

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

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

ALINE CAPOANI DA SILVA

Dissertação para a obtenção do título de Mestre  
em Engenharia.

Porto Alegre, agosto de 2018.

**ALINE CAPOANI DA SILVA**

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

Trabalho realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Ivo André Homrich Schneider

Porto Alegre, agosto de 2018.

Esse trabalho foi julgado adequado como dissertação de mestrado em Engenharia, área de concentração de Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider

Banca Examinadora:

---

Dr. Cassiano Rossi dos Santos

---

Prof. Dr. Irineu Antônio Schadach de Brum

---

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

## **AGRADECIMENTOS**

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Capes e ao LTM, pela infraestrutura e recursos disponibilizados.

A Vale pelo fornecimento das amostras.

Ao meu orientador Ivo André Homrich Schneider pela orientação, pelo tempo disponível, pela paciência, dedicação e confiança.

A todos que ajudaram na preparação do material e nos ensaios realizados.

A minha irmã e meu namorado pelo apoio e companheirismo.

## RESUMO

O presente trabalho teve 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, 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, denominados, da base para o topo, de LC456, MLCU, UCB e UCT, foi realizada a caracterização através de análise imediata, formas de enxofre, análise granulométrica, massa específica, composição mineralógica, composição elementar, 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 verificou-se que não há concentrações expressivas de metais tóxicos no material. O rejeito não apresentou 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. No transcorrer do estudo, foram sugeridas algumas ações para a redução do volume, reutilização e reciclagem do rejeito de carvão.

**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. Mining operation occurs by the open pit method. Coal processing is carried out by dense medium cyclones, gravity processes of fines (spirals or elutriation) and flotation. The work 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 analysis, specific weight, mineralogical composition, acidity generation potential (acid-base balance), and humidity cell leaching studies (according to method ASTM D 5744). The results demonstrated low concentrations of toxic metals in the coal waste. 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 and waste management/disposal operations of the Chipanga seam. Some suggestions to reduce the volume, reuse and recycle the coal waste were addressed in the course of the study.

**Keywords:** coal discards, acid rock drainage, environment, Chipanga seam – Moatize.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de carvões minerais e principais usos. ....	13
Figura 2. Localização da província de Tete. ....	20
Figura 3. Esboço da série produtiva em Moatize. ....	21
Figura 4. Drenagem ácida em mina de carvão, Santa Catarina - Brasil. ....	25
Figura 5. Drenagem ácida em mina de carvão - Andaluzia, Espanha. ....	25
Figura 6. Drenagem ácida em mina de carvão, Virginia - Estados Unidos. ....	25
Figura 7. Subdivisões da camada Chipanga. ....	30
Figura 8. Tambores com amostras de carvão armazenadas junto ao prédio do LTM. ....	31
Figura 9. Fluxograma simplificado da planta de beneficiamento. ....	32
Figura 10. Modelo do método de estudo com células úmidas. ....	37
Figura 11. Curvas granulométricas dos rejeitos da camada UCT. ....	40
Figura 12. Curvas granulométricas dos rejeitos da camada UCB. ....	40
Figura 13. Curvas granulométricas dos rejeitos da camada MLCU. ....	41
Figura 14. Curvas granulométricas dos rejeitos da camada LC456. ....	41
Figura 15. Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – pH. ....	49
Figura 16. Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – Eh. ....	49
Figura 17. Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – acidez. ....	50
Figura 18. Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – alcalinidade. ....	50
Figura 19. Valores de K (potássio) ao longo das semanas de estudo. ....	50
Figura 20. Valores de Ca (cálcio) ao longo das semanas de estudo. ....	51
Figura 21. Valores de Mg (magnésio) ao longo das semanas de estudo. ....	51
Figura 22. Valores de Cu (cobre) ao longo das semanas de estudo. ....	51
Figura 23. Valores de Zn (zinco) ao longo das semanas de estudo. ....	52
Figura 24. Valores de Fe (ferro) ao longo das semanas de estudo. ....	52
Figura 25. Valores de Mn (manganês) ao longo das semanas de estudo. ....	52
Figura 26. Valores de Na (sódio) ao longo das semanas de estudo. ....	53
Figura 27. Valores de Ni (níquel) ao longo das semanas de estudo. ....	53
Figura 28. Valores de Pb (chumbo) ao longo das semanas de estudo. ....	53
Figura 29. Valores de Al (alumínio) ao longo das semanas de estudo. ....	54
Figura 30. Valores de Co (cobalto) ao longo das semanas de estudo. ....	54
Figura 31. Valores de As (arsênio) ao longo das semanas de estudo. ....	54
Figura 32. Valores de Ba (bário) ao longo das semanas de estudo. ....	55
Figura 33. Valores de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (sulfato) ao longo das semanas de estudo. ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Rank do carvão e valores de parâmetros usados na estimativa. ....	13
Tabela 2. Grupos de macerais do carvão. ....	14
Tabela 3. Minerais presentes na fração orgânica do carvão. ....	14
Tabela 4. Maiores reservas mundiais de carvão segundo a AIE - Agência Internacional de Energia. ....	16
Tabela 5. Tabela climática da região da Mina Moatize.....	22
Tabela 6. Métodos de controle da drenagem ácida de minas segundo Kontopoulos (1998). ....	24
Tabela 7. Métodos de ensaios estáticos. ....	26
Tabela 8. Principais ensaios cinéticos. ....	28
Tabela 9. Reagentes utilizados.....	33
Tabela 10. Equipamentos utilizados. ....	33
Tabela 11. Abertura das peneiras utilizadas para análise granulométrica. ....	35
Tabela 12. Massa, teores de cinzas e de enxofre por camada para carvão ROM, produtos e rejeitos. ....	39
Tabela 13. Parâmetros granulométricos das camadas analisadas.....	41
Tabela 14. Distribuição granulométrica média dos rejeitos grossos. ....	42
Tabela 15. Distribuição granulométrica média dos rejeitos finos. ....	42
Tabela 16. Resultados do ensaio de massa específica para os rejeitos grossos. ....	43
Tabela 17. Resultados do ensaio de massa específica para os rejeitos finos. ....	43
Tabela 18. Resultados do ensaio de massa específica para a mistura de rejeitos grossos e finos. ....	43
Tabela 19. Resultados da análise imediata realizada nos rejeitos de carvão. ....	44
Tabela 20. Análise de enxofre total e suas especiações. ....	45
Tabela 21. Componentes cristalinos majoritários e minoritários identificados nas amostras. ....	45
Tabela 22. Resultados do teste estático de contabilização de ácidos e bases. ....	46
Tabela 23. Resultado dos metais ambientalmente disponíveis no rejeito grosso, conforme EPA 3050. ....	47
Tabela 24. Resultado dos metais ambientalmente disponíveis no rejeito fino, conforme EPA 3050. ....	48
Tabela 25. Concentração de metais nos rejeitos grossos e finos e os valores de prevenção (VP) e de investigação (VI) para áreas agrícolas, residenciais e industriais (em mg kg <sup>-1</sup> ) previsto na Resolução CONAMA 420/2009. ....	48
Tabela 26. Valores da quantidade de metais acumulados nos rejeitos grossos ao longo das 20 semanas de estudo em células úmidas. ....	56
Tabela 27. Valores da quantidade de metais acumulados nos rejeitos finos ao longo das 20 semanas de estudo em células úmidas. ....	57
Tabela 28. Valores das formas de enxofre e dos parâmetros do teste de contabilização de ácidos e bases antes e após as 20 semanas do ensaio em células úmidas para os rejeitos grossos e finos.....	58

