

VI-115 – REPROCESSAMENTO DE REJEITOS DE CARVÃO VISANDO A REDUÇÃO DE CUSTOS NO TRATAMENTO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS – ESTUDO DE CASO NA REGIÃO CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA

Jéssica Weiler⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Juarez Ramos do Amaral Filho⁽²⁾

Engenheiro Ambiental, M.Sc., doutorando no PPGE3M/UFRGS.

Ivo André Homrich Schneider⁽³⁾

Engenheiro de Minas, Dr., Prof. do DEMIN/ PPGE3M/UFRGS.

Endereço⁽¹⁾: LTM-DEMIN, Av. Bento Gonçalves 9500, Bairro Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil, CEP: 91501-970. Tel: (51) 33089467. E-mail: jessica.weiler18@gmail.com

RESUMO

O beneficiamento de carvão para a utilização em termoeletricas gera grandes quantidades de rejeitos. Os rejeitos contêm vários minerais, entre os quais a pirita (sulfeto de ferro - FeS_2). A pirita, na presença de água e oxigênio, se oxida e gera a drenagem ácida de minas (DAM). A DAM é a principal fonte de contaminação dos aquíferos e do solo na região de carbonífera de Santa Catarina. Atualmente, para mitigar esses impactos, a DAM é tratada pelo método de neutralização/precipitação de metais. Essa é uma técnica considerada “fim-de-tubo” com as seguintes desvantagens: (a) exige o uso de uma grande quantidade de agente neutralizante, que acarreta em um elevado custo para as empresas locais; e (b) gera uma grande quantidade de lodo metálico que deverá ser disposto em aterros licenciados. Entretanto, através de técnicas preventivas, pode-se minimizar a geração de DAM. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar a minimização da geração da DAM através do método de isolamento de sulfetos e avaliar a redução de custos no tratamento do efluente. A metodologia do trabalho consistiu na coleta de uma amostra típica de rejeito de carvão da Camada Barro Branco, Santa Catarina. Realizou-se a separação gravimétrica do rejeito por meio denso, 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 foi submetida a análises imediata e elementar. Também foram realizadas análises de contabilização de ácidos e bases e ensaios cinéticos em células úmidas para avaliação da geração de acidez na fração com densidade intermediária e no rejeito bruto. Os resultados demonstraram que 69% do material possui densidade entre 2,2 e 2,7, com um potencial de geração de acidez de 80 a 90% menor do que o do rejeito bruto, além de concentrações reduzidas de ferro, enxofre e sulfatos. A remoção dos sulfetos e da fração carbonosa permite uma redução de 2/3 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, reduzindo significativamente o consumo de reagente alcalino. Assim, conclui-se que, com uma abordagem preventiva e de acordo com os princípios de tecnologias mais limpas, é possível reduzir significativamente os custos envolvidos nas estações de tratamento da DAM.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos de carvão, drenagem ácida de minas, tecnologias mais limpas, meio ambiente

INTRODUÇÃO

O carvão mineral é uma importante matéria prima para a produção de energia. 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, em 2011, estes Estados foram responsáveis, respectivamente, por 60%, 38% e 2% da produção de carvão energético no Brasil (ABCM, 2010).

Na região Carbonífera de Santa Catarina, a extração do carvão é realizada predominantemente por mineração subterrânea. Devidos às suas características geológicas, o carvão ROM (“Run-of-Mine”) precisa ser beneficiado para atingir aos padrões de combustão das termoeletricas locais. Após o processamento mineral, aproximadamente 65% de material descartado é disposto em módulos de rejeitos. Esses depósitos contêm rochas sedimentares associadas ao carvão mineral, como folhelhos carbonosos, folhelhos, siltitos e nódulos de pirita (Kalkreuth et al., 2010). Os módulos de rejeitos ocupam grandes áreas, possuem aproximadamente 6-

8% de enxofre total e geram grandes vazões de Drenagem Ácida de Minas (DAM). A Figura 1 mostra um módulo de rejeitos de carvão localizado no Município de Forquilha, SC.



Figura 1: Vista superior do módulo B de rejeitos da Carbonífera Criciúma S.A, com aproximadamente 13 milhões de toneladas de rejeitos de carvão.

