

CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL EM TERMOS DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DOS REJEITOS DE CARVÃO DA MINA DE MOATIZE - MOÇAMBIQUE

Aline C. da SILVA¹; Jéssica WEILER²; Beatriz A. FIRPO³; Ivo A. H. SCHNEIDER⁴; Eunírio Z. FERNANDES⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, aline_capoani@hotmail.com; ²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jessica.weiler18@gmail.com; ³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, bia.firpo7@gmail.com; ⁴Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ivo.andre@ufrgs.br; ⁵Instituto Tecnológico Vale, eunirio.zanetti@itv.org

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo caracterizar os rejeitos de carvão gerados na exploração da camada Chipanga da Mina de Moatize – Moçambique, África. O processo de lavra ocorre pelo método a céu aberto. O beneficiamento do carvão é feito por ciclones de meio denso e por processos gravimétricos de finos (espirais ou elutriação) e flotação. A metodologia adotada neste trabalho incluiu a amostragem, quantificação e a caracterização dos rejeitos grossos e finos. Utilizando o material amostrado em quatro níveis da camada Chipanga, denominadas, da base para o topo, de LC456, MLCU, UCB e UCT, foi realizada a caracterização através de análise imediata, formas de enxofre, composição mineralógica, potencial de geração de acidez (por balanço ácido-base) e estudos de lixiviação em células úmidas (conforme método ASTM D 5744). Com os resultados obtidos concluiu-se que o material não apresenta potencial de geração de acidez, sendo que esse fato pode ser explicado pela baixa concentração de pirita e a presença de carbonatos. Assim, a geração da drenagem ácida não é um problema esperado nas operações de mineração e manuseio/descarte de rejeitos da camada Chipanga.

Palavras-chave: rejeito de carvão, drenagem ácida, meio ambiente, camada Chipanga - Moatize.

ABSTRACT

The present study aims to characterize the coal waste generated during the exploration of the Chipanga seam at Moatize Mine – Mozambique, Africa. There, mining operation occurs by the open pit method. Coal processing is carried out by dense medium cyclones and the fines coal by gravity processes (spirals or elutriation) and flotation. Studies' methodology included sampling, quantification, and characterization of both coarse and fine coal discards. Characterization of four levels of the Chipanga seam, named from the base to the top as LC456, MLCU, UCB, and UCT, was performed through immediate analysis, sulfur forms, mineralogical composition, acidity generation potential (acid-base balance), and humidity cell leaching studies (according to method ASTM D 5744). It is possible to conclude that the material does not present acidity generation potential, and this fact can be explained by the low concentration of pyrite and the presence of carbonates. Thus, acid rock generation is not expected during the mining operations and waste management/disposal of the Chipanga seam.

Key-words: coal discard, acid rock drainage, environment, Chipanga seam - Moatize

1 INTRODUÇÃO

A extração de carvão de mineral é uma atividade mundialmente empregada. A maioria das jazidas necessitam de uma etapa de beneficiamento, com intuito de atender as especificações do setor metalúrgico e térmico. Contudo, nos processo de concentração, são gerados rejeitos – basicamente rochas

sedimentares, com maior ou menor associação com enxofre.

Impactos ambientais estão relacionados com as extensas áreas destinadas à sua disposição e a possível formação de drenagem ácida de minas (DAM) (KOMNITSAS et. al., 2001; BIAN et. al., 2010). A DAM se dá pela oxidação da pirita na presença de oxigênio e água, e é em muito acelerada na presença de bactérias acidofílicas

(KONTOPOULOS, 1998; AKCIL e KOLDAS, 2006; SIMATE e NDLOVU, 2014).

Assim, a disposição de rejeitos com potencial de geração de acidez é um dos principais problemas ambientais enfrentados pela indústria da mineração de carvão. Contudo, através da caracterização do material, é possível avaliar o potencial de geração de acidez, prevendo possíveis riscos e auxiliando no gerenciamento do mesmo (US EPA, 1994; LAPAKKO e ANTONSON, 2006; SAPSFORD et. al. 2009; HESKET et. al., 2010; LENGKE et. al. 2010; BOUZAHAZAH et. al., 2015).

A gestão de rejeitos engloba, por exemplo, formas de redução, reutilização e disposição ambientalmente corretas, minimizando o passivo ambiental que a disposição irregular pode vir a causar (REDDICK et. al., 2008; McLELLAN et. al., 2009; ZHU e CHERNI, 2009; FRANKS et. al., 2011; CHUGH et. al., 2014).