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	10
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1.	Definição e constituição do carvão mineral .....	12
2.2.	Dados de consumo e produção .....	15
2.3.	Problemas ambientais causados pela mineração.....	17
2.4.	Bacia carbonífera de Moatize .....	19
2.5.	Drenagem ácida de mina .....	22
2.5.1.	Reações de geração.....	22
2.5.2.	Métodos de controle da DAM.....	24
2.6.	Avaliação do potencial de geração de acidez .....	26
2.6.1.	Ensaio estáticos .....	26
2.6.2.	Ensaio cinéticos .....	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
3.1.	Materiais.....	30
3.1.1.	Rejeitos de carvão .....	30
3.1.2.	Água e Reagentes.....	32
3.1.3.	Equipamentos .....	33
3.2.	Métodos .....	33
3.2.1.	Análise de cinzas .....	33
3.2.2.	Matéria volátil .....	34
3.2.3.	Carbono fixo .....	34
3.2.4.	Formas de enxofre .....	34
3.2.5.	Umidade .....	34
3.2.6.	Análise granulométrica .....	34
3.2.7.	Massa específica .....	35
3.2.8.	Composição mineralógica .....	35
3.2.9.	Potencial de geração de acidez .....	36
3.2.10.	Estudo de lixiviação em células úmidas .....	37
3.2.11.	Quantificação de metais pelo método EPA 3050.....	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
4.1.	Dados de produção da mina de Moatize .....	39
4.2.	Análise granulométrica dos rejeitos .....	40
4.3.	Massa específica.....	42
4.4.	Análise imediata e de enxofre .....	44
4.5.	Composição mineralógica.....	45
4.6.	Contabilização de ácidos e bases.....	45
4.7.	Quantificação de metais pelo método EPA 3050 .....	46
4.8.	Ensaio cinético em células úmidas .....	49
5.	CONCLUSÕES .....	60
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	62
	REFERÊNCIAS .....	63
	ANEXOS .....	70

## 1. INTRODUÇÃO

Na atividade de mineração ocorre a movimentação de uma quantidade significativa de material e, como consequência, a geração de grande quantidade de resíduos. A correta disposição desses resíduos é essencial para que não sejam gerados reflexos negativos no ambiente.

Os impactos ambientais associados à disposição de rejeitos de mineração representam um passivo ambiental importante nessa atividade, considerando principalmente o volume gerado, bem como as extensas áreas destinadas à sua estocagem. A disposição inadequada de rejeitos com potencial de geração de acidez é um dos problemas ambientais enfrentados, sendo necessário selecionar o local adequado para disposição e realizar a preparação do terreno, buscando assim prevenir o escoamento superficial e a infiltração dos contaminantes.

A Drenagem Ácida de Minas (DAM) é um dos problemas ambientais mais sérios enfrentados pelo setor da mineração. Resulta de reações químicas e biológicas de sulfetos metálicos na presença de ar, água e bactérias acidofílicas; ocasionando a geração de íons dissolvidos em meio aquoso – no caso de sulfetos de ferro de  $H^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  e  $SO_4^{2-}$ . Este tipo de poluição é comum em áreas de mineração de carvão, uma vez que a pirita e a marcassita (ambas  $FeS_2$ ) são encontradas nas jazidas de carvão. Os poluentes da drenagem ácida de mina afetam a qualidade da água baixando o pH, reduzindo a alcalinidade natural, aumentando a dureza total bem como a concentração de sulfatos e crescendo quantidades indesejáveis de ferro, manganês, alumínio e outros metais, uma vez que a elevada acidez dissolve metais presentes na matéria mineral. Estas fontes permanecem ativas por décadas e até mesmo por séculos após sua produção (Kontopoulos, 1998).

Ensaio estáticos e cinéticos foram desenvolvidos para avaliar o potencial de geração de DAM de um determinado material rochoso. Os ensaios estáticos possibilitam a classificação das amostras segundo o seu potencial de geração de acidez e quantificar a relação entre componentes geradores de acidez e geradores de alcalinidade. Ensaio cinéticos permitem determinar o comportamento da geração de ácido ao longo do tempo, bem como a qualidade esperada da drenagem (EPA, 1994).

Os rejeitos de carvão estudados neste trabalho foram provenientes da exploração da camada Chipanga pela empresa Vale, na Mina de Moatize, localizada na província de Tete em Moçambique – África. O carvão mineral explorado possui rank “carvão betuminoso alto volátil”,

comercializado para o mercado metalúrgico e térmico. A camada explorada possui cerca de 30 metros de espessura, havendo enriquecimento do carvão do topo para a base. A capacidade da mina é de 34 milhões de toneladas métricas de ROM por ano, com uma vida útil estimada até o ano de 2049. Deste total, são produzidas 18 a 22 milhões de toneladas por ano de produtos, sendo 65% de carvão coqueificável e 35% de carvão metalúrgico.

