



SEPARAÇÃO GRAVÍTICA PARA DESSULFURIZAÇÃO DE REJEITOS DE CARVÃO DAS CAMADAS BARRO BRANCO E BONITO DA REGIÃO CARBONÍFERA DE SC.

WEILER, J.¹, SCHNEIDER, I.A.H.^{1*}

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental. *e-mail: ivo.andre@ufrgs.br

RESUMO

As principais camadas de carvão exploradas na região carbonífera de Santa Catarina são a Barro Branco (BB) e a Bonito (BO). Os rejeitos gerados durante o beneficiamento são dispostos em módulos e, devido a associação com a pirita, podem gerar drenagem ácida de minas (DAM). Este estudo teve como objetivo comparar a separabilidade densitária dos rejeitos das camadas BB e BO e os ganhos ambientais devido à dessulfurização. Para isso, foram realizadas curvas densitárias, análises de cinzas, especiação de enxofre e predição de geração de DAM. Três frações densitárias foram obtidas: inferior a $2,2 \text{ g cm}^{-3}$ (carvão residual); entre $2,2$ e $2,7 \text{ g cm}^{-3}$ (material com reduzido enxofre) e superior a $2,7 \text{ g cm}^{-3}$ (concentrado piritoso). Os resultados demonstraram os rejeitos de carvão submetidos à processos gravimétricos podem gerar concentrados piríticos com aproximadamente 60% de pirita. Em termos ambientais, haveria uma redução do potencial ácido disposto no ambiente de 90% e 65% para BB e BO, respectivamente. Comparativamente, a fração “dessulfurizada” da camada BO apresenta níveis superiores de pirita e maior potencial de geração de acidez que a camada BB, implicando em maiores riscos de contaminação do meio ambiente e maiores custos no tratamento da DAM.

PALAVRAS-CHAVE: rejeitos de carvão, DAM, dessulfurização, aproveitamento de rejeitos, meio ambiente.

ABSTRACT

The main coal seams explored in the coal region of Santa Catarina are Barro Branco (BB) and Bonito (BO). The coal wastes generated in the beneficiation are arranged in disposal areas and, owing to the association with the pyrite, can generate acid mine drainage (AMD). The objective of this study was to compare the densimetric separability of the wastes of the BB and BO seams and the environmental gains with its desulphurisation. For this purpose, densimetric separability test, ash, sulfur speciation, AMD generation analyses were performed. Three densimetric fractions were obtained: less than 2.2 (residual coal), between 2.2 and 2.7 (low sulfur material), and greater than 2.7 g cm^{-3} (pyrite concentrate). The results revealed that could be obtained pyrite concentrates with approximately 60% pyrite. In environmental terms, a reduction of the acidity potential to be disposed in the environment of up to 90 and 65 % in the case of the BB and BO seam, respectively. It was also observed that the desulfurized fraction of the BO had higher levels of pyrite and a higher potential for acidity generation than the BB seam, implying greater risks of environmental contamination and higher acid water treatment costs.

KEYWORDS: coal waste, AMD, desulfurization, waste recovery, environment.

1. INTRODUÇÃO

As principais camadas de carvão exploradas em Santa Catarina são a Barro Branco, Bonito e, em menor escala, a camada Irapuá (Kalkreuth et al, 2010). Historicamente, a Camada Barro foi a mais explorada, contudo, com o esgotamento de muitas minas nos últimos anos, a produção tem se voltado também para a Camada Bonito. Assim, é importante que estudos sejam conduzidos visando aspectos ambientais de ambas as camadas.