Na Mina de Moatize, situada na Província de Tete, Moçambique - África, é explorado carvão mineral com rank “carvão betuminoso alto volátil” para o mercado metalúrgico e térmico. Por ser uma mina relativamente nova, pouco se sabe sobre as características dos rejeitos e o seu potencial de geração de acidez.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar e avaliar os potenciais riscos ambientais dos rejeitos de carvão gerados na Mina de Moatize. Os estudos de caracterização foram realizados no rejeito grosso e no rejeito fino em quatro seções de lavra da camada Chipanga.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho incluiu a amostragem, quantificação e a caracterização dos rejeitos. Os rejeitos de carvão que foram estudados são provenientes de extração localizada na mina da Vale, na Província de Tete em Moçambique, África.

A camada de carvão que vem sendo minerada é denominada Chipanga, com aproximadamente 30 metros de espessura, a qual foi dividida em quatro subcamadas. Nessas subcamadas ocorre um enriquecimento do carvão da base para o topo, sendo que as camadas inferiores possuem menor geração de rejeitos do que as camadas superiores. A Mina de Moatize é lavrada pelo método a céu aberto. O beneficiamento

de grossos ($50 \text{ mm} > d > 2 \text{ mm}$) é feito por ciclones de meio denso e os finos ($d < 2 \text{ mm}$), por espirais, elutriação e flotação. Os rejeitos grossos e finos foram estudados separadamente.

A amostragem do material foi realizada pela Vale e compreendeu vários meses de produção. A preparação das amostras incluiu processo de britagem em britador de mandíbulas, cominuição em moinho de rolos e após moinho pulverizador para um diâmetro máximo de 60#.

A caracterização dos materiais foi realizada pelas seguintes análises:

- Análise de cinzas:

O teor de cinzas é a massa residual do mineral resultante da combustão dos compostos orgânicos. Foi realizada conforme procedimento ASTM-D3174 (2012).

- Formas de enxofre:

O teor de enxofre é importante para quantificar as formas de enxofre presentes na amostra. O teor de enxofre total foi determinado no equipamento LECO SC 457. As formas de enxofre sulfático e pirítico foram determinadas utilizando procedimentos titulométricos (ASTM, 2007). O enxofre orgânico foi calculado pela subtração do enxofre total pelas demais formas, de acordo com a equação:

$$\text{Sorg.} = \text{Stotal} - (\text{Spirítico} + \text{Ssulfático}) \quad [\text{Eq. 01}]$$

- Umidade

A análise de umidade foi realizada conforme ASTM D 3173 (2011). Com este resultado foi possível converter os valores resultantes da análise de cinzas e enxofre para base seca.

- Composição mineralógica:

Realizada pela técnica de difração de raios-x (DRX). Com este método é possível identificar os minerais cristalinos constituintes da amostra de maneira qualitativa.

- Potencial de geração de acidez:

O potencial de geração de acidez e o potencial de neutralização de acidez foram determinados pelo método de contabilização de ácidos e bases. O método utilizado foi o ABA Tradicional – Acid Basic-Accounting Method (ABA) – desenvolvido por Sobek (Sobek et al. 1978). Os resultados decorrem da comparação do potencial de

acidificação (AP) com o potencial de neutralização (NP) pelos componentes minerais de uma amostra. O teste envolve o cálculo do potencial de produção de acidez (AP) da amostra a partir da concentração de enxofre e a medição do potencial de neutralização (NP) (EPA, 1994).

Utilizando esses dados pode ser calculado o potencial de neutralização líquido (NNP) = NP – AP, onde o AP, NP e NNP são expressos em kg CaCO₃/t de amostra.

A determinação do potencial de acidez (AP) foi realizada a partir do teor de enxofre total. Estequiometricamente, um mol de CaCO₃ é requerido por mol de S:

$$AP \text{ (kg CaCO}_3\text{/t amostra)} = (1000/32) \times \%S \quad [\text{Eq.02}]$$

A determinação do Potencial de Neutralização foi realizada por ataque ácido para consumir os minerais neutralizantes, seguido de titulação estequiométrica com NaOH até pH 7,0.

$$NP \text{ (kg CaCO}_3\text{/t amostra)} = (\text{HCl cons., g/g de amostra}) \times (50/36,5) \times 1000 \quad [\text{Eq.03}]$$

Os critérios de análise do potencial de geração de acidez dos materiais foram os seguintes (EPA, 1994):

NNP < -20 – formação de ácido

NNP > +20 – sem formação de ácido

-20 < NNP < +20 – difícil verificação do potencial

- Estudos de lixiviação em células úmidas:

Ensaios cinéticos são empregados em resíduos provenientes da mineração para prever e caracterizar os efluentes gerados, em termos de acidez e alcalinidade, concentração de componentes inorgânicos e orgânicos. Com este ensaio, buscou-se simular as reações naturais que ocorrem no local de estudo. Os dados são examinados por mudanças na qualidade da água através do tempo.