Assim, os objetivos do trabalho foram:

- Caracterizar os rejeitos de carvão em termos de análise imediata, análise granulométrica, massa específica, análise elementar (conforme EPA 3050), formas de enxofre e composição mineralógica;
- Determinar o potencial de geração de acidez dos rejeitos;
- Avaliar o comportamento do material em células úmidas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordará os seguintes temas: definição e constituição do carvão mineral, consumo e produção de carvão, problemas ambientais, bacia carbonífera de Moatize, drenagem ácida de mina e avaliação do potencial de geração de acidez.

### 2.1. Definição e constituição do carvão mineral

O carvão mineral é uma rocha sedimentar formada pela decomposição, preservação e compactação de matéria orgânica como troncos, raízes, galhos e folhas de árvores, que foi confinada em ambiente anaeróbico, submetida a determinadas condições de temperatura e pressão em um longo processo no tempo geológico. É composto por átomos de carbono (50 a 95%), oxigênio, nitrogênio, enxofre, associados a outros elementos rochosos (como arenito, siltito, folhelhos e diamictitos) e minerais, como a pirita.

O carvão ocorre geralmente em camadas estratificadas, que vão de poucos centímetros a centenas de metros de espessura, e sua cor varia do marrom ao preto. Quanto mais intensa a pressão e a temperatura a que a camada de matéria vegetal for submetida, e quanto maior o tempo, mais alto será o grau de carbonificação atingido (*rank*) e melhor a qualidade do carvão. A qualidade do carvão depende da natureza da matéria vegetal que o formou, do clima, da localização geográfica e da evolução geológica da região onde é encontrado. As regressões e transgressões marinhas, a circulação de águas salobras, a deposição sedimentar e as transformações físico-químicas também concorrem para a sua formação e composição. Classifica-se geralmente em quatro tipos: a turfa (com cerca de 60% de Carbono), o linhito (70%), a hulha ou carvão betuminoso (80 a 85%) e o antracito (90%). Nesta ordem, aumenta o *rank* e diminui a concentração de hidrogênio (Monteiro, 2004).

Há ainda outro índice qualitativo para o carvão mineral segundo o Balanço Mineral Brasileiro (DNPM,2001), denominado de *grade*. Este índice mede de forma inversamente proporcional o percentual em massa de matéria mineral incombustível (cinzas) presente em uma camada carbonífera. Um alto *grade* significa que o carvão possui um baixo percentual de cinzas misturado à matéria carbonosa, conseqüentemente, melhorando sua qualidade.

A Tabela 1 lista algumas das propriedades dos carvões minerais e indica os principais parâmetros empregados na classificação dos carvões segundo o seu *rank*. Na Figura 1 são apresentadas algumas aplicações para os diferentes tipos de carvão.

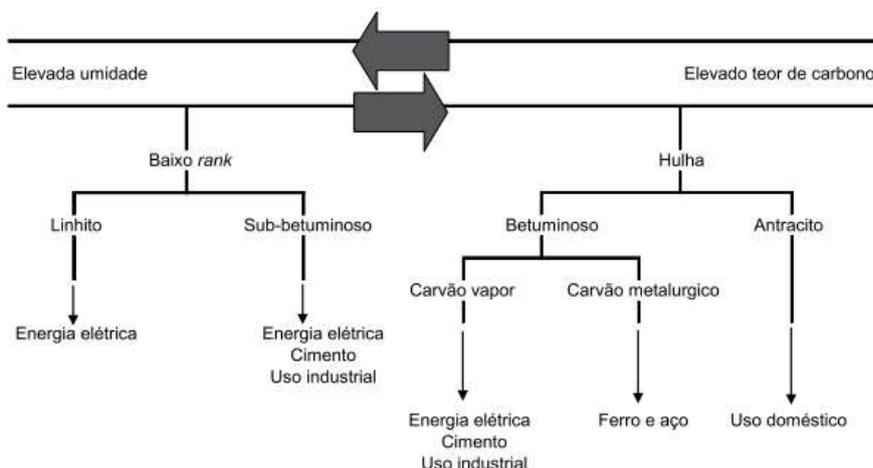


Figura 1. Tipos de carvões minerais e principais usos.

Fonte: World Coal Institute. Elaborado por: DNPM.

Tabela 1. Rank do carvão e valores de parâmetros usados na estimativa.

Rank	Teor de Cinzas (%)	Teor Matéria Volátil (%)	Poder Calorífico (J/kg)	Reflectância da Vitrinita
Turfa	<50	>50		
Linhito	60	50	$6,3 \times 10^9 - 1,1 \times 10^{10}$	0,3
Carvão Sub-Betuminoso	75	45	$1,0 \times 10^{10} - 1,2 \times 10^{10}$	0,5
Carvão Betuminoso	85	35	$1,3 \times 10^{10} - 1,5 \times 10^{10}$	1,0
Semi-Antracito	87	25	$1,2 \times 10^{10} - 1,4 \times 10^{10}$	1,5
Antracito	90	10	$1,2 \times 10^{10} - 1,4 \times 10^{10}$	2,5
Grafito	>95	<5		

Fonte: Tucker, 1991.

Lorenz e Grudzinsk (2003) apontam os três pontos chave para a definição da qualidade do carvão: (a) o poder calorífico do carvão (PC); (b) o teor de cinzas em sua composição (Cz); e (c) o teor de enxofre na sua composição (S). O poder calorífico do carvão é a energia armazenada que, ao sofrer um processo de combustão, é liberada para o ambiente, onde J/kg (energia/massa) é a sua unidade de medida, sendo que em negociações internacionais este valor varia de 24 a 28 MJ/kg ( $2,4 \times 10^7$  a  $2,8 \times 10^7$  J/kg). O teor de cinzas é formado pelas parcelas incombustas resultantes de todo processo de combustão. No mercado internacional de carvão, o teor de cinzas é relativamente baixo, variando de 8 a 16%. O teor de enxofre é um parâmetro importante no que diz respeito ao meio ambiente, uma vez que tem influência na emissão de óxidos de enxofre (Aguar e Balestieri, 2007).

Os constituintes orgânicos dos carvões são denominados de macerais, que são essencialmente componentes de origem vegetal. Com a utilização de microscópio de reflexão

em amostras com superfícies polidas, é possível realizar a diferenciação dos macerais em três diferentes grupos levando em consideração propriedades como reflectância, cor, relevo e dureza. Durante o processo de carbonização (aumento do teor em carbono e diminuição dos componentes voláteis, principalmente, oxigênio e hidrogênio), mudanças regulares podem ser observadas nas propriedades de reflectância dos macerais do grupo da vitrinita, sendo este o parâmetro óptico mais importante usado para determinar o *rank* dos carvões e o grau de maturação orgânica das rochas nas sucessões sedimentares (Fernandes, 2004).