O método de extração predominantemente destas camadas é a mineração subterrânea. Devido a mecanização, intercalação com rochas sedimentares (folhelhos, siltitos e arenitos) e a presença de nódulos de pirita (sulfeto de ferro – FeS_2) (Kalkreuth et al, 2010), o carvão ROM (“Run-of-Mine”) precisa ser beneficiado para atingir aos padrões de combustão, gerando grande quantidade de rejeitos (Amaral Filho et al., 2013). Os rejeitos da região correspondem, em média, a 65% da massa de material retirado das minas, e são dispostos em módulos de rejeitos em superfície com 11% de pirita (FeS_2) (Amaral Filho et al., 2013). Anualmente produz-se uma quantidade média 4 milhões de toneladas de rejeitos de carvão que necessitam adequado manejo e gestão (SIECESC, 2017).

Durante muitos anos esses rejeitos foram dispostos de forma imprópria e sem cuidados com a geração de drenagem ácida de mina (DAM), contaminando solos e corpos hídricos superficiais e subterrâneos. Nesta região, estima-se que 6000 ha de áreas foram severamente degradadas, atingindo 1200 km de trechos de rios, correspondendo a 6% das bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão (Brasil, 2016; Romano Neto et al., 2017). Atualmente, a recuperação do passivo é tratada por Ação Civil Pública com as mineradoras locais, o que está atenuando gradativamente os efeitos da DAM, mas muitas áreas são “órfãs” e continuam impactando o meio ambiente (Rocha-Nicoleite et al., 2017).

Mesmo com toda a problemática ambiental, o setor não aplica técnicas que visam a recuperação dos produtos contidos no rejeito, deixando de agregar valor e tornando-o potencialmente poluidor ao meio ambiente. Estudos prévios que utilizaram separação densitária com rejeito de carvão da camada Barro Branco (Amaral Filho et al., 2013; dos Santos et al., 2013; Weiler et al., 2016) mostram que o mesmo pode ser dividido em frações em função das diferenças entre as densidades dos minerais presentes nos rejeitos: uma fração leve, que contém material carbonoso residual; uma fração com maior densidade devido ao alto teor de pirita; e uma fração intermediária, composta por minerais tais como siltitos e arenitos. Cada fração possui diferentes utilidades e podem ser comercializadas, permitindo o aproveitamento de parte do rejeito e agregando valor à cadeia produtiva de carvão mineral. Além disso, devido a redução do teor de enxofre que fica concentrado na fração pirítica, reduzir-se-ia em grande parte a geração de DAM (Weiler et al., 2016).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a separabilidade densitária dos rejeitos gerados no beneficiamento de carvão proveniente das camadas Barro Branco e Bonito, comparar os benefícios gerados considerando a redução do potencial de gerar acidez e riscos ambientais na região de estudo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de rejeito de carvão utilizadas para este estudo são provenientes da etapa de jigagem, circuito de grossos (2,0 - 50,8 mm), do processo de beneficiamento de carvão da

camada Barro Branco (BB) e Bonito (BO), localizadas na região carbonífera de Santa Catarina. Em ambas as amostras, optou-se pela fração grossa uma vez que contribui com mais de 70% da massa de rejeitos descartados.

Realizou-se a preparação das amostras a partir da homogeneização, quarteamento e separação por meios densos (afunda-flutua), conforme ASTM D4371-06 (ASTM, 2012a), nas densidades de 1,7, 2,0, 2,1, 2,2, 2,3, 2,4, 2,5, 2,6 e 2,7. O preparo dos meios densos foi realizado a partir da mistura dos líquidos densos orgânicos tribromometano, com densidade de $2,81 \text{ g cm}^{-3}$, e o tetracloroetileno, com densidade $1,62 \text{ g cm}^{-3}$. Os líquidos foram misturados até a densidade desejada, medida com auxílio de densímetro. Após, foi realizada a imersão das amostras e separadas as porções flutuadas e afundadas em cada densidade.