A DAM é um efluente de elevada acidez, formado pela oxidação da pirita na presença de água e oxigênio. O processo de geração da DAM é acelerado na presença de bactérias acidofílicas, como as bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Após gerada, a DAM é um efluente de difícil controle e pode ocorrer por dezenas e até mesmo centenas de anos. Tipicamente, a DAM apresenta um baixo pH (entre 2 e 3), elevadas concentrações de sulfato e ferro (na forma de Fe^{2+} e/ou Fe^{3+} , dependendo das condições oxidantes ou redutoras do ambiente) bem como outros metais (Al, Mn, Zn) solubilizados a partir de minerais presentes no ambiente (Kontopoulos, 1998). Devido às suas características, a DAM é a principal responsável pela contaminação dos aquíferos e do solo nas regiões de mineração de carvão.

Segundo Kontopoulos (1998), métodos preventivos são aqueles onde se isola um dos agentes causadores da DAM, evitando assim o seu contato com os demais (ar, água ou sulfetos) e consequentemente a formação de drenagem, sendo largamente preferíveis aos métodos de contenção e remediação. Apesar de alguns estudos por métodos preventivos já terem sido conduzidos em unidades experimentais, como coberturas secas (Gallato et al, 2007; Soares, et al, 2009), a principal ação de mitigação da DAM pelas carboníferas atualmente ocorre através de sistemas ativos de tratamento por neutralização/precipitação no modelo “fim-de-tubo” (Silveira et al, 2009). A técnica consiste em neutralizar o efluente e precipitar os metais na forma de hidróxidos. Para isso, o efluente ácido (geralmente com pH entre 2,0 e 3,0) é captado e enviado até uma estação de tratamento de efluentes onde ocorre a dosagem de reagentes químicos. Os reagentes alcalinos usualmente empregados são a soda cáustica (NaOH) e a cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (a soda cáustica possui um poder de neutralização maior do que a cal e gera uma menor quantidade de lodo, todavia o seu uso implica em um maior custo). O uso de polímeros floculantes também é frequente. Os polímeros são empregados para aumentar a taxa do processo na etapa de separação sólido-líquido, que pode ocorrer em decantadores convencionais, decantadores de lamelas, flutuadores ou simplesmente em lagoas de decantação.

O pH ideal para a precipitação dos metais varia. O Fe^{3+} precipita em pH acima de 3,5, o Fe^{2+} precipita em pH superior a 8,0, o Al^{3+} precipita entre pH 4,5 e 9,0 e o Mn^{2+} precipita com pH acima de 8,5 (Metcalf e Eddy, 2003). Em vista disso, considera-se que o valor ideal de ajuste do pH para o tratamento de um efluente com características de DAM fica entre 8,5-8,7, pois nesse valor todos os metais precipitam e o efluente está com pH dentro do previsto na Resolução CONAMA 430/2011 (entre 5,0 e 9,0) para lançamento de efluentes em corpos d’água receptores. Contudo, para elevar o pH, da faixa entre 2,0 a 3,0, característico da DAM, até 8,5, são utilizadas grandes quantidades de reagente, tornando o tratamento caro.

Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo a minimização da geração da DAM através do processamento de rejeitos do carvão de forma a remover a pirita e parte de uma fração carbonosa remanescente antes da disposição do material no meio ambiente. Esse procedimento é conhecido como o método de isolamento/exclusão de sulfetos e é uma alternativa para o controle da DAM evitando a geração previamente a sua formação (Kontopoulos, 1998). Os estudos foram conduzidos em laboratório, abordando técnicas de caracterização dos materiais 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 com a atual sistemática adotada pelas mineradoras e com a abordagem sugerida neste trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

Preparação e Caracterização da Amostra de Rejeito de Carvão

O rejeito de carvão utilizado é proveniente da etapa de jigagem, circuito de grossos (-50,8 +2,0 mm), do processo de beneficiamento de carvão mineral de uma carbonífera na região de Criciúma SC.

A amostra foi primeiramente homogeneizada e quarteada conforme NBR 10007 (ABNT, 2004). Após, foi realizada a separação gravimétrica do material em meio denso de ferro-silício (Fe-Si) nas densidades de 2,2 e 2,7 com a intenção de se obter 3 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).

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).

