

## Processamento de Rejeitos de Carvão e Redução do Impacto Ambiental

Coal Waste Processing and Environmental Impact Reduction

Jéssica Weiler <sup>1,\*</sup>, Juarez Ramos do Amaral Filho <sup>2</sup>, Ivo André Homrich Schneider <sup>3</sup>

Palavras-chave:

separação gravimétrica, drenagem ácida de minas (DAM), meio ambiente

Keywords:

density separation, acid mine drainage (AMD), environment

### RESUMO

A mineração de carvão na Região Carbonífera de Santa Catarina atua com uma abordagem de fim-de-tubo. Os resíduos sólidos (rejeitos de carvão) são dispostos em módulo de rejeitos. Os efluentes líquidos (drenagem ácida de minas - DAM) são encaminhados a estações de tratamento de efluentes. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar uma alternativa de produção mais limpa do carvão, através do beneficiamento gravimétrico dos rejeitos de carvão. A metodologia do trabalho consistiu na separação gravimétrica por meio denso de uma amostra típica de rejeito de carvão, obtendo-se três frações densimétricas: (a) um material com densidade inferior a 2.2 (rico em rochas carbonosas), (b) um material com densidade entre 2.2 e 2.7 (rico em minerais inertes), e (c) um material com densidade superior a 2.7 (concentrado de pirita). Cada fração foi analisada para sua potencial aplicação. Pode-se concluir que é possível processar gravimetricamente os rejeitos de carvão, com possibilidade de aproveitamento dos materiais e redução dos impactos ambientais. Entretanto, o conceito gestão apresentado somente é possível através da quebra de paradigmas e uma mudança cultural por parte das principais partes interessadas (empresas, poder público e sociedade).

### ABSTRACT

Coal mining in Santa Catarina basin uses an end-of-pipe approach. Coal wastes are disposed in dump deposits. Acid mine drainage - AMD is treated by physical-chemical processes. The aim of this work was to use cleaner technologies to avoid environmental damages through coal waste processing. Gravity processing of coal waste was performed to obtain three different types of material: (a) low specific gravity material with relative density < 2.2 (composed by carbonaceous shale), (b) intermediate material with 2.4 < relative density < 2.7 (composed mainly by inert minerals), and (c) high specific gravity material with relative density > 2.7 (pyrite concentrate). All the material was analyzed for their potential application. The results have shown that it is feasible to process coal wastes and recover valuable materials and to reduce environmental impacts simultaneously. However, this approach can be made only through an industrial, governmental and social commitment.

<sup>1</sup> Estudante de Engenharia Ambiental da UFRGS. Telefone: (51) 8413-6295. E-mail: jéssica.weiler18@gmail.com

<sup>2</sup> Engenheiro Ambiental, M.Sc., doutorando no PPGE3M/UFRGS. Telefone: (51) 9916-7159. E-mail: juarez.amaral@ufrgs.br

<sup>3</sup> Engenheiro de Minas, Prof. Dr. DEMIN/PPGE3M/UFRGS. Telefone: (51) 9807-6670.