Na Tabela 2 estão representados os diferentes grupos de macerais do carvão.

Tabela 2. Grupos de macerais do carvão.

<b>Grupo</b>	<b>Macerais</b>	<b>Origem</b>
Vitrinita	colinita telinita	madeira
Inertita	fusinita	tecidos lenhosos
	semifusinita	
	esclerotinita	fungos
Liptinita	micrinita	resina polimerizada
	esporinita	esporos
	cutinita	cutículas
	resinita	resina
	alginita	algas

Fonte: Tucker, 1991.

A fração inorgânica do carvão pode ser formada por uma grande variedade de rochas e minerais. Ocorre variação da constituição do carvão de uma região para a outra e também entre as diferentes camadas de deposição, porém certos minerais se fazem presentes na grande maioria das ocorrências do carvão, sendo eles aluminossilicatos (argilo-minerais), silicatos, carbonatos, sulfetos e sulfatos (Machado, 2013). Segundo Torrey (1978), os principais minerais observados na fração inorgânica do carvão estão listados na Tabela 3.

Tabela 3. Minerais presentes na fração orgânica do carvão.

<b>Classe</b>	<b>Minerais</b>
Aluminossilicatos	Ilita, caolinita, montmorilonita
Silicatos	Quartzo
Sulfetos	Pirita, marcassita
Sulfatos	Gipso
Carbonatos	Calcita, dolomita, soderita

Fonte: Torrey, 1978.

As frações orgânicas e inorgânicas do carvão podem ainda possuir alguns elementos traços associados em sua estrutura. Autores como Breger (1958), Nicholls (1968), Torrey (1978), Pires e Teixeira (1992), Buggiey et al. (1995) e Broadhurst (2007) tem estudado essas ocorrências.

Segundo Breger (1958), os elementos traços se concentraram no carvão em dois estágios, sendo que no primeiro estágio houve a acumulação de elementos resultantes da atividade de alguns organismos durante seu período de vida (C, N, P, S, Fe, Ca, Ba, Mn, I, Cu, V e Zn) e no segundo estágio houve a acumulação após a morte destes organismos por:

- via mecânica, através de minerais e fragmentos de rochas depositados durante a formação do carvão (Si, Al, Ca, Mg, Fe, Mn, Na, K, entre outros);
- via química, a partir da precipitação de sulfetos (Fe, Cu, Pb, Zn), ou por produtos de oxidação (Ag);
- adsorção física (V, Ag, Th, U).

Segundo Buggiey et al. (1995), apesar da baixa concentração dos elementos traços nos carvões, a queima de grande quantidade de carvão nas termoelétricas pode gerar um impacto significativo no meio ambiente. Possuir informações sobre a distribuição e concentração dos elementos traços nos carvões é fundamental para prever o comportamento destes elementos ao serem lançados para a atmosfera durante o processo de queima. A degradação de sulfetos pode mobilizar outros elementos como o arsênio, ferro, chumbo e zinco.

## **2.2. Dados de consumo e produção**

A extração de carvão é uma atividade mundialmente empregada, uma vez que as necessidades básicas da população são atendidas por estes recursos, sendo a intensidade do seu aproveitamento um indicador social. Cerca de 90% das reservas mundiais de carvão mineral encontram-se no hemisfério norte. Na Tabela 4 são listados os 15 países com as maiores reservas provadas de carvão.

Tabela 4. Maiores reservas mundiais de carvão segundo a AIE - Agência Internacional de Energia.

País	Reserva provada (bilhões de toneladas)	Fatia das reservas globais (%)
Estados Unidos	237	27,6
Rússia	157	18,2
China	114	13,3
Austrália	76,4	8,9
Índia	60,6	7,0
Alemanha	40,7	4,7
Cazaquistão	33,6	3,9
Ucrânia	33,80	3,9
África do Sul	30,1	3,5
Colômbia	6,7	0,8
Canadá	6,5	0,8
Polônia	5,7	0,7
Indonésia	5,5	0,6
Brasil	4,5	0,5
Bulgária	2,3	0,3

Fonte: Revista EXAME, 13/09/2016.

Desde a sua extração até seu aproveitamento final, o carvão mineral passa por inúmeras etapas, sendo elas:

- *Lavra*: extração da rocha contendo a matéria combustível, sendo que o valor do material extraído irá variar de acordo com o poder calorífico. A escolha do método de lavra depende em grande parte da localização e forma do depósito mineral, devendo ser escolhido o método mais seguro e ao mesmo tempo mais econômico.
- *Estoque*: importante para homogeneização e regularidade do material que será processado e, para isso, deve ser posicionado próximo a centrais de beneficiamento e transformação;
- *Beneficiamento*: tratamento do minério, visando a adequação química e física do material para o mercado consumidor;
- *Transporte*: o transporte do material poderá ser realizado em caminhões e transportadoras. Para longas distâncias poderá ser usado transporte rodoviário, ferroviário ou hidroviário;
- *Transformação*: o carvão poderá ser processado para transformá-lo, por exemplo, em coque;

- *Distribuidores*: grupo envolvido no processo de disponibilizar o carvão mineral bruto, beneficiado ou transformado;
- *Mercado*: permite a troca, na qual o carvão mineral passa a valer em unidades monetárias;
- *Como insumo*, poderá compor as seguintes cadeias de valor:
  - Geração de eletricidade;
  - Metalurgia e siderurgia;

Na Mina de Moatize, em Moçambique, há previsão de exploração do carvão, pelo método a céu aberto, até o ano de 2049, com uma produção média anual estimada em 18 a 22 milhões de toneladas (carvão metalúrgico e térmico). O material será escoado para mercados como Brasil, Ásia, Oriente Médio e Europa (Jornal Notícias, 2008).

### **2.3. Problemas ambientais causados pela mineração**

A mineração provoca um conjunto de efeitos não desejados, tais como: alterações ambientais, conflitos de uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos e geração de áreas degradadas. Muitas vezes ocorrem conflitos com a comunidade, que normalmente tem origem na implantação do empreendimento (IBRAM, 2013).