O ensaio, conforme descrito na norma D 5744 (ASTM, 1996) consistiu em utilizar uma amostra de 1000 gramas com granulometria inferior a 6,3 mm em recipiente fechado por onde será injetado e retirado ar e água ciclicamente. Inicialmente a amostra foi submetida a lixiviação com 500 mL de água destilada, sendo o lixiviado coletado para análise. Após injetou-se ar seco nas amostras durante três dias, seguido por três dias com ar úmido e um dia para lixiviação com 500 mL de água

destilada. O ciclo se repetiu durante 20 semanas com a coleta do lixiviado para análise de pH, Eh, acidez, alcalinidade, sulfatos e metais.

O ensaio foi realizado em quatro células. Duas contendo uma mistura de amostras de rejeitos grossos e duas contendo uma mistura de amostras de rejeitos finos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da análise de cinzas e da análise de enxofre total e sua especiação.

Os teores de cinzas foram analisados para cada uma das amostras de rejeitos grossos e finos das quatro subcamadas estudadas. Os valores não tiveram muita variação entre as camadas nem entre as granulometrias de grossos e finos. Os valores médios foram de 62,5% para os grossos e de 56,3% para os finos.

Com resultados obtidos nas análises de enxofre total e sua especiação (pirítico, sulfático e orgânico) não foi possível indicar diferença significativa na quantidade de enxofre entre as camadas. Entretanto, foi possível perceber uma diferença entre as granulometrias. O rejeito fino apresenta maior quantidade de enxofre total (média de 1,3%) que o rejeito grosso (média 0,9%). Isso também pode ser percebido nas formas do enxofre, como no pirítico, indicando que os rejeitos finos (média de 0,6%) possuem maior quantidade de pirita que rejeito grosso (média de 0,4%) e, por isso, maior potencial à geração de acidez.

Tabela 1 – Análise de enxofre total e sua especiação.

Camada	Amostra	Cinzas (%)	S _{total} (%)	S _{pirítico} (%)	S _{sulfático} (%)	S _{orgânico} (%)
UCT	Finos	54,0	1,3	0,7	0,2	0,4
	Grossos	61,4	1,0	0,6	0,1	0,4
UCB	Finos	65,4	1,3	0,6	0,2	0,5
	Grossos	60,1	1,1	0,4	0,0	0,6
MLCU	Finos	52,3	1,2	0,4	0,1	0,7
	Grossos	61,8	0,8	0,4	0,0	0,3
LC	Finos	53,5	1,5	0,7	0,2	0,6
	Grossos	66,7	0,7	0,3	0,2	0,1
Média finos		56,3	1,3	0,6	0,2	0,5
Média grossos		62,5	0,9	0,4	0,1	0,4

Através da análise de DRX foi possível identificar os compostos cristalinos (Tabela 2).

Observa-se que em todas as amostras o quartzo aparece como componentes majoritários. A calcita, forma cristalina do carbonato de cálcio (CaCO_3), é um componente sempre presente como minoritário. A presença de pirita não foi identificada, possivelmente devido as baixas concentrações no material.

Tabela 2 – Componentes cristalinos majoritários e minoritários identificados nas amostras.

Camada	Amostra	Majoritários	Minoritários
UCT	Finos	Quartzo	Halita, calcita, hematita
	Grossos	Quartzo	Calcita, hematita
UCB	Finos	Quartzo	Calcita, hematita
	Grossos	Quartzo, hematita	Calcita
MLCU	Finos	Quartzo	Calcita, hematita
	Grossos	Quartzo, hematita	Calcita
LC	Finos	Quartzo	Calcita
	Grossos	Quartzo, alumina	Calcita

Os resultados do ensaio estático de contabilização de ácidos e bases são apresentados na Tabela 3. Observa-se que o potencial de geração de acidez é muito inferior ao potencial de neutralização para todas as amostras analisadas, resultando em um potencial de neutralização líquido superior a $+200 \text{ kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$. Esse valor indica que a amostra não possui potencial de gerar acidez, fato esse explicado pela maior concentração de componentes alcalinizantes, como a calcita, do que acidificantes, como a pirita.

Tabela 3 – Resultados do teste estático de contabilização de ácidos e bases.