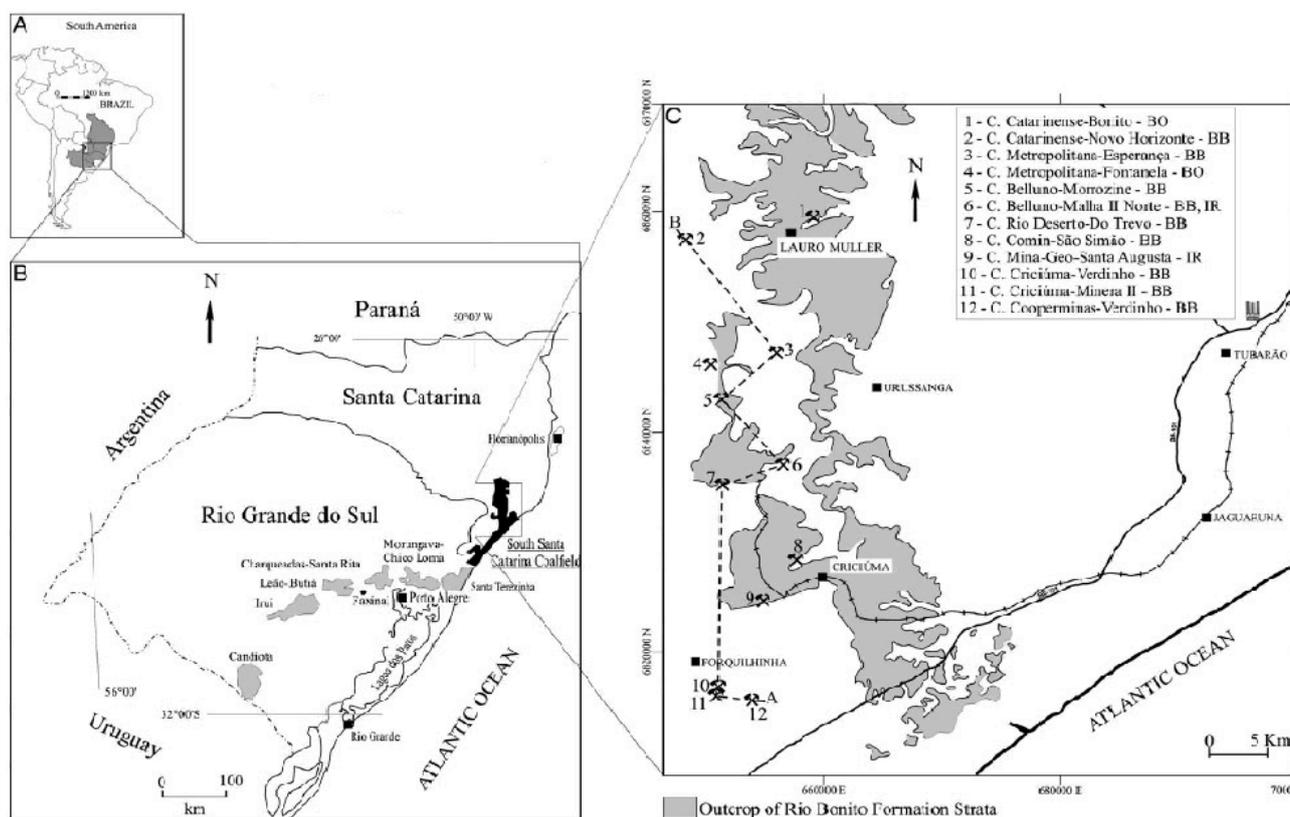
E-mail: ivo.andre@ufrgs.br

\* Autor para correspondência

## INTRODUÇÃO

O carvão mineral é uma importante matéria prima para a produção de energia. No Brasil, as reservas de carvão estão nos Estados do Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR). Mas o carvão mineral extraído contém altos teores de cinzas e níveis variados de enxofre e precisa ser beneficiado para atingir os padrões de combustão das termoelétricas (Kalkreuth *et al.*, 2006; Kalkreuth *et al.*, 2010). A Figura 1 apresenta a distribuição dos distritos carboníferos nesses Estados.

No caso específico de Santa Catarina, após o processamento mineral, aproximadamente 65% do carvão ROM (Run-of-Mine) é descartado como rejeito. Este fato é decorrente da mecanização de lavra, pequena espessura das camadas de carvão e sua intercalação com rochas sedimentares (folhelhos, siltitos e arenitos) e nódulos de pirita (sulfeto de ferro -  $FeS_2$ ). Pode-se considerar uma situação particular em relação aos carvões de outros países, que operam com menores teores de cinzas e menores proporções de rejeitos (Farias, 2002).

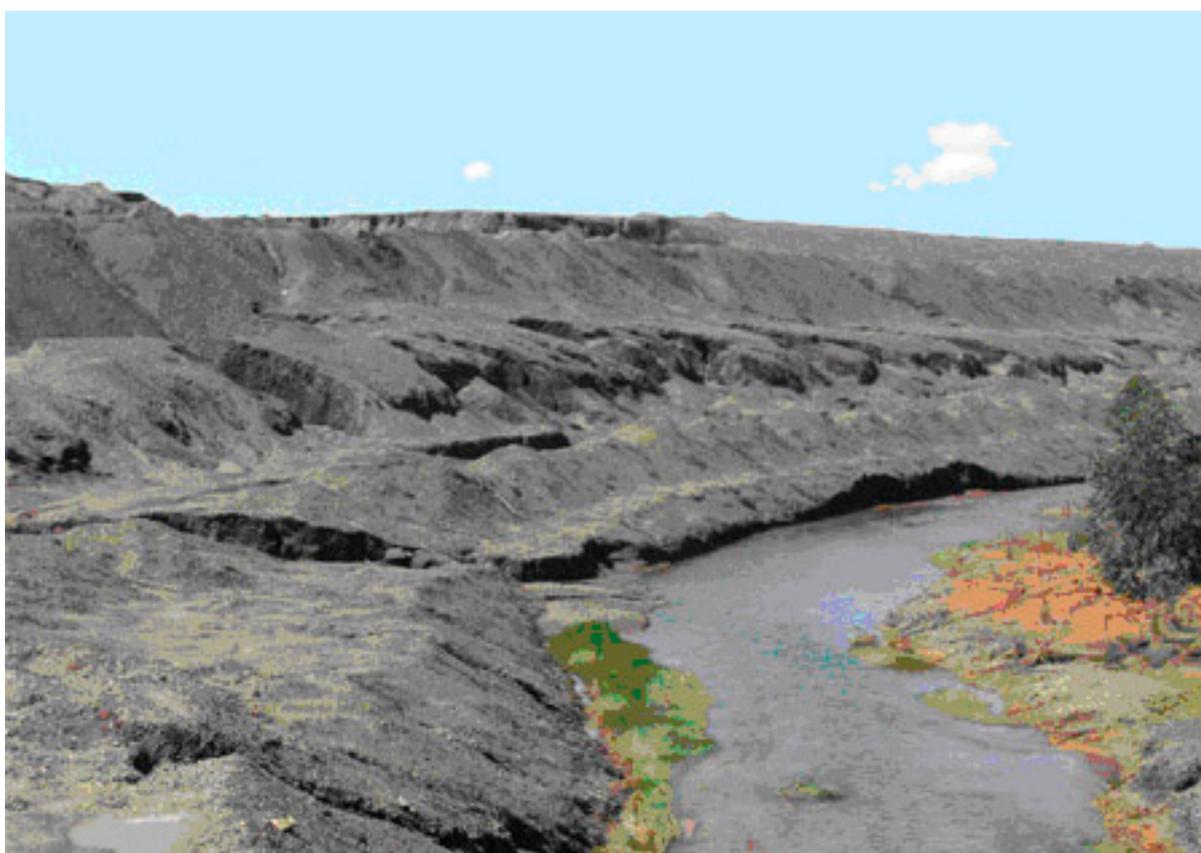


**Figura 1.** A) Localização da bacia do Paraná. B) Distribuição das regiões carboníferas no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. C) Mapa mostrando as localizações dos afloramentos do estrato Rio Bonito nos municípios de Criciúma e Lauro Müller em Santa Catarina bem como a localização das minas na região. Fonte: Kalkreuth *et al.* (2010).

**Figure 1.** A) Location of southern Paraná Basin, Brazil. B) Distribution of major coalfields in Rio Grande do Sul and Santa Catarina. C) Map showing the outcrop locations of Rio Bonito Formation strata in the Criciúma and Lauro Müller areas in Santa Catarina and the mine sites, representing locations. Source: Kalkreuth *et al.* (2010).