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 em uma Bomba Calorimétrica da marca IKA modelo C2000 (ASTM, 2004). O enxofre total, assim como carbono, hidrogênio e nitrogênio, foram analisados instrumentalmente pelo equipamento Vario Macro Elementar. As formas de enxofre pirítico e sulfático foram obtidas através de procedimentos titulométricos (ASTM, 2007). Por fim, o enxofre orgânico foi obtido pela subtração dos valores de enxofre pirítico e sulfático do enxofre total. Todos esses valores foram expressos em base seca, corrigidos pelo teor de umidade que foi determinado pelo procedimento descrito na norma NBR 8293 (ABNT, 1983c).

Avaliação da Geração de Acidez

A avaliação da geração de acidez foi realizada nas seguintes amostras:

- (a) rejeito bruto; e
- (b) rejeito na fração densimétrica entre 2,2 e 2,7.

Para a avaliação do potencial de geração de acidez das amostras foram realizados ensaios estáticos de contabilização de ácidos e bases pelo método Sobek tradicional e pelo método Sobek modificado (Sobek et al., 1978; EPA, 1994; ASTM, 1996). O objetivo foi determinar o balanço entre a produção de acidez e o consumo de acidez (neutralização), pelos componentes minerais da amostra. A determinação do potencial de geração de acidez (AP) foi realizada a partir da análise de enxofre total (método Sobek) e pela análise de enxofre pirítico (método Sobek modificado). Para a determinação do potencial de neutralização (NP), no método Sobek tradicional, o procedimento consiste em submeter à amostra a uma solução ácida (com o volume e concentração determinados pelo teste fizz) e aquecer a 90°C para consumir os minerais neutralizantes. No método Sobek modificado, o procedimento consiste em submeter o material em uma solução ácida em temperatura ambiente por 24 horas. Após, em ambos os casos, titulou-se a solução ácida com NaOH (com a mesma concentração do ácido) até pH 7,0. O potencial de neutralização foi calculado em kg $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$ de amostra. A determinação destes dois fatores, AP e NP, permite calcular o potencial de neutralização líquido ($\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP}$). O NNP pode ser positivo ou negativo, sendo que valores de NNP menores que -20 (kg $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$) indicam a formação de ácido; valores maiores do que +20 (kg $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$) indicam que não haverá a formação de ácido e valores entre -20 e +20 (kg $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$) indicam que é difícil prever o seu comportamento, sendo necessários outros ensaios para a predição da DAM.

Os estudos cinéticos foram realizados pelo método de células úmidas, conforme procedimento ASTM D 5744 (ASTM, 1996). O teste consistiu em colocar uma amostra de 500 gramas 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. A Figura 2 mostra o equipamento utilizado para a realização do ensaio.

As amostras de águas lixiviadas das células úmidas 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. Já a análise de sulfatos foi realizada por cromatografia iônica (DIONEX-ICS3000). As análises foram realizadas, semanalmente, seguindo os procedimentos do “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*” (APHA, 2005).



Figura 2: Foto das células úmidas para realização dos ensaios cinéticos.

Tratamento da Drenagem Ácida em Escala de Laboratório

A fim de se avaliar o consumo de reagente, tratou-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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Por fim, no intuito de se 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 a metodologia descrita no “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*” (APHA, 2005).

Avaliação de Custos

Para avaliar os custos relacionados com o tratamento dos efluentes, originados nos rejeitos com e sem o isolamento de sulfetos, foram utilizados dados operacionais fornecidos por uma empresa local. Essa empresa trata aproximadamente 20m³/h de DAM oriundas do módulo de rejeitos (Figura 1) pelo processo de precipitação/sedimentação utilizando soda e cal como reagentes alcalinos. A DAM é gerada no módulo de rejeitos durante os 365 dias do ano, sendo encaminhada para uma bacia de captação e após para tratamento. A estação de tratamento de DAM opera 16 horas por dia e 23 dias por mês.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na separação gravimétrica por meio denso de ferro silício (Fe-Si), obteve-se 3 frações com diferentes densidades: uma inferior a 2,2 ($d < 2,2$), outra entre 2,2 e 2,7 ($2,2 < d < 2,7$), e outra superior a 2,7 ($d > 2,7$) (Figura 3). A primeira fração, que corresponde a 14% em massa do material, apresenta potencial de uso em blendagem com carvões de melhor qualidade. A terceira fração (com massa de 17%), rica em pirita, apresenta potencial para ser comercializado na produção de ácido sulfúrico. O material remanescente, agora bastante empobrecido em pirita, é o que ficou na faixa de densidade intermediária (69% em massa).