Cada fração obtida nos ensaios densimétricos foi submetida à análise de cinzas e enxofre total. A análise de cinzas foi realizada por procedimento gravimétrico conforme ASTM D3174-12 (ASTM, 2012b). A análise de enxofre total (S_{total}) foi realizada via instrumental no equipamento Leco SC 457 e as formas de enxofre ($S_{\text{pirítico}}$ e $S_{\text{sulfático}}$) através de procedimentos titulométricos conforme ASTM D2492-02 (ASTM, 2012c). O valor do enxofre orgânico foi calculado pela diferença da concentração de enxofre total do enxofre sulfático e pirítico. Os valores das análises de cinzas e enxofre (em todas as suas formas), em base úmida, foram corrigidos para base seca conforme ASTM D3173-11 (ASTM, 2011).

A partir dos ensaios em meio denso, construíram-se curvas densitárias para os teores de cinzas e enxofre e a curva "Near Gravity Material" (NGM) (Leonard, 1979; Tavares e Sampaio, 2005). As amostras foram divididas em três frações, considerando densidades de estudos anteriores (Weiler et. al, 2016): fração com densidade inferior a $2,2 \text{ g cm}^{-3}$ ($d < 2,2$); fração com densidade intermediária entre $2,2$ e $2,7 \text{ g cm}^{-3}$ ($2,2 < d < 2,7$) e fração com densidade superior a $2,7 \text{ g cm}^{-3}$ ($d > 2,7$).

Com o objetivo de comparar o potencial de geração de acidez do rejeito de carvão antes e depois da redução da pirita para ambas as camadas, as amostras de rejeito bruto (antes do processamento para remoção da pirita) e da fração dessulfurizada ($2,2 < d < 2,7$) foram submetidas ao ensaio estático de contabilização ácidos e bases (ABA) proposto por Sobek et al. (1978). O potencial de geração de acidez (AP) foi medido a partir da análise de enxofre total, o potencial de neutralização (NP) foi realizado pela digestão da amostra com ácido clorídrico, e potencial de neutralização líquido (NNP) pela diferença entre NP e AP. Se o NNP for negativo, existe maior potencial do resíduo gerar DAM. Se for positivo, o risco é menor. Os critérios para identificação do potencial de geração de acidez são (Lapakko, 1993):

$\text{NNP} < -20 \text{ kg CaCO}_3 \text{ ton}^{-1}$ - indica a formação de acidez;

$\text{NNP} > +20 \text{ kg CaCO}_3 \text{ ton}^{-1}$ - indica que não haverá a formação de acidez;

$-20 < \text{NNP} < +20 \text{ kg CaCO}_3 \text{ ton}^{-1}$: difícil predizer o seu comportamento, sendo necessários outros ensaios para a predição da ocorrência, ou não, da DAM.

Os dados obtidos para camada BB e BO foram comparados considerando o atual cenário de processamento de carvão na região de Santa Catarina e os benefícios ambientais caso a prática de separação densitária de rejeitos fosse adotada na região.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta as curvas densitárias e o NGM (“Near Gravity Material”) do rejeito de carvão das Camadas Barro Branco (BB) e Bonito (BO). A partir destas curvas pode-se estimar a massa correspondente à cada densidade de corte, assim como os teores de cinzas e enxofre das frações.