A paisagem e o ecossistema sofrem muitas alterações com as atividades de mineração, como a movimentação de grande quantidade de rochas, construção de barragens de rejeitos e excesso de poeira na atmosfera. Em áreas degradadas por mineração, onde os horizontes superficiais foram removidos (justamente a porção do solo que contém a maior concentração de nutrientes, matéria orgânica e microrganismos), notam-se grandes limitações no substrato, principalmente devido a compactação dos solos e ao baixo teor de nutrientes. Em alguns casos específicos existem também problemas relativos com a drenagem ácida de mina e, conseqüentemente, a contaminação por metais pesados. Nos ecossistemas degradados pela mineração há alteração profunda na geomorfologia e na estruturação do solo, dificultando as espécies do ecossistema original de colonizarem naturalmente a área naquelas condições (Kopezinski, 2000; Santos, 2003).

O impacto ambiental, positivo e/ou negativo, causado pela atividade extrativa dependerá exclusivamente da ação antrópica. A atividade humana irá determinar o tipo, magnitude e as

consequências da alteração ambiental no meio a ser minerado. Mesmo as ações mais simples no processo de mineração causam alterações no meio biótico (Kopezinski, 2000).

A extração do carvão movimentando grandes quantidades de materiais, proporcionando a degradação de áreas e a possível acidificação do meio. Sem os devidos cuidados, o resultado poderá acarretar no assoreamento e contaminação dos recursos hídricos. Por isso, é de extrema importância prever, antes de explorar a jazida, como ela será recuperada após a exaustão da mina. Além dos efeitos adversos na qualidade do solo, a extração do carvão pode afetar o ciclo hidrológico no que concerne à quantidade e à disponibilidade de água (Monteiro, 2004).

A drenagem ácida de mina (DAM) ocorre através da oxidação de rochas contendo minerais sulfetados. Ela resulta de reações químicas e biológicas de sulfetos metálicos na presença de ar, água e bactérias acidofílicas, ocasionando a geração de íons dissolvidos em meio aquoso. Os poluentes da DAM afetam a qualidade da água baixando o pH, reduzindo a alcalinidade natural, aumentando a dureza total bem como a concentração de sulfatos, além de crescer em quantidades indesejáveis de metais (Kontopoulos, 1998).

Ao estudar regiões mineradas, deve ser levado em consideração, além da área alterada pela mineração de carvão propriamente dita e o seu entorno, os componentes sócio-políticos como forma de melhor entender a realidade local, propondo mecanismos de restauração (Jica, 1998).

Não existem áreas degradadas irrecuperáveis e sim áreas com maior ou menor custo de recuperação, pois as técnicas variam de acordo com os níveis de degradação encontrados, com as características intrínsecas da área, com a velocidade que se quer dar à prática e com o objetivo da recuperação (Jesus e Rolim, 2003).

A melhoria na capacidade de identificar riscos e impactos, para definir as adequadas medidas de prevenção e mitigação e treinar a força de trabalho em todos os níveis, são instrumentos cruciais para a gestão ambiental (IBRAM, 2013).

#### **2.4. Bacia carbonífera de Moatize**

Em Moçambique diferenciam-se seis grandes bacias sedimentares, definidas segundo sua relação temporal com a fragmentação do Supercontinente Gondwana (Fernandes et al., 2014a; 2014b):

- Bacia do Médio Zambeze;
- Bacia do Baixo Zambeze;
- Bacia de Maniamba;
- Bacia do Rovuma;
- Bacia de Moçambique;
- Bacia do Lago Niassa.

Na Bacia de Moçambique encontra-se a Formação de Moatize, antes designada de Série Produtiva de Moatize (Carvalho, 1977), estando representada no distrito de Moatize, onde está definida a seção tipo desta formação, com uma espessura de cerca de 340 m de sedimentos argilosos e orgânicos depositados em meio lacustre, com episódios de invasão de sedimentos deltaicos (Afonso et al., 1998; Vasconcelos & Achimo, 2010). Os leitos de carvão desta formação tornaram conhecida a província de Tete (Figura 2), sobretudo a região de Moatize, que possui 489,8 milhões de toneladas estimadas deste recurso energético (Micoa, 2002).



Figura 2. Localização da província de Tete.

Fonte: Selemane, 2011.

Nesta região, pertencente a formação geológica do Supergrupo Karoo, foram descritas seis camadas de carvão principais, intercaladas por sequências litológicas bastante semelhantes, indicando uma ciclicidade dos processos de sedimentação. Estas são designadas localmente como Complexo Carbonoso (ordenada do mais recente para o mais antigo) (Afonso et al., 1998). A Figura 3 mostra o perfil estratigráfico da série produtiva de Moatize.

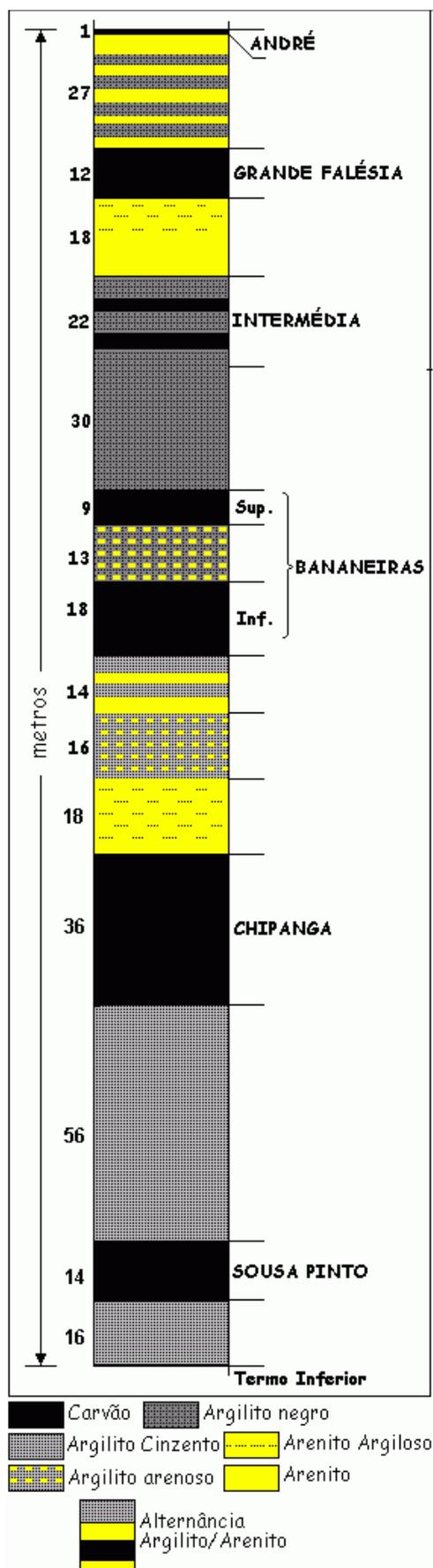


Figura 3. Esboço da série produtiva em Moatize.  
Fonte: Lopo Vasconcelos, 2005.