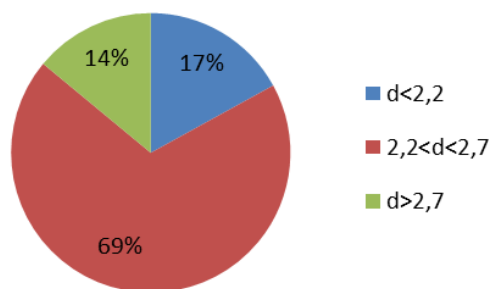


Figura 3: Porcentagem em massa de cada fração densimétrica após os ensaios de separação gravimétrica por meio denso de Fe-Si do rejeito bruto.

A Tabela 1 resume os valores encontrados na análise imediata e elementar das 3 frações densimétricas. 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 fração possui 32,5% de enxofre pirítico e aproximadamente 60% de pirita – FeS_2 . Neste contexto, é possível visualizar que o rejeito bruto, com 7% de enxofre, predominantemente na forma pirítica, passa para 1,1% na fração com densidade entre 2,2 e 2,7.

Tabela 1: Resultados da análise imediata e elementar de amostras de rejeito de carvão para o rejeito bruto e cada densidade relativa obtida

| Parâmetro (base seca) | Rejeito Bruto | $d < 2,2$ | $2,2 < d < 2,7$ | $d > 2,7$ |
|--------------------------|---------------|-----------|-----------------|-----------|
| 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 |

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_3/t pelo método ABA tradicional e de -22,5 kg CaCO_3/t pelo método ABA modificado. Já para o rejeito bruto, o valor do potencial de neutralização líquido (NNP) foi de -217,3 kg CaCO_3/t pelo método ABA tradicional e de -196,9 kg CaCO_3/t pelo método ABA modificado. Isso significa que o material processado, com densidade entre 2,2 e 2,7, apresenta um potencial de geração de acidez líquido de 10 a 20% do rejeito de carvão original.

Tabela 2: Resultados dos ensaios estáticos ABA tradicional e modificado realizados com a amostra de rejeito bruto e fração intermediária

| | AP (kg CaCO_3/t) | | NP (kg CaCO_3/t) | | NNP (kg CaCO_3/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 |

Na Figura 4 são apresentados os resultados dos ensaios cinéticos para o rejeito de carvão bruto e para a fração com densidade intermediária. Pode-se observar que a água lixiviada do rejeito bruto sempre apresentou valores de pH inferiores do que o material com densidade entre 2,2 e 2,7. Em relação ao potencial redox, verifica-se um comportamento muito oxidante para ambos os materiais, favorecendo a degradação de sulfetos.