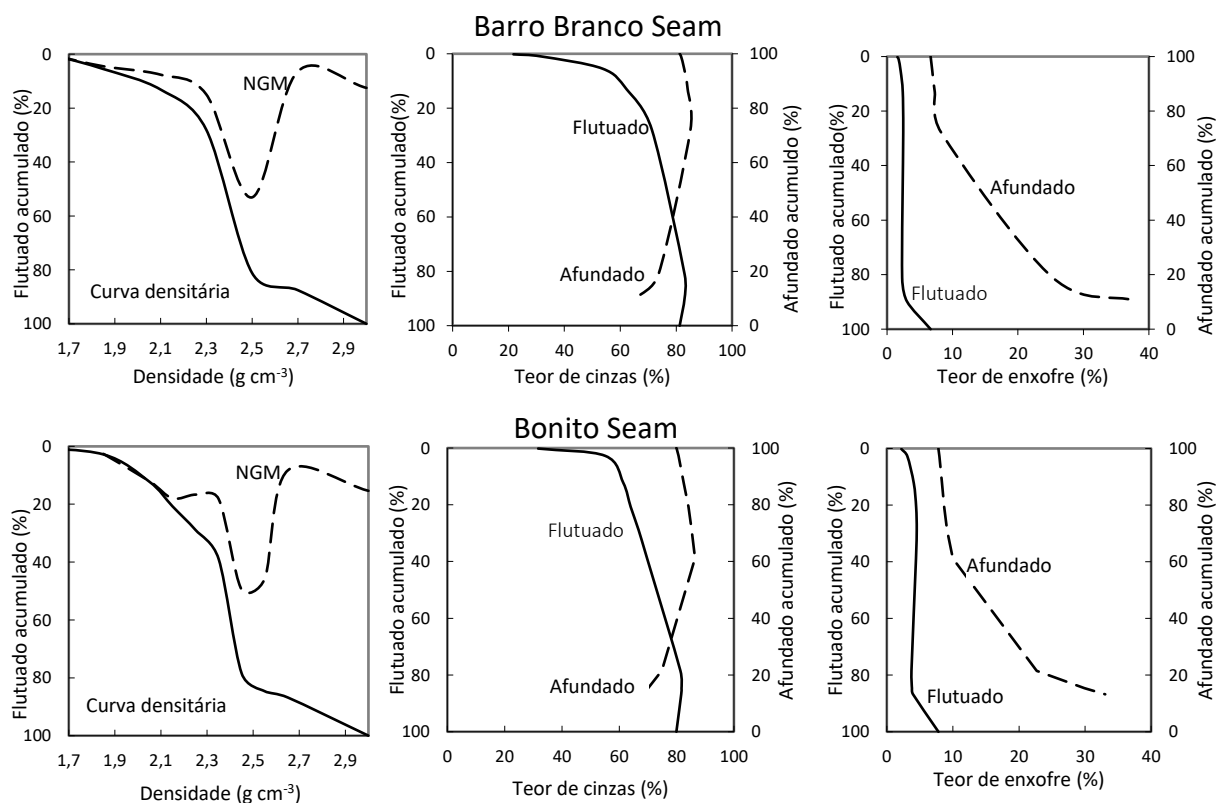


Figura 1: Curvas densitárias dos rejeitos provenientes da camada Barro Branco e Bonito: Near Gravity Material (NGM) e curva densitária; curva dos afundados e dos flutuados para o teor de cinzas; e curva dos afundados e dos flutuados para o teor de enxofre total.

Definiram-se as densidades de corte (d_c) em 2,2 e 2,7 g cm^{-3} priorizando: (a) a recuperação de uma fração carbonosa ainda presente nos rejeito de carvão; (b) a obtenção de uma fração intermediária com maior teor de matéria mineral e menor teor de enxofre, com reduzido potencial de geração de acidez; e (c) a obtenção de um concentrado piritoso (e consequente dessulfurização do restante do material). Os valores do NGM, parâmetro que indica o grau de dificuldade de separação do material, foram de NGM 18% no d_c 2,2 g cm^{-3} e 10% na d_c de 2,7 g cm^{-3} . Em ambas as densidades, em especial na densidade de 2,7 g cm^{-3} , não se espera uma grande dificuldade de separação em equipamentos convencionais de beneficiamento gravimétrico (Leonard, 1991; Tavares e Sampaio, 2005).