- **Complexo André:** corresponde ao topo do Complexo Carbonífero, com apenas uma camada de carvão com 1 m de espessura;

- **Complexo Grande Falésia:** igualmente caracterizado por grandes variações, apresentando uma espessura média de 12 m;

- **Complexo Intermédio:** apresenta variações laterais significantes, sendo constituído por pelitos negros com apenas dois leitos finos de carvão, tendo uma espessura média de 22 m;

- **Complexo Bananeiras:** complexo formado por dois subcomplexos que estão separados por pelitos negros, que atingem cerca de 27 m;

- **Complexo Chipanga:** nível com maior espessura, cerca de 36 m, tendo como muro pelitos cinzentos e como teto grés xistoso;

- **Complexo Sousa Pinto:** formado por carvões intercalados nos pelitos (argilitos e siltitos), apresentando uma espessura média de 14 m.

O clima que prevalece na região onde está situada a Mina de Moatize é conhecido como estepe local. Ocorre pouca pluviosidade, apresentando uma média anual de 658 mm, sendo que a diferença entre a precipitação do mês mais seco e do mês mais chuvoso é de 168 mm. A temperatura média anual é de 26,5 °C, com variação de 8,3°C ao longo do ano.

No período de abril a outubro é quando ocorre o menor índice de precipitação, sendo agosto o mês mais seco, com média de 2 mm.

Tabela 5. Tabela climática da região da Mina Moatize.

Inf. Climat.	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Temperatura média (°C)	28,2	28,5	27,7	26,9	24,4	21,8	21,7	23,9	26,7	29,7	30	28,9
Temperatura mínima (°C)	23,1	23,1	22,3	21	17,8	15,1	15,1	16,9	19,9	22,8	23,6	23,3
Temperatura máxima (°C)	33,3	33,9	33,1	32,8	31,1	28,6	28,3	30,9	33,5	36,7	36,4	34,5
Chuva (mm)	170	165	88	18	4	5	3	2	2	10	54	137

Fonte: <https://pt.climate-data.org/location/4858/>

## 2.5. Drenagem ácida de mina

### 2.5.1. Reações de geração

De acordo com Kontopoulos (1998), a drenagem ácida resulta de uma série complexa de reações químicas envolvendo mecanismos diretos, indiretos e ação microbiana. Algumas reações de oxidação resultam na geração de ácido, enquanto outras resultam na dissolução e mobilização de metais pesados. A pirita ( $FeS_2$ ) é o principal mineral responsável pela geração de acidez. É estável e insolúvel, desde que não entre em contato com o ar e a água.

O processo de oxidação da pirita inicia-se quando a pirita é exposta ao oxigênio e a água:



Se a acidificação provocada pela Equação 1 for mantida, ocorrerá a oxidação do  $Fe^{2+}$  para  $Fe^{3+}$ , consumindo parte da acidez pelos íons  $Fe^{2+}$ :



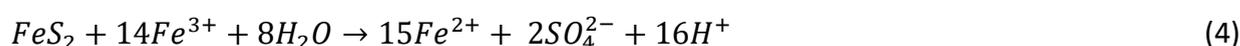
Essa reação ocorre em valores de pH superiores a 4,5. Em ambiente com valores de pH inferiores a 3,5, a oxidação do íon ferroso  $Fe^{2+}$  a férrico  $Fe^{3+}$  passa a ser muito baixa. Contudo,

bactérias quimiolitotróficas acidófilas do gênero *Thiobacillus*, que catalisam a reação (2), podem acelerá-la em até  $10^6$  vezes.

Mantido o pH da solução superior a 3, ocorre a hidrólise do  $Fe^{3+}$  que irá se precipitar na forma de hidróxido e gerará acidez, de acordo com a equação (3).



Outra possibilidade é que o  $Fe^{3+}$  gerado na reação (2) oxide a pirita ( $FeS_2$ ) pela seguinte reação:



Assim, a oxidação da pirita através do  $Fe^{3+}$  irá gerar uma quantidade de  $Fe^{2+}$ , que será oxidado de acordo com a reação (2), entrando em um ciclo crescente, chamado de autocatálise. A oxidação da pirita pela reação de íons  $Fe^{3+}$ , equação (4), pode ocorrer até cem vezes mais rapidamente do que a oxidação via oxigênio, equação (1) (Evangelou e Zhang, 1995). Esse ciclo irá permanecer até que toda pirita acessível seja consumida, tanto pelo oxigênio como pelos íons de  $Fe^{3+}$ .

A etapa determinante para todo esse processo é a formação de  $Fe^{3+}$  através da reação (2), por isso a presença de certas bactérias acaba sendo fundamental para a oxidação da pirita, visto que aceleram essa reação. Ao final deste processo, obtém-se uma drenagem extremamente ácida, capaz de solubilizar metais que estão presentes na rocha, como, por exemplo, Al, Mn, Zn, Pb, causando mais impactos ao meio ambiente (Saxaki et al, 1998; Evangelou & Zhang, 1995).

A previsão da ocorrência da drenagem ácida é uma informação importante na indústria de mineração. Segundo EPA (1994), os objetivos de se fazer uma previsão da drenagem ácida são dois: determinar se certo volume de resíduos de minas gerará ácido; e avaliar as características da drenagem. Os métodos que preveem o potencial de geração ácida são classificados como estáticos e cinéticos.