De acordo com Kopezinski (2000), os problemas ambientais associados à mineração de carvão em Santa Catarina estão relacionados à transformação da paisagem, ocupação de áreas de agricultura e de mata, acidificação do solo e alteração da qualidade das águas subterrâneas e superficiais. Um grave problema ambiental dos rejeitos de carvão é a geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM). A DAM é um efluente formado

pela oxidação de sulfetos metálicos, como a pirita, quando em contato com a água e o oxigênio (Kontopoulos, 1998). Devido às suas características, acarreta na mobilização e solubilização de metais pesados, sendo a principal responsável pela contaminação dos aquíferos e do solo (Farfán et al., 2004). Na Figura 2 pode-se observar o aspecto geral de um depósito de rejeitos não controlado e o corpo hídrico afetado.



**Figura 2.** Rejeitos de carvão e a drenagem ácida de mina na Região Carbonífera de Santa Catarina – Brasil. Fonte: Ministério Público Federal (2006).

**Figure 2.** Coal wastes and acid mine drainage in the Carboniferous Region of Santa Catarina – Brazil. Source: Ministério Público Federal (2006)

A massa de rejeitos está presente em 3050 hectares de passivos ambientais expostos na Bacia Carbonífera de Santa Catarina, hoje submetidas a uma série de ações envolvendo um rígido cronograma para recuperação ambiental. Somando-se a estas áreas de passivos, os depósitos de rejeitos também estão presentes nos pátios operacionais das minas em atividade na

região carbonífera, cuja superfície alcança um total de 957 hectares. Esses locais geram drenagem ácida, cujo volume proporcional tratado ainda é baixo, que acarretam na contaminação dos recursos hídricos em cerca de 786 km de rios atingidos por DAM, rios estes pertencentes às bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga (Brasil, 2008).

Segundo Kontopoulos (1998), após gerada, a DAM é um efluente de difícil controle e pode ocorrer por dezenas e até mesmo centenas de anos. Assim, a maneira mais fácil de mitigar a DAM é a sua não geração. Atualmente, as empresas do setor tratam a DAM através de sistemas ativos por neutralização/precipitação, no modelo "fim-de-tubo" (Silveira *et al.*, 2009). Entretanto, técnicas com abordagens preventivas, de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável, trazem benefícios econômicos e ambientais para as empresas de mineração. O método de isolamento/exclusão de sulfetos é uma alternativa para o controle da DAM evitando a geração previamente a sua formação (Hilson, 2003; Reddick *et al.*, 2008; McLellan *et al.*, 2009; Haibin & Zhenling, 2010).

Ainda, conforme o Plano Nacional de Mineração – 2030, o grande desafio para o setor carbonífero nacional é a produção e uso limpo do carvão mineral por meio de:

- desenvolvimento de tecnologias limpas na cadeia produtiva;
- desenvolvimento tecnológico e inovação aplicado à cadeia produtiva carbonífera, em especial para geração termelétrica, siderúrgica e carboquímica;
- desenvolvimento de tecnologias para recuperação do passivo ambiental da bacia carbonífera de Santa Catarina.

Conforme Amaral Filho (2009), com o beneficiamento gravimétrico de rejeitos de carvão, é possível se obter três distintos 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. Todavia, há uma carência de conhecimento em relação aos reflexos desta ação na minimização da geração de drenagem ácida. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo a caracterização e o aproveitamento de materiais e a minimização da geração da DAM pelo processamento de rejeitos do carvão.

No esquema da Figura 3 pode-se ter uma idéia da abordagem preventiva da técnica utilizada neste trabalho, que se baseia na reciclagem dos materiais após a separação do rejeito bruto em três densidades distintas, evitando o tratamento "fim-de-tubo" da DAM e minimizando o volume de rejeitos nos depósitos. Assim, o trabalho vai ao encontro dos atuais conceitos envolvendo tecnologias ambientais e mais limpas (Camara *et al.*, 2013), dentre as quais se relacionam o uso racional dos recursos minerais, atualização tecnológica dos processos para separação e concentração mineral, conservação de energia, conservação de recursos naturais e desenvolvimento sustentável da mineração.



**Figura 3.** Esquema do processamento de rejeitos de acordo com a abordagem preventiva da geração de DAM proposto neste trabalho  
**Figure 3.** Processing waste scheme according to the preventive AMD generation approach

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Amostra de Rejeito de Carvão

O rejeito de carvão utilizado é proveniente da etapa de jigagem, circuito de grossos (com granulometria entre 2.0 e 50.8 mm), do processo de beneficiamento de carvão mineral de uma carbonífera do Estado de Santa Catarina. A amostra foi coletada previamente a sua disposição final e então homogeneizada e quarteada conforme NBR 10007 (ABNT, 2004b).

### Beneficiamento do Rejeito de Carvão

A amostra de carvão foi processada para a separação gravimétrica do material em dois estágios em meio denso de ferrosilício (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. Para a caracterização tecnológica, as amostras foram cominuídas e peneiradas a um diâmetro máximo de 0.25 mm (Tyler #60).

### Caracterização Tecnológica dos Materiais

Para cada fração, foi realizada 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 1g 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 1g 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 Panalytical de la siembra. El extracto acuoso de compost se preparó siguiendo la metodología descrita por Gariglio *et al.* (2002). La concentración de carbono orgánico en el extracto obtenido se determinó según Golterman *et al.* (1978).

### Avaliação da geração de acidez

Para a avaliação do potencial de geração de acidez das amostras foram realizados ensaios estáticos e cinéticos de contabilização de ácidos e bases conforme descrito em Sobek *et al.* (1978), EPA (1994) e ASTM (1996).