Na Tabela 1 encontram-se os resultados referentes à fração mássica, teor de cinzas e formas de enxofre do rejeito bruto e das três frações densitárias obtidas após o corte nas densidades 2,2 e 2,7 para ambas as camadas. Em relação ao balanço mássico, as duas camadas analisadas apresentaram distribuição semelhante nas densidades de corte estipuladas. A fração com menor densidade ($d < 2,2$) representa 16,2% e 20,7% do rejeito para as camadas BB e BO, respectivamente. Devido a quantidade de carvão residual e menor teor de cinzas, esta fração tem potencial para uso na blendagem com outros carvões para aumentar sua qualidade ou na co-combustão com outros materiais e/ou resíduos de maior

poder calorífico (Barbosa et al., 2009; Li et al., 2011; Muthuraman et al., 2010). O material com densidade intermediária ($2,2 < d < 2,7$) tem a maior proporção mássica (68,8% para BB e 66,1% para BO), podendo ser considerado um rejeito com reduzido teor de enxofre. Por fim, a maior densidade ($d > 2,7$) representa 15% e 13,2% do rejeito (camada BB e BO, respectivamente), com teor de S total de 37,6% (camada BB) e 33,1% (camada BO). Esses valores são considerados adequados para produção de ácido sulfúrico, por exemplo, através do processo de ustulação (ESA/EFMA, 2000; Runkel and Sturm, 2009). Outras possibilidades de aproveitamento são na produção de sulfato férrico (Colling et. al, 2011), sulfato ferroso (Vigânico et al, 2011) e pigmentos à base de óxidos de ferro como a magnetita (preto), hematita (vermelho) e goetita (amarelo) (Silva et al, 2012).

Tabela 1: Resultados de massa, teor de cinzas e formas de enxofre de fração obtida após o corte nas densidades 2,2 e 2,7 ($d < 2,2$, $2,2 < d < 2,7$ e $d > 2,7$) e do rejeito bruto das camadas Barro Branco e Bonito.

Parâmetros	Unidade	Camada Barro Branco				Camada Bonito			
		Rejeito Bruto	$d < 2,2$	$2,2 < d < 2,7$	$d > 2,7$	Rejeito Bruto	$d < 2,2$	$2,2 < d < 2,7$	$d > 2,7$
Massa	%	100,0	16,2	68,8	15,0	100,0	20,7	66,1	13,2
Cinzas	%	84,2	58,5	92,7	73,1	78,6	64,0	84,2	68,8
Formas de enxofre									
S _{total}	%	6,7	1,8	1,1	37,6	7,8	4,4	3,8	33,1
S _{pirítico}	%	5,6	1,3	0,7	32,5	6,4	3,1	2,8	29,6
S _{sulfático}	%	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,1	0,6
S _{orgânico}	%	1,0	0,3	0,3	4,8	1,2	1,1	0,9	2,9
Balanço ácido-base									
AP	kg CaCO ₃ t ⁻¹	209,4	-	34,4	-	244,0	-	119,4	-
NP	kg CaCO ₃ t ⁻¹	0,0	-	0,0	-	24,1	-	39,1	-
NNP	kg CaCO ₃ t ⁻¹	-209,4	-	-34,4	-	-219,8	-	-80,3	-

Embora as proporções mássicas de cada fração sejam semelhantes para as duas camadas, as características dos materiais separados densimetricamente apresentaram algumas diferenças importantes. Os dados indicaram que a camada Barro Branco possui vantagens em relação à camada Bonito em função dos seguintes aspectos: a) menor teor de cinzas e de enxofre na fração energética $d < 2,2$; b) menor teor de enxofre na fração intermediária $2,2 < d < 2,7$; c) maior teor de enxofre na fração pirítica $d > 2,7$. Assim, percebe-se uma maior facilidade de reprocessamento de rejeitos de carvão na camada Barro Branco. Isso ocorre devido a maior liberação dos componentes do material na Camada Barro Branco do que na Camada Bonito - matéria carbonosa, silicatos e pirita. A camada Barro Branco é menor em espessura, porém mais rica em carvão; enquanto que a camada Bonito é mais espessa, com o predomínio de carvão associado a folhelhos carbonosos (Kalkreuth et al., 2010). Essa maior facilidade de separação da camada Barro Branco em relação a Bonito é sabida na prática do beneficiamento pelos profissionais e já relatada na literatura (Feil et al., 2012; Mendonça Filho et al., 2013).