Camada	Amostra	NP ($\text{kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$)	AP ($\text{kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$)	NNP ($\text{kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$)
UCT	Finos	305,3	39,3	266,1
	Grossos	238,3	31,9	206,4
UCB	Finos	196,4	40,7	155,7
	Grossos	303,7	33,6	270,1
MLCU	Finos	277	38,1	238,9
	Grossos	199,7	24,3	175,4
LC	Finos	306,1	48,1	258
	Grossos	245,1	21,2	223,9
Média finos		271,2	41,6	229,7
Média grossos		246,7	27,7	218,9

Na Figura 1 são apresentados os resultados das análises semanais de pH, Eh, e na Figura 2 os resultados de acidez e alcalinidade dos ensaios cinéticos realizados.

Observa-se que o pH da água lixiviada do rejeito fino se manteve próximo da neutralidade (entre 6 e 8) durante quase todo período do estudo. Já a amostra de rejeito grosso se manteve numa média um pouco inferior, com pH variando entre 4 e 8. O potencial redox variou entre $+200\text{mV}$ e $+500\text{mV}$ para os lixiviados, indicando um comportamento predominantemente oxidativo.

Em relação à acidez e alcalinidade, os maiores valores ocorreram para o rejeito fino. A maior acidez provavelmente se deve à maior quantidade de enxofre pirítico nessa amostra. Entretanto, os valores de alcalinidade superaram esses valores.

Assim, a partir dos dados obtidos com os ensaios estáticos e cinéticos das amostras de rejeito grossos e finos, é possível dizer que não há potencial de geração de acidez.

Figura 1 - Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – pH e Eh

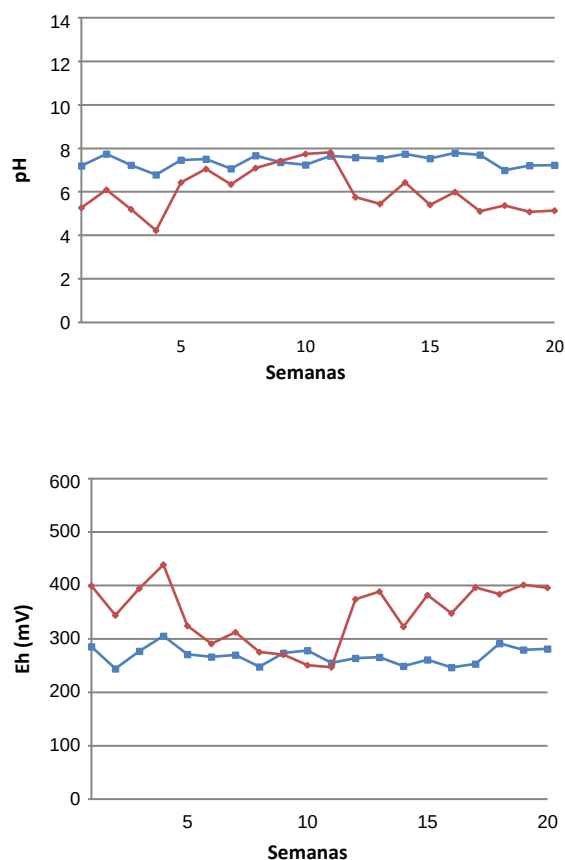
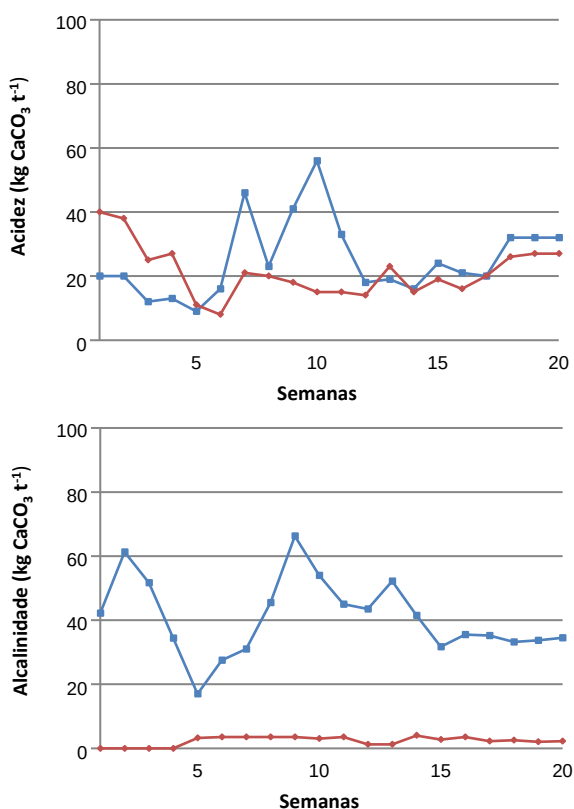