Os ensaios estáticos foram realizados na amostra de densidade intermediária (entre 2.2 e 2.7) e na amostra de rejeito bruto. Empregou-se o método 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 pelo método ABA modificado foi realizada pela análise de enxofre pirítico, via úmida. De acordo com a estequiometria, um mol de CaCO<sub>3</sub> é requerido por mol de S, logo:

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

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:

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

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

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

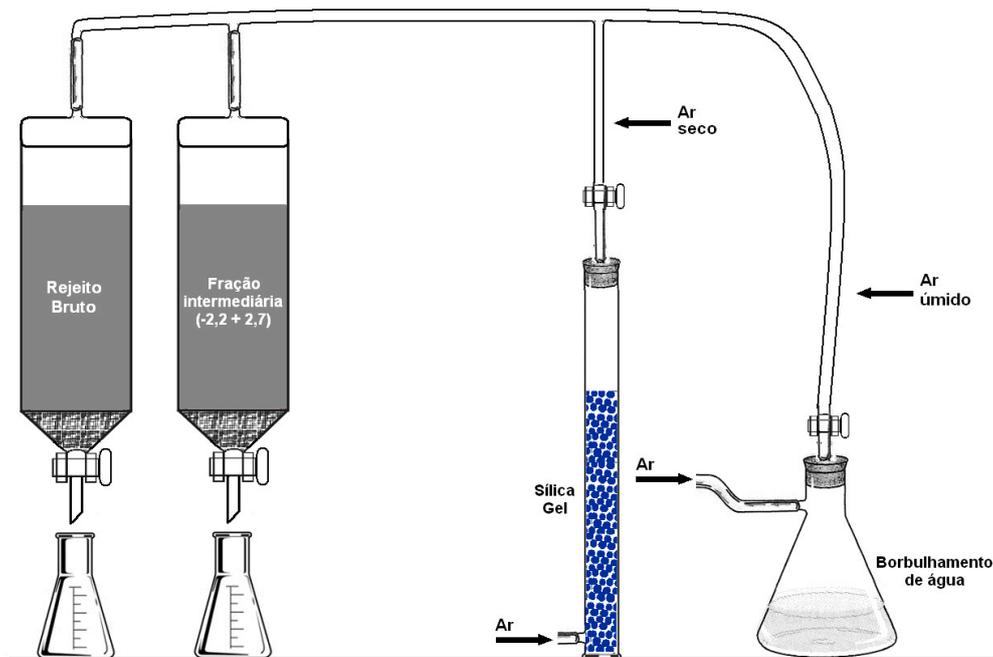
onde: C = constante; N = normalidade

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.

Os estudos cinéticos foram realizados pelo método de células úmidas, conforme procedimento ASTM D 5744 (ASTM, 1996), também nas amostras de densidade intermediária (entre 2.2 e 2.7) e de rejeito bruto. O teste consistiu em colocar uma amostra de 500 g com granulometria inferior a 6.3 mm em um frasco fechado por onde pode ser injetado e retirado ar. Inicialmente, submeteu-se a amostra a uma lixiviação com 1000 mL de água destilada por um dia e coletou-se o lixiviado para análise. Após, submeteram-se as amostras por três dias ao ar seco, três dias ao ar úmido e um dia para percolação de 500 mL água. O ciclo semanal se repetiu por todo o período de teste aplicado, que foi de 40 semanas. Nas Figuras 4 está ilustrado o equipamento utilizado no ensaio.



**Figura 4.** Esquema das células úmidas para realização de estudos de geração de acidez conforme norma ASTM D 5744 (ASTM, 1996).  
**Figure 4.** Humidity cells apparatus for acid generation studies according to ASTM D 5744 method (ASTM, 1996)

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, os valores de potencial redox foram medidos em eletrodo de prata/cloreto de prata e a acidez foi obtida por titulometria. Os metais foram analisados instrumentalmente por Absorção Atômica em um equipamento Varian AA240FS. A análise de sulfatos foi realizada por cromatografia iônica em um equipamento DIONEX-ICS3000. Todas as análises foram realizadas, semanalmente, seguindo os procedimentos do APHA (2005).

### Avaliação da periculosidade

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 10004 (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.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após os ensaios de separação gravimétrica por meio denso de ferro silício (Fe-Si), obteve-se três frações de 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 ( $d > 2.7$ ). A maior parte do rejeito (69%) está na faixa de densidade intermediária (entre 2.2 e 2.7). A Figura 5 mostra a distribuição percentual em massa de cada densidade.

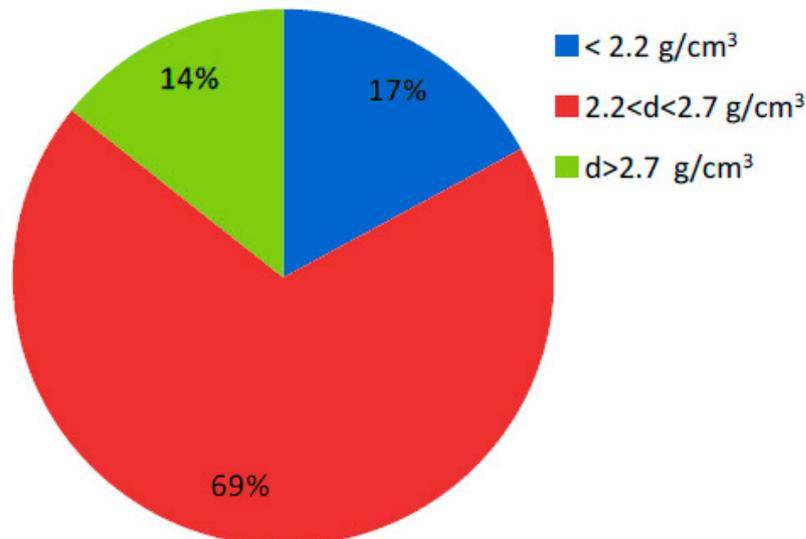


Figura 5: Porcentagem em massa de cada fração densimétrica após os ensaios de separação gravimétrica do rejeito bruto.