A ocorrência da DAM em módulos de rejeitos se dá devido à exposição do material ao meio ambiente, permitindo a entrada de ar e água que ocasionam a oxidação dos sulfetos (sendo a pirita considerada a maior fonte de geração deste efluente ácido). A complexidade da DAM se dá pelas características variáveis dos materiais que compõem os rejeitos, juntamente com processos de difusão do oxigênio e a percolação da água (Kontopoulos, 1998). Diversos processos físicos e químicos influenciam no processo de geração da DAM, entre eles: natureza e reatividade dos

sulfetos e dos minerais neutralizantes presentes nos depósitos, granulometria, compactação, condutividade hidráulica e condição climática (Erguler e Kalyoncu, 2015).

Através de uma série de análises de diversos indicadores é possível fazer a caracterização das águas e efluentes da região que está sendo minerada. Com esta finalidade, podem ser medidos parâmetros como condutividade elétrica, turbidez, pH, acidez, sólidos totais, potencial de oxidação-redução, oxigênio dissolvido, demanda química de oxigênio, sulfatos e metais dissolvidos, entre outros, que refletem os estágios das reações envolvendo minerais sulfetados em contato com o ar e a água superficial (Alexandre e Krebs, 1995; DNPM, 1999).

### 2.5.2. Métodos de controle da DAM

Os métodos de controle da DAM podem ser classificados em métodos preventivos, métodos de controle de migração e métodos de remediação (Kontopoulos, 1998). Os métodos preventivos são a remoção/isolamento dos sulfetos, exclusão do oxigênio por cobertura de água, exclusão do oxigênio por cobertura seca, aditivos alcalinos e emprego de bactericidas. Esses procedimentos consistem em evitar que ocorra a oxidação do sulfeto metálico e a geração das águas ácidas. As formas de mitigação dos efeitos da DAM estão subdivididas em métodos de contenção e remediação. Os métodos de contenção são a prevenção do fluxo de água, as paredes reativas porosas e a disposição em estruturas de contenção. Os métodos de remediação estão subdivididos em sistemas ativos e passivos. Os métodos ativos são a neutralização/precipitação, a adsorção/troca iônica, a osmose reversa e a eletrodialise. Já os sistemas passivos são os filtros de calcário, os drenos anóxicos de calcário, as barreiras permeáveis reativas, os banhados construídos e os reatores de fluxo vertical. A Tabela 6 mostra um resumo dos métodos de controle da DAM.

Tabela 6. Métodos de controle da drenagem ácida de minas segundo Kontopoulos (1998).

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

As Figuras 4, 5 e 6 ilustram algumas situações mundiais de ocorrência de DAM.



Figura 4. Drenagem ácida em mina de carvão, Santa Catarina - Brasil.



Figura 5. Drenagem ácida em mina de carvão - Andaluzia, Espanha.



Figura 6. Drenagem ácida em mina de carvão, Virginia - Estados Unidos.

## 2.6. Avaliação do potencial de geração de acidez

Através de ensaios estáticos e cinéticos é possível avaliar o potencial de geração da DAM de um determinado material.

### 2.6.1. Ensaios estáticos

Os ensaios estáticos determinam o potencial de geração de acidez (AP) e o potencial de neutralização de acidez (NP) em uma amostra. O balanço entre duas grandezas (AP e NP) permite prever a geração de drenagem ácida.

Estes ensaios podem ser conduzidos em curto espaço de tempo, requerem pouca quantidade de amostra e são relativamente baratos. Porém não levam em conta aspectos cinéticos. Na Tabela 7 são listados os principais métodos estáticos: método de contabilização de ácidos e bases (*Acid Basic Accounting Method - ABA*), método de contabilização de ácidos e bases modificado (*Modified Acid Basic Method – ABA Modificado*), teste inicial BC (*British Columbia*), potencial de produção alcalina: enxofre e balanço da produção ácida (EPA, 1994).

Tabela 7. Métodos de ensaios estáticos.

ABA <sup>1</sup>	ABA Modificada <sup>2</sup>	Teste Inicial BC <sup>3</sup>	Potencial de produção <sup>4</sup> alcalina: S	Balanço da produção <sup>2</sup> ácida
<b>DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ÁCIDA</b>				
AP=31,25 x S <sub>total</sub>	AP=31,25 x S <sub>pirítico</sub>	AP=31,25 x S <sub>total</sub>	S total usado como indicador.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> para oxidar diretamente os sulfetos presentes na amostra.
<b>DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE NEUTRALIZAÇÃO</b>				
Amostra com granulometria 0,24mm.	Amostra com granulometria 0,24mm.	Amostra com granulometria 0,038mm.	Amostra com granulometria 0,023mm.	Amostra com tamanho não definido.
<b>VANTAGENS</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Método simples.</li> <li>Pouco tempo para realização das análises.</li> <li>Não é necessário equipamento especial.</li> <li>Os resultados são de fácil interpretação.</li> <li>Muitas amostras podem ser testadas.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Método simples.</li> <li>Pouco tempo para realização das análises.</li> <li>Não necessita equipamento especial.</li> </ul>	
<b>DESvantagens</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Não leva em conta aspectos cinéticos.</li> <li>Supõe liberação paralela ácida e alcalina.</li> <li>Se o AP e o NP estão próximos a interpretação se torna mais difícil.</li> <li>As diferenças no tamanho das partículas não são refletidas.</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Interpretação moderada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reprodutibilidade limitada.</li> <li>Grau de oxidação dos sulfetos incerta.</li> </ul>
Sobek et al. (1998) <sup>1</sup> ; Coastech (1989) <sup>2</sup> ; Duncan; Brymesteyn <sup>3</sup> ; Caruccio et al. (1981) <sup>4</sup> . Fonte Lapakko, 1993 apud EPA, 1994.				

O método ABA foi desenvolvido em 1974 para a avaliação de rejeitos de minas de carvão. Esse teste tem por objetivo determinar o balanço entre a produção e o consumo de acidez pelos constituintes minerais da amostra analisada. O método envolve o cálculo do potencial de geração de acidez a partir da medida da concentração de enxofre total da amostra. O potencial de neutralização é determinado por uma lixiviação a quente, a partir da quantidade de HCl necessária para consumir os minerais alcalinos a 90°C. A partir da determinação destes dois fatores é possível calcular o potencial de neutralização líquido (NNP) e a razão do potencial de neutralização (NPR).