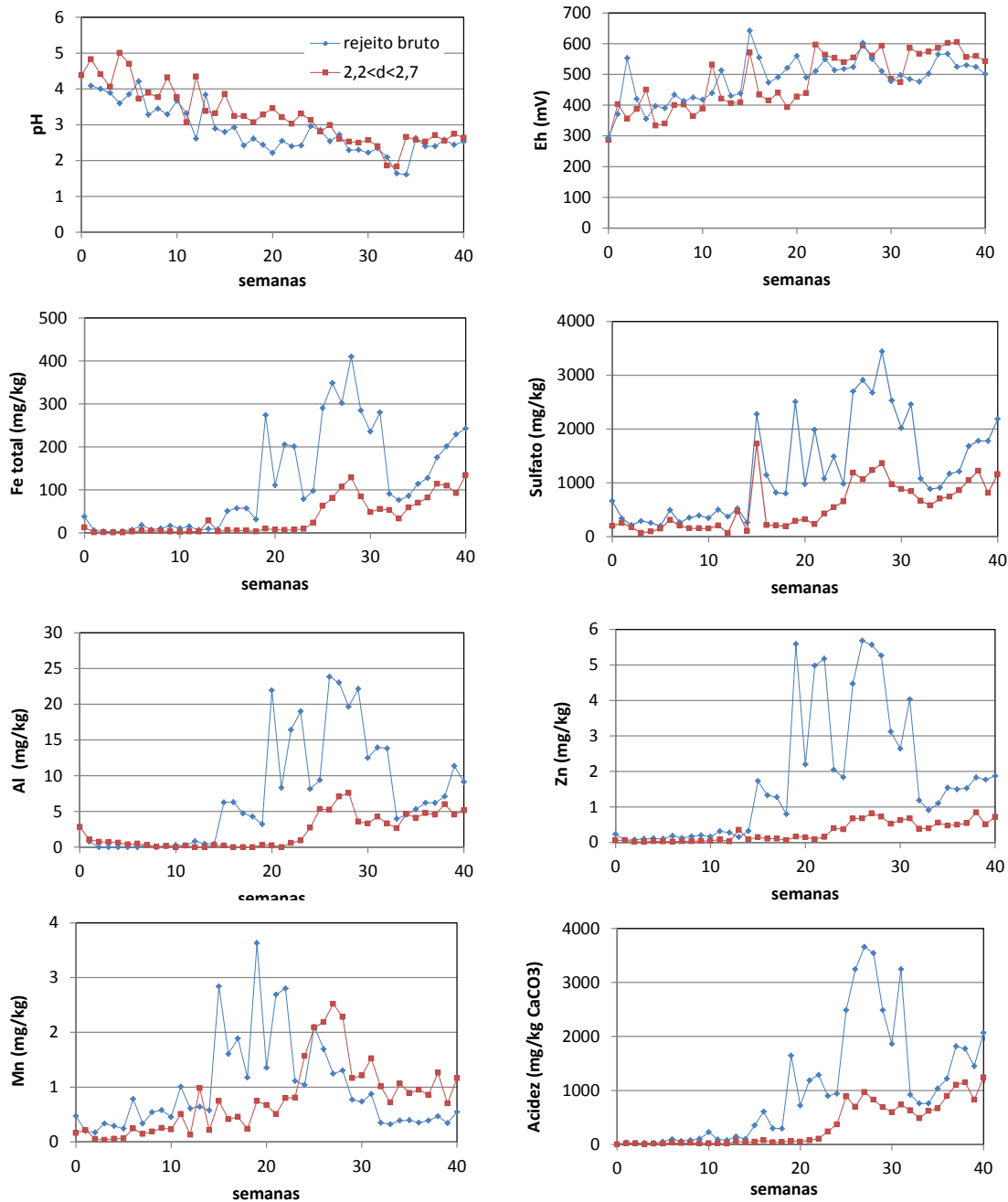


Figura 4: Qualidade da água lixiviada em função do tempo nos ensaios em células úmidas.

As análises de metais realizadas demonstraram que, durante as 40 semanas, a concentração de metais e sulfatos nos lixiviados foram também significativamente menores no rejeito beneficiado. Apesar de todos esses indicativos, a análise de acidez talvez seja a que melhor expresse a demanda de agente alcalino necessária para neutralizar a acidez do sistema (dada tanto pelo baixo pH com pela presença de metais hidrolisáveis). As curvas de acidez 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 ao do rejeito bruto. Logo, houve uma redução de 66% na acidez gerada pelo material com densidade entre 2,2 e 2,7 quando comparada com acidez gerada pelo rejeito bruto nestas 40 semanas. Contudo, de acordo com as curvas de acidez, ainda há a disponibilidade de metais nas células a serem lixiviados, indicando assim que o experimento deve ser continuado até o esgotamento total dos metais e consequentemente da acidez das células úmidas.

No tratamento da DAM em laboratório, o consumo de Ca(OH)_2 para aumentar o pH (de aproximadamente 2 até 8,7) foi de $18,25 \text{ kg/m}^3$ para o rejeito bruto, e de $3,75 \text{ kg/m}^3$ para a fração com densidade intermediária, representando uma redução de cerca de 80% no consumo de agente neutralizante no tratamento de efluentes oriundos do depósito de rejeitos. Os valores obtidos nos testes de bancada estão de acordo com a redução de geração de acidez obtida nos testes estáticos (Tabela 2). 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 3. Em ambos os tratamentos, os parâmetros de emissão atendem os valores emissão exigidos pela Resolução CONAMA 430/11.