Figure 5: Mass department of coal discards after gravity separation

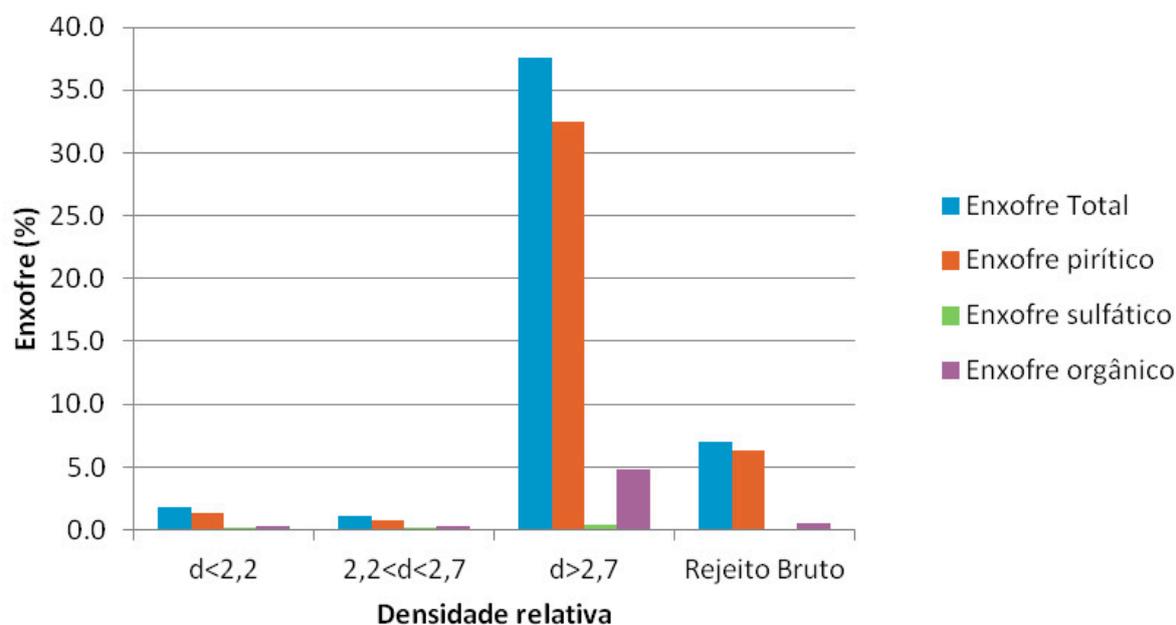
Os valores encontrados na análise imediata e elementar estão na Tabela 1. Em relação à análise elementar, pode-se observar que a fração com densidade inferior a 2.2 contém maior quantidade de carbono, nitrogênio e hidrogênio (fração energética). A fração com densidade intermediária possui a maior

quantidade de cinzas (88.3%). A fração com densidade superior a 2.7 é que apresenta o maior teor de enxofre. Essa a fração possui 37.6% de enxofre e aproximadamente 60,4% de pirita – FeS<sub>2</sub> (Figura 6).

Parâmetros	d<2.2	2.2<d<2.7	d>2.7	Rejeito Bruto
Umidade (%)	2.1	2.3	0.8	2.2
Cinzas (%)	75.8	88.3	64.8	79.3
Matéria volátil (%)	11.6	8.4	27.6	11.2
Carbono fixo (%)	10.5	1.0	6.9	7.3
Poder calorífico (cal/g)	1072	303	-	-
C (%)	16.4	3.9	8.9	8.7
H (%)	1.8	1.1	0.9	1.3
N (%)	0.5	0.3	0.3	0.3
S (%)	1.8	1.1	37.6	7.0

**Tabela 1.** Características do rejeito de carvão bruto e dos produtos obtidos após separação gravimétrica. d=densidade

**Table 1.** Characteristics of raw coal waste and the products obtained after gravity separation. d=density



**Figura 6.** Formas de enxofre da amostra de rejeito de carvão bruto e dos produtos após separação gravimétrica.

**Figure 6.** Sulfur species of raw coal waste sample and the products obtained after gravity separation.

A partir desses dados podem-se obter três cenários das frações obtidas na separação por meio denso, visando a reciclagem dos materiais.

### 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 de obter uma considerável eficiência energética utilizando leito fluidizado. Ainda, através da co-combustão de rejeitos de carvão com carvões de melhor qualidade ou ainda com outros rejeitos contendo consideráveis teores de carbono é possível se 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 ( $d < 2.2$ ),

esse material poderia ser aplicado de forma blendada com carvões de melhor qualidade em termoelétricas que aceitam 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 termelétricas de co-processamento carvão com outros resíduos industriais.

### Fração Inerte

Na Figura 7 encontram-se os resultados das análises de fluorescência de raios-X (FRX). Verifica-se um significativo aumento no teor Si e uma redução nos teores de S e Fe na fração com densidade relativa entre 2.2 e 2.7 se comparado com o rejeito bruto. Observa-se ainda um valor de ferro três vezes maior para o rejeito bruto (12.0%) quando comparado com a fração intermediária (3.9 %) e um valor de enxofre cinco vezes maior para o rejeito bruto (6.5 %) quando comparado com a fração intermediária (1.2 %).