Em relação ao balanço ácido-base – potencial de geração de acidez (AP), potencial de neutralização (NP) e potencial de neutralização líquido (NNP) – a diferença encontrada nas amostras de rejeito bruto e fração intermediária para as camadas BB e BO implica em questões importante n que diz respeito à geração de DAM. O rejeito bruto da camada BB tem menor potencial de acidez que a camada BO. Além disso, considerando a proporção mássica e o AP da fração intermediária, o potencial ácido para a camada BB reduziu em 90% em comparação ao rejeito bruto e a BO reduziu somente 65%. O NP, decorrente da presença de

carbonatos na rocha, foi nulo na camada BB e de 24,1 kg CaCO₃ ton⁻¹ para camada BO. Como os valores de neutralização foram bem menores aos de acidificação, os NNP foram negativos para ambos os rejeitos. A fração intermediária da camada Barro Branco apresentou um NNP de -34,4 kg CaCO₃ ton⁻¹ e da Camada Bonito de -80,3 CaCO₃ ton⁻¹, indicando mais que o dobro de potencial de geração líquida de acidez. Quando ocorrem valores elevados de geração de acidez, supondo que este material seja disposto em módulos de rejeitos, aumentam-se os riscos de contaminação ao meio ambiente e elevam-se os custos das estações de tratamento, que precisam de maior quantidade de agentes neutralizantes para tratar a DAM (Weiler et al., 2016).

Ainda, deve-se ressaltar a crescente exploração da Camada Bonito nos últimos anos e o decaimento da produção da Camada Barro Branco. Conforme dados obtidos pelo SIECESC, 2017, no ano 2000, aproximadamente 70% da produção de carvão na região era da Camada Barro Branco e 30% da Camada Bonito. Atualmente, o cenário reverteu, de forma que a Camada Barro contribui com cerca de 35% da produção e camada Bonito, com 65%. Essa mudança também abre desafios referentes ao conhecimento, manejo e destinação dos produtos da mineração da Camada Bonito, exigindo ações de pesquisa e desenvolvimento que contribuam no cenário regional e nacional (considerando aspectos ambientais e a utilização de produtos que seriam obtidos com os rejeitos). Ainda, para se tornar viável, algumas mudanças (tecnológicas, gerenciais, estruturais e culturais) das partes interessadas devem ser realizadas, tanto por parte das empresas como do poder público e sociedade. Entre os principais desafios, citam-se a adequação das plantas de beneficiamento de carvão para separação densitária de rejeitos, concentração da pirita e o manejo (armazenamento, transporte e destinação) ambientalmente correto do material, evitando, por exemplo, a geração de águas ácidas e eventos de combustão espontânea da pirita.

4. CONCLUSÕES

O estudo mostrou que o beneficiamento gravimétrico dos rejeitos de carvão das camadas pode trazer benefícios ambientais à região carbonífera de Santa Catarina e possibilidades de usos aos rejeitos. Os rejeitos brutos de carvão mineral provenientes de ambas as camadas são passíveis de beneficiamento por processos gravimétricos para obtenção de concentrados com 30-32% de enxofre pirítico e, comparando-se os rejeitos de carvão remanescentes, após a retirada da pirita, é possível verificar considerável redução do potencial de geração de acidez. Entretanto, as camadas apresentam características distintas dentro da proposta estudada. Devido à maior dificuldade na concentração da pirita, a fração intermediária da camada Bonito apresenta maior teor de enxofre e maior potencial de geração de acidez que a camada Barro Branco, implicando em maiores prejuízos do ponto de vista ambiental e econômico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FINEP e Rede de Carvão pelo apoio financeiro e a SIECESC pelas informações prestadas.