Tabela 3: Características químicas dos efluentes tratados pelo neutralização/precipitação.

| | Rejeito Bruto | | 2,2<d<2,7 | | CONAMA 430/11 |
|---------------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|---------------|
| | efluente bruto | efluente tratado | efluente bruto | efluente tratado | |
| Fe (mg/l) | 325,1 | 0,6 | 94,2 | 0,8 | 15,0 |
| Mn (mg/L) | 1,5 | 0,3 | 2,3 | 0,1 | 1,0 |
| Zn (mg/L) | 5,6 | <0,3 | 0,8 | <0,3 | 5,0 |
| Al (mg/L) | 20,9 | 2,8 | 7,3 | 3,2 | n/a |
| SO_4^{2-} (mg/L) | 2794 | 1739 | 1147 | 851 | n/a |

Para simular a questão de custos, tomou-se como exemplo 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 14400 m^3 de DAM. Na Tabela 4 são apresentados os valores referentes aos custos relativos ao atual cenário e ao cenário projetado com a exclusão da matéria carbonosa e da pirita. Considerando a 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 na correção do pH.

Tabela 4: Custo atual e projetado em reagente alcalino - (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 (kg/m^3) | 18,25 | 3,75 |
| Preço cal hidratada (R\$/kg) | 0,40 | 0,40 |
| Consumo de reagentes (kg/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 |

No esquema da Figura 5 pode-se ter uma ideia da abordagem preventiva da técnica utilizada neste trabalho. A abordagem se baseia na separação do rejeito bruto em três densidades distintas, duas com potencial aproveitamento (fração energética e fração pirítica). O material residual diminui a carga sobre o tratamento do efluente, na concepção de “fim-de-tubo”. 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, conservação de recursos naturais e desenvolvimento sustentável na mineração, aliados aos benefícios econômicos para as empresas do setor (Hilson, 2003; Reddick, 2008; McLellan et al. 2009; Haibin e Zhenling, 2010). Apesar dos significantes benefícios econômicos e ambientais dessa técnica, 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.