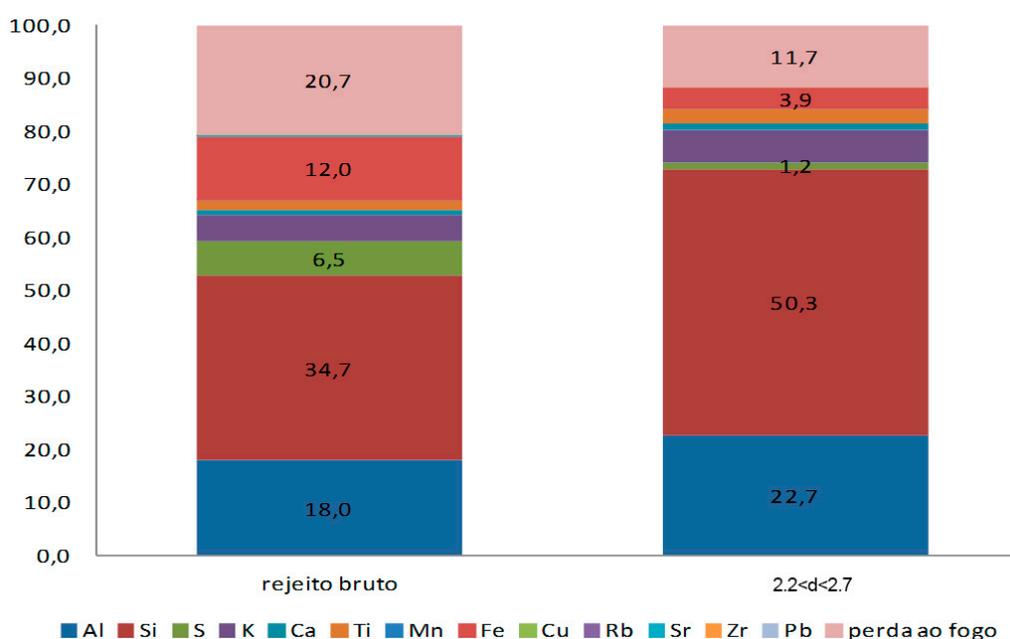


Figura 7. Resultados (%) das análises de fluorescência de raios-X do rejeito bruto e fração de densidade relativa intermediária ( $2.2 < d < 2.7$ )

Figure 7. Results (%) of X-ray fluorescence for raw coal waste and the intermediate density fraction ( $2.2 < d < 2.7$ )

Os resultados dos ensaios estáticos estão na Tabela 2. Para a fração com densidade intermediária, o valor de NNP foi de -35.0 kg CaCO<sub>3</sub>/t pelo método tradicional e -22.5 kg CaCO<sub>3</sub>/t pelo método modificado. Já para o rejeito bruto, o valor do potencial de neutralização líquido (NNP) foi de -217.3 kg CaCO<sub>3</sub>/t pelo método ABA tradicional

e de -196.9 kg CaCO<sub>3</sub>/t pelo método ABA modificado. A principal razão desta diferença deve-se ao fato de que para o ensaio ABA tradicional se usa a quantidade de enxofre total para o cálculo do AP e no método ABA modificado se usa a concentração de enxofre pirítico.

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

**Tabela 2.** Ensaio ABA tradicional e modificado realizados com a amostra de rejeito bruto e fração intermediária

**Table 2.** Standard and modified ABA prediction tests for the bulk coal discards and intermediate density fraction samples

Na Figura 8 são apresentados os resultados dos ensaios cinéticos para o rejeito de carvão. Pode-se observar que o pH da água lixiviada no rejeito bruto ficou abaixo do pH da água lixiviada no material com densidade entre 2.2 e 2.7 em todas as semanas. Em relação ao potencial redox, verificam-se um comportamento extremamente oxidante para ambos os materiais, apresentando um ambiente oxidante, favorecendo a degradação de sulfetos.

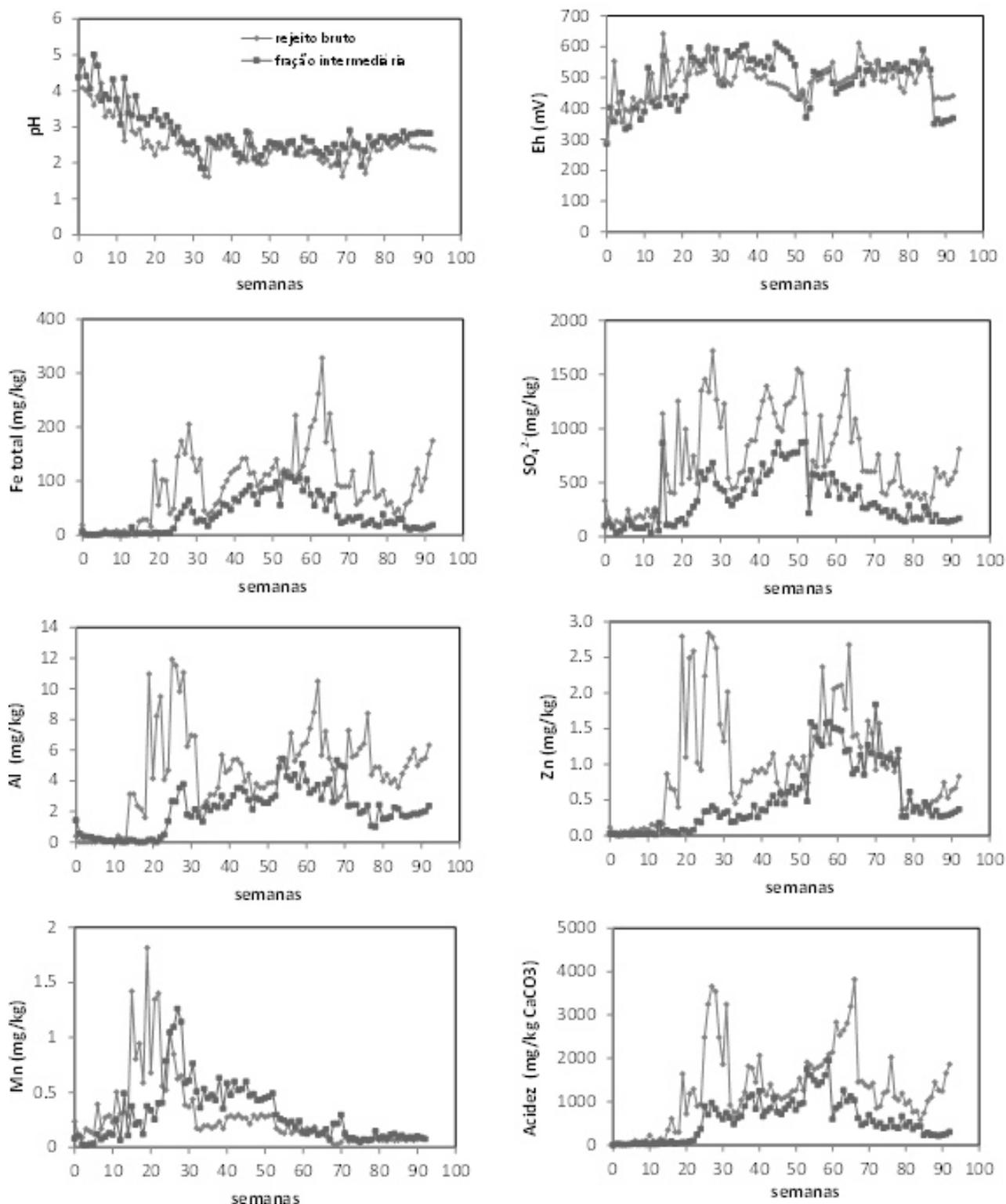
As análises de metais realizadas demonstraram que, ao final de 40 semanas, a concentração de metais lixiviados foi significativamente menor no rejeito beneficiado. Uma redução de aproximadamente 70% no ferro total e alumínio e cerca de 80% na concentração de zinco.

