**13 Parecer Final de Classificação**

De acordo com as prescrições da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004, o resíduo objeto deste Laudo Técnico é classificado como RESÍDUO INERTE – CLASSE II-B.



Eng. Químico Marcos dos Santos Aidos  
 CREA RS 81632  
 CRQ 5ª Região 132091850

P.S.: O presente laudo é válido enquanto persistirem a origem, a natureza e a composição química do resíduo. Quaisquer alterações tecnológicas no processo de geração e/ou mudanças nas matérias-primas e insumos envolvidos no processo gerador, a análise deverá ser repetida, de forma a garantir a sua confiabilidade técnica.