Figura 2 – Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – acidez e alcalinidade



4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos concluiu-se que o material não apresenta potencial de geração de acidez. Esse fato pode ser explicado pela baixa concentração de pirita e a presença de carbonatos. Os resultados dos estudos estáticos e cinéticos mostraram que o material possui tendência a formação de um lixiviado neutro a levemente alcalino. Assim, a geração da drenagem ácida não é um problema esperado na mineração e disposição de rejeitos na exploração da camada Chipanga. Os resultados desse trabalho podem ajudar no manejo e disposição dos rejeitos grossos e finos na dinâmica da mina.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores ao CNPq, à Capes e ao ITV pelas bolsas de estudo e recursos concedidos para o desenvolvimento do presente projeto.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 10.007**. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 25p, 2004d.
- AKCIL, A.; KOLDAS, S. **Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies**. J Clean Prod. 14:1139-1145p, 2006.
- ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D 5744**: Standard test method for accelerated weathering of solid materials using a modified humidity cell. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007a.
- ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D 3173**: Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- ASTM - American Society for Testing and Material. **ASTM D 3174**: Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- BIAN, Z.; INYANG, H. I.; DANIELS, J. L.; OTTO, F.; STRUTHERS, S. **Environmental issues from coal mining and their solutions**. Min Sci Technol, 20:215-223, 2010.
- BOUZAHAZAH, H.; BANZAAZOUA, M.; BUSSIÈRE, B.; PLANTE, B. **ASTM: normalized humidity cell kinetic test: protocol improvements for optimal sulfide tailings reactivity**. Mine Water Environ., 34:242-257p, 2015.
- CHUGH, Y. P.; BEHUM, P. T. **Coal waste management practices in the USA: an overview**. Int. J. Coal Sci. Technol. 1:163-176p, doi: 10.1007/s40789-014-0023-4, 2014.
- EPA - Environmental Protection Agency. **EPA 530-R-94-036**: Acid Mine Drainage Prediction. Technical Document, 1994.
- FRANKS, D. M.; BOGER, D. V.; CÔTE, C. M.; MULLIGAN, D. R. **Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes**. Resour. Policy 36:114-122p, doi: 10.1016/j.resourpol.2011.12.001, 2011.
- HESKETH, A. H.; BROADHURST, J. L.; VAN HILLE, R. P.; HARRISON, S. T. L. **Biokinetic test for the characterization of AMD generation potential of sulfide mineral wastes**. Hydrometallurgy, 104:459-464p, 2010.

KOMNITSAS, K.; PASPALIARIS, I.; ZILBERCHMIDT, M.; GROUDEV, S. N. **Environmental impacts at coal waste disposal sites-efficiency of desulfurization technologies.** Glob. Nest Int. J 3:109-116p, 2001.

KONTOPOULOS, A. Acid mine drainage control. In CASTRO, S.H., VERGARA, F., SÁNCHEZ, M.A. (eds.). **Effluent treatment in the mining industry.** University of Concepción, Concepción, 57-118p, 1998.

LAPAKKO, K. A.; ANTONSON, D. A. **Pyrite oxidation rates from humidity cell testing of greenstone rock.** In: Barnhisel RI (ed), Proc, 7th International Conf. of Acid Rock Drainage (ICARD), American Soc. of Mining and Reclamation (ASMR), Lexington, USA, 1007-1025p, 2006.

LAPAKKO, K. A.; TRUJILLO, E. **Pyrite oxidation rates from laboratory tests on waste rock.** Proc, 10th ICARD and IMWA Annual Conf., Santiago, Chile, 2015.

LENGKE, M. F.; DAVIS, A.; BUCKNAM, C. **Improving management of potentially acid generating waste rock.** Mine Water Environ, 29:29-44p, 2010.

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.** J Clean Prod., 17:1414-1425p, 2009.

REDDICK, J. F.; BLOTTNITZ, H. Von.; KOTHUIS, B. **Cleaner production in the South African coal mining and processing industry: a case study investigation.** Int. J. Coal Prep Util., 28:224-236p, 2008.

SAPSFORD, D. J.; BOWEL, R. J.; DEY, M.; WILLIAMS, K. P. Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage. Miner Eng., 22:25-36p, 2009.

SIMATE, G. S.; NDLOVU, S. **Acid mine drainage: Challenges and opportunities.** J. Environ. Chem. Eng. 2:1785-1803p, 2014.

ZHU, S.; CHERNI, J. A. **Coal mining in China: policy and environment under market reform.** Int. J. Energy Sect. Manag. 3: 9-28p, doi: 10.1108/17506220910947827, 2009.