Com os valores de acidez foram montadas duas curvas, correspondentes ao rejeito bruto e a fração inerte. As mesmas foram integradas numericamente, utilizando a regra dos trapézios, para obtenção das áreas abaixo das curvas. Os resultados demonstram uma redução da área de 66 % da fração inerte comparada a do rejeito bruto. Logo, houve uma redução de 66 % na acidez total gerada pelo resíduo com menor teor de enxofre após 40 semanas. Em termos práticos, isso significaria um menor consumo de reagentes

químicos para a neutralização dos efluentes oriundos dos com a separação da pirita.

Por fim, de acordo com a classificação dos resíduos (Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004) o rejeito bruto foi classificado como resíduo não inerte – classe II A, enquanto que a fração intermediária foi classificada como resíduo inerte – classe II B. O material, após a separação da pirita, não apresentou aspectos de corrosividade, reatividade, inflamabilidade, patogenicidade, e toxicidade. Nos ensaios de lixiviação e solubilização, a água lixiviada e solubilizada não ultrapassou a concentração limite prevista pela norma em relação a todos os parâmetros exigidos.

Neste contexto, a fração com densidade intermediária poderia encontrar aplicações como agregado na confecção de concretos (tanto como agregado graúdo como agregado miúdo) (Santos *et al.*, 2013). Outra possibilidade seria sua utilização como insumo na produção de solos fabricados (Firpo *et al.*, 2013). Estas aplicações poderiam, além de minimizar os problemas ambientais do setor carbonífero, promover a conservação de outros recursos naturais. Agregados miúdos para a construção civil provêm basicamente de leitos de rios. Solos para recuperação de áreas degradadas são oriundas de jazidas de empréstimo.



**Figura 8.** Qualidade da água em função do tempo nos ensaios em células úmidas com o rejeito bruto e a fração com densidade intermediária em relação ao pH, Eh, Fe, Al, Mn e Zn, acidez e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

**Figure 8.** Water quality as function of time in humidity cells tests for raw waste and the intermediate density fraction in terms of pH, Eh, Fe, Al, Mn, Zn, acidity and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

### 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 e o potencial mineral em relação aos sulfetos associados à mineração de carvão não é aproveitado. Assim, a partir dos dados deste estudo, em relação à fração pirítica, 14 % do material poderá ser reaproveitado com a comercialização de um concentrado contendo 60.4 % de pirita.

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 bioprocessada 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 sulfato ferroso (Vigânico *et al.*, 2011) e dos pigmentos à base de óxidos de ferro como a magnetita (preto), hematita (vermelho) e goetita (amarelo) (Silva *et al.*, 2012).

### CONCLUSÕES

Através do beneficiamento gravimétrico dos rejeitos de carvão por meio denso previamente a sua disposição final foi possível obter um produto com maior teor de carbono, a fração energética com 14 % em massa, e uma fração rica em pirita com 17 % em massa, reduzindo em 31 % a massa dos resíduos disposto em aterros. O restante, 69 % em massa, corresponde a um material inerte: rico em silicatos e com baixo teor de enxofre, com um potencial de geração de acidez quase 90 % inferior ao do rejeito bruto e concentrações de metais reduzidas.

Assim, através de técnicas preventivas, dentro dos princípios do desenvolvimento sustentável, é provável que se reduza a massa de rejeitos, os impactos ambientais, os custos associados ao controle e tratamento da drenagem ácida de minas e, ainda, obter produtos com valor comercial agregado. Contudo, o conceito gestão apresentado somente é possível através da quebra de paradigmas e uma mudança cultural por parte das principais partes interessadas (empresas, poder público e sociedade).