6. REFERÊNCIAS

- Amaral Filho, J.R.; Schneider, I.A.H.; Brum, I.A.S.; Sampaio, C.H.; Miltzarek, G.; Schneider, C.H. Caracterização de um Depósito de Rejeitos para o Gerenciamento Integrado dos Resíduos de Mineração na Região Carbonífera de Santa Catarina, Brasil. *Revista Escola de Minas*, v. 66, n. 3, p. 347-353, 2013.
- ASTM D3173-11(2011) Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, PA. 4p., 2011.
- ASTM D4371-06 (2012) Standard Test Method for Determining the Washability Characteristics of Coal. West Conshohocken, PA, 11p., 2012a.
- ASTM D3174-12 (2012) Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. West Conshohocken, PA. 6p, 2012b.
- ASTM D2492-02 (2012) Standard Test Method for Forms of Sulfur in Coal. West Conshohocken, PA. 5p., 2012c.
- 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.
- BRASIL. 10º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma, 218 p., 2016.
- 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.
- ESA/EFMA, European Sulphuric Acid Association and European Fertilizer Manufacturer Association. Production of Sulphuric Acid. Booklet No. 3/8, Production of Sulphuric Acid, 2000.
- Feil, N.F., Sampaio, C.H., Wotruba, H. Influence of jig frequency on the separation of coal from the Bonito seam – Santa Catarina, Brazil, *Fuel Process. Technol.* V. 96, p. 22–26, 2012.
- 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, n.3-4, p.213-236, 2010.
- Lapakko, K. Mine Waste Drainage Quality Prediction: A Literature Review. Draft Paper. Minnesota Department of Natural Resources, Division of Minerals, St. Paul, MN. 48p., 1993.
- Leonard, J.W. Coal Preparation. 5th edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado USA, p. 298, 1991.
- 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, n. 20, p. 9783-9787, 2011.
- Mendonça Filho, J.G., Sommer, M.G., Klepzig, M.C., Mendonça, J.O., Silva, T.F., Kern, M.L., et al. Permian carbonaceous rocks from the Bonito Coalfield, Santa Catarina, Brazil: organic facies approaches. *Int J Coal Geol*, v. 111, p. 23–36, 2013.
- 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, n. 5, p. 550-558, 2010.
- Rocha-Nicoleite, E., Overbeck, G. E., Müller, S. C., Degradation by coal mining should be priority in restoration planning. *Perspect. Ecol. Conserv.* v15, n.3, p.197–200, 2017.

Romano Neto, R., Garavaglia, L., Vicente, R.; Barbosa, V. C.; Krebs, A. S. J. Monitoramento de indicadores ambientais na bacia carbonífera de Santa Catarina. In: V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2017, Criciúma. Anais do V CBCM. 2017.

Runkel, M., Sturm, P. Pyrite roasting, an alternative to sulphur burning. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 109, p.491-496, 2009.

SIECESC – Sindicato das Indústrias Extratoras de Carvão do Estado de Santa Catarina (2017) Dados estatísticos. Disponível em: <http://www.satc.edu.br/siecesc/estatistica.asp>. Acesso em: 02/12/2017.

Silva, R.A.S., Menezes, J.C.S.S., Lopes, F.A., Kirchheim, A.P., Schneider, I.A.H., 2017. Synthesis of a Goethite Pigment by Selective Precipitation of Iron from Acidic Coal Mine Drainage. Mine Water and the Environment, 36, 386–392.

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. 203 p, 1978.

Tavares, L.M.M., Sampaio, C.H. Beneficiamento Gravimétrico. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 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.

Weiler, J.; Amaral Filho, J.R.; Schneider, I.A.H. Processamento de rejeito de carvão visando a redução de custos no tratamento da drenagem ácida de minas - estudo de caso na Região Carbonífera de Santa Catarina. Eng. Sanit. Ambient., v. 21, n. 2, p. 337-345, 2016.