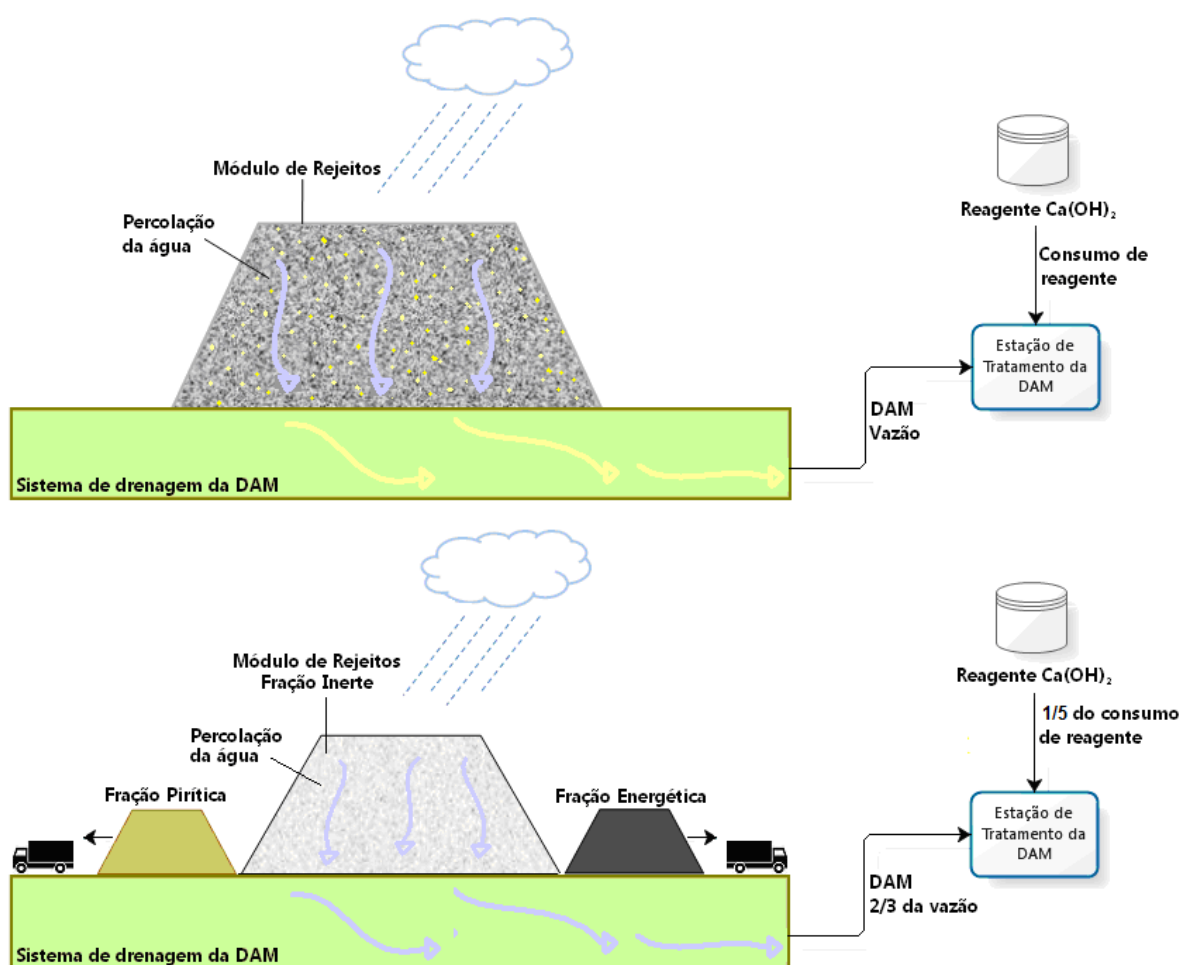


Figura 5: Abordagem tradicional (acima) e abordagem preventiva (abaixo) para minimização dos custos no tratamento da DAM.

CONCLUSÕES

Através do beneficiamento gravimétrico de rejeitos de carvão por meio denso foi possível reduzir 31% a massa dos resíduos dispostos em aterros, obtendo-se: (a) um produto com maior teor de matéria carbonosa, com potencial uso energético, que corresponde a 14% em massa (esse material poderia ser aplicado de forma blendada com carvões de melhor qualidade em termoeletricas que aceitam carvões com alto teor de cinzas); (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; e (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 entre 80 e 90% inferior ao do rejeito bruto.

A remoção dos sulfetos e da fração carbonosa permite uma redução de 2/3 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, reduzindo significativamente o consumo de reagente alcalino. Assim, conclui-se que, com uma abordagem preventiva e de acordo com os princípios de tecnologias mais limpas, é possível reduzir significativamente os custos envolvidos nas estações de tratamento da DAM.

A aplicação deste estudo na mineração de carvão pode proporcionar um melhor aproveitamento dos recursos minerais, pois através de técnicas preventivas, dentro dos princípios do desenvolvimento sustentável, é 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e a Rede Carvão pelos recursos financeiros para o desenvolvimento da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL – ABCM. Disponível em: <http://www.carvaomineral.com.br>
2. 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.
3. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21. Ed. Washington D.C: APHA-AWWAWEF, 2005. 1134p.
4. 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.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. Standard Test Method for Forms of Sulfur in Coal. ASTM D-2492. 2007, 5p
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Carvão Mineral – Determinação do Teor de Cinza. NBR 8289. Rio de Janeiro, 4p., 1983a.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Carvão Mineral – Determinação de Umidade. NBR 8293. Rio de Janeiro, 6p., 1983b.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Carvão Mineral – Determinação do Teor de Matéria Volátil. NBR 8290. Rio de Janeiro, 3p., 1983b.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Carvão Mineral – Ensaios Densimétricos. NBR 8738. Rio de Janeiro, 9p., 1985.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Resíduos Sólidos – Classificação. NBR 10.004. Rio de Janeiro, 77p., 2004b.
11. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. Resolução Conama no 357 Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama> Acesso em 01/04/2013.
12. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Acid Mine Drainage Prediction. EPA 530-R-94-036. 1994. 48p (Technical Document).
13. 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 mina – estudos em campo. Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 12, n. 2, p. 229-236, 2007.
14. HAIBIN, L; ZHENLING, L. Recycling Utilization Patterns of Coal Mining Waste in China. Resources, Conservation and Recycling, n.54, p.1331-1340, 2010.
15. HILSON, G. Defining “Cleaner Production” and “Pollution Prevention” in the Mining Context, Minerals Engineering, n.16, p.305-321, 2003.
16. KONTOPOULOS, A. Acid Mine Drainage Control. In: CASTRO, S.H. et alii. (Eds.). *Effluent Treatment in the Mining Industry*. Chile: University of Concepción, 1998. p. 57-118.
17. 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.
18. METCALF; EDDY. Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse. New York: McGraw-Hill, 2003. 1334 p.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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. 203p.