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFRGS, CNPq, CAPES, FAPERGS e Rede de carvão pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do presente trabalho. Ainda, agradecem aos organizadores do V Seminário sobre Tecnologias Limpas pelo Prêmio Petrobras de Tecnologias Limpas concedido a este trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral Filho JR. 2009. *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
- APHA (American Public Health Association). 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th ed. APHA/ AWWA/ WEF, Washington DC: 1134 p
- ASTM (American Society for Testing and Material). 1996. ASTM D-5744: *Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell*. American Society For Testing And Material, Philadelphia, PA: 13 p
- ASTM (American Society For Testing And Material). 2004. ASTM D-5865: *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*. American Society For Testing And Material, Philadelphia, PA: 9 p
- ASTM (American Society For Testing And Material). 2007. ASTM D-2492: *Standard Test Method for Forms of Sulfur in Coal*. American Society For Testing And Material, Philadelphia, PA: 5 p
- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). 1983a. *Carvão Mineral – Determinação do Teor de Cinza*. NBR 8289. Rio de Janeiro: 4 p
- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). 1983b. *Carvão Mineral – Determinação do Teor de Matéria Volátil*. NBR 8290. Rio de Janeiro: 3 p
- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). 1983c. *Carvão Mineral – Determinação de Umidade*. NBR 8293. Rio de Janeiro: 6 p
- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). 2004a. *Resíduos Sólidos – Classificação*. NBR 10.004. Rio de Janeiro: 77 p
- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). 2004b. *Amostragem de resíduos sólidos*. NBR 10.007. Rio de Janeiro: 21 p
- Barbosa R, Lapa N, Boavida D, Lopes H, Gulyurtlu I & Mendes B. 2009. Co-combustion of coal and sewage sludge: Chemical and ecotoxicological properties of ashes. *Journal of Hazardous Materials V (170)*: 902–909
- Brasil. 2008. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Processo nº 2000.72.04.002543-9. Autor: Ministério Público Federal. Réu: Nova Próspera Mineração S.A. e outros. Recuperação dos passivos ambientais decorrentes da mineração de carvão no sul do Estado de Santa Catarina. Segundo relatório de monitoramento dos indicadores ambientais. Criciúma, julho: 192 p
- Colling AV, Menezes JCSS & Schneider IAH. 2011. Bioprocessing of pyrite concentrate from coal tailings for the production of the coagulant ferric sulphate. *Minerals Engineering 24*: 1185-1187

- Câmara G, Andrade C, Silva Júnior A & Rocha P. 2013. Storage of carbon dioxide in geological reservoirs: is it a cleaner technology? *Journal of Cleaner Production* 47:52-60
- EPA (US Environmental Protection Agency). 1994. *Acid Mine Drainage Prediction*. EPA 530-R-94-036 (Technical Document): 48 p
- Farfán JRJZ, Barbosa Filho O & de Souza VP. 2004. *Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral*. CETEM/MCT, Rio de Janeiro: 58 p
- Farias CEG. 2002. *Mineração e Meio Ambiente no Brasil*. Brasília: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, PNUD: 39 p
- Firpo BA, Schneider IAH & Menezes JCSS. 2013. Fabricated Soil Using Coal Mine Waste. Vol 2, P 977-983 En: *Annual International Mine Water Association Conference – Reliable Mine Water Technology*, Golden - Colorado. Reliable Mine Water Technology Proceedings. Denver Publication Printers, 2011
- Haibin L & Zhenling L. 2010. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. *Resources, Conservation and Recycling* 54: 1331-1340
- Hilson G. 2003. Defining "Cleaner Production" and "Pollution Prevention" in the mining context. *Minerals Engineering* 16:.305-321
- Kalkreuth W, Holz M, Mexias A, Balbinot M, Levandowski J, Willett J, Finkelman R & Burger H. 2010. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. *International Journal of Coal Geology* 84: 213-236
- Kontopoulos A. 1998. Acid Mine Drainage Control. P 57-118 En: Castro SH, Vergara F & Sánchez MA (Eds) *Effluent Treatment in the Mining Industry*. University of Concepción, Chile
- Kopezinski I. 2000. *Mineração X Meio Ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores*. UFRGS, Editora da Universidade, Porto Alegre: 103 p
- Krishnan RP, Anthony J, Rajavel M, Srinivasan SV & Rao AVJ. 1991. Combustion of high ash Indian coals in a fluidized bed combustor. *Fuel* 70 (10): 1125–1135
- Li XG, Ma BG, Xu L, Hu ZW & Wang XG. 2006. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. *Thermochimica Acta* 441: 79–83
- Li XG, Lv Y, Ma BG, Jian SW & Tan HB. 2011. Thermogravimetric investigation on co-combustion characteristics of tobacco residue and high-ash anthracite coal. *Bioresource Technology* 102: 9783–9787
- McLellan BC, Corder GD, Giurco D & Green S. 2009. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – Review and analysis of current approaches. *Journal of Cleaner Production* 17: 1414-1425

- Miller BG. 2005. *Coal Energy Systems*. Elsevier Academic Press, EEUU: 542 p
- Muthuraman M, Namioka T & Yoshikawa K. 2010. 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* 91: 550–558
- Reddick JF, Blottnitz, H. Von & Kothuis B. 2008. Cleaner production in the South African coal mining and processing industry: A case study investigation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 28 (4): 224-236
- Santos CR, Amaral Filho JR, Tubino RMC & Schneider IAH. 2013. Use of Coal Waste as Fine Aggregates in Concrete Paving Blocks. *Geomaterials* 3: 54-59
- SIECESC (Sindicato da Indústria de Extração de Carvão Mineral do Estado de Santa Catarina). 2011. <http://www.siecesc.com.br/>
- Silva RA, Castro CD, Vigânico EM, Petter CO & Schneider IAH. 2012. Selective precipitation/UV production of magnetite particles obtained from the iron recovered from acid mine drainage. *Minerals Engineering* 29: 22-27
- Silveira AN, Silva RDR & Rubio J. 2009. Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil. Comparative active processes and water reuse. *International Journal of Mineral Processing* 93 (2): 103-109
- Sobek AA, Schuller WA, Freeman JR & Smith RM. 1978. *Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils*. US EPA 600/2-78-054: 203 p
- Vigânico EM, Colling, AV, Silva RA & Schneider IAH. 2011. Biohydrometallurgical/UV production of ferrous sulphate heptahydrate crystals from pyrite present in coal tailings. *Minerals Engineering* 24: 1146-1148