Entretanto, foi observado que o método ABA tradicional superestimava a formação de DAM, tendo sido modificado por Sobek et al. em 1978. Assim, o método ABA modificado é uma variante, empregando o valor de enxofre pirítico para o cálculo de AP. Para o potencial de neutralização a digestão é feita com HCl, por um período de 24 horas, à temperatura ambiente, e após titulado com NaOH até pH 8,3.

De modo geral, todos os outros métodos são variantes destes procedimentos e sua descrição pode ser encontrada em EPA (1994). As taxas de reação da pirita e dos carbonatos não são determinadas por nenhum destes métodos.

### **2.6.2. Ensaio cinéticos**

Os ensaios cinéticos são empregados em resíduos provenientes da mineração de carvão e de sulfetos metálicos para prever e caracterizar os efluentes gerados em termos de acidez e alcalinidade do efluente e concentrações de componentes orgânicos e inorgânicos.

Estes ensaios diferem dos estáticos, pois simulam as reações naturais que ocorrem no local de estudo, utilizam maiores volumes de amostras e requerem mais tempo para realização. Os ensaios cinéticos servem como indicativo da formação de DAM, pois mostram a taxa de oxidação de sulfetos e a formação de acidez.

Na tabela 8 são apresentados os principais ensaios cinéticos, de acordo com EPA (1994): células úmidas, extração em Soxhlet, testes em coluna, confirmação BC, reator em grupo e testes de campo.

Tabela 8. Principais ensaios cinéticos.

<b>CÉLULAS ÚMIDAS<sup>1</sup></b>	<b>EXTRAÇÃO EM SOXHLET<sup>2,3</sup></b>	<b>TESTES DE COLUNA<sup>4</sup></b>
Partícula de granulometria 2,38mm.	Tamanho da partícula não apresentada.	Tamanho da partícula variável.
200 g de amostra exposta a ciclos semanais: 3 dias de ar seco, 3 dias de ar úmido e 1 dia de lixiviação com 200 mL de água.	T=70°C ou T=25°C. Água passa através da amostra, é destilada e passada novamente (reciclo da água).	A amostra é lixiviada com volumes variados de água ou DAM, podendo haver o reciclo da solução.
<b>VANTAGENS</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exemplifica AP e NP bem;</li> <li>• Aproxima as condições do campo e a taxa de acidez por unidade de amostra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simples;</li> <li>• Resultado em curto tempo;</li> <li>• Avaliação da interação entre AP e NP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exemplifica AP e NP, mostra o efeito de diferentes tipos de amostras;</li> <li>• Considera a variação temporal;</li> <li>• Pode ser testada com diferentes granulagens.</li> </ul>
<b>DESvantagens</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso moderado;</li> <li>• Resultados levam um longo tempo e utiliza alguns equipamentos especiais;</li> <li>• Grande número de dados gerados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso moderado, e precisa de equipamento especial.</li> <li>• Interpretação moderada.</li> <li>• Relação com os processos naturais não claros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpretação difícil.</li> <li>• Não é prático para grandes números de amostras pois geram muitos dados.</li> </ul>
<b>TESTE DE CONFIRMAÇÃO DE BC<sup>5</sup></b>	<b>REATOR DE GRUPO<sup>6</sup></b>	<b>TESTE DE CAMPO<sup>7</sup></b>
Partícula de granulometria 100mesh.	Partícula de granulometria 200 mesh.	Partículas como encontradas em campo.
Adiciona-se solução contendo Bactérias ativas até pH 2,5; T=35°C. Se o pH aumentar, a amostra não é produtora de acidez.	Amostra/água é agitada 200 g/ 500 mL.	800 a 1300 toneladas de pilhas de testes construídas em fluxo linear. Dados da qualidade da água coletados.
<b>VANTAGENS</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simples de usar, pequeno custo.</li> <li>• Avalia o AP por lixiviação biológica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capaz de examinar muitas amostras simultaneamente.</li> <li>• Equipamento simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso do rejeito de mina atual, sujeito a condições ambientais.</li> </ul>
<b>DESvantagens</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso moderado;</li> <li>• Necessita de longo tempo de funcionamento e de equipamentos especiais;</li> <li>• Difícil interpretação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sujeito a grandes erros amostrais e falta de precisão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construção inicial cara e demorada.</li> </ul>
<p><i>Sobek et al. (1978)<sup>1</sup>; Singleton; Lavkulich (1978)<sup>2</sup>; Sullivan; Sobeck (1982)<sup>3</sup>; Bruynesteyn; Hackl (1982); Hood; Oertel (1984)<sup>4</sup>; Duncan; Walden (1975)<sup>5</sup>; Halbert et al. (1983)<sup>6</sup>; Edger; Lapakko (1985)<sup>7</sup>.</i></p> <p>Fonte: Lapakko, 1993 apud EPA, 1994.</p>		

Os ensaios cinéticos podem ser utilizados para avaliação de diferentes variáveis no processo de geração de acidez. Estes ensaios são utilizados para confirmar os ensaios estáticos e estimar a quantidade e o tempo em que ocorrerá a acidez. Os dados são examinados por mudanças na qualidade da água através do tempo. Geralmente os ensaios cinéticos avaliam mudanças no pH, sulfatos, acidez e metais presentes. Os dados gerados são utilizados para classificação de estéreis, rejeitos ou outros materiais de acordo com seu potencial de geração de acidez.

O ensaio cinético mais utilizado é o das Células Úmidas. Estes ensaios são realizados em recipientes fechados, contendo 1000 gramas de amostra com granulometria inferior a 6,3 mm, com aberturas para entrada e saída de ar, sendo ciclicamente injetado ar seco, ar úmido e após é realizada a lixiviação com água. De acordo com a norma D 5744 (ASTM, 1996), recomendam-se no mínimo 20 semanas, com ciclos de uma semana. Cada ciclo é composto por três dias de ar seco, três dias de ar úmido e, no sétimo dia, lixiviação do material com 500 ou 1000 mL de água destilada.

Nos Testes de Coluna, os ciclos secos e úmidos são criados pela adição de água e pelo tempo em que a coluna é deixada secar, o que pode durar poucos dias ou mais de uma semana (EPA, 1994; Lapakko e White, 2000).

Outro método de previsão da drenagem ácida de mina são os modelos de simulação em computador, pois oferecem ferramentas importantes para se calcular a extensão e o potencial de produção ácida em uma pilha de estéril, empregando um grande número de variáveis, tais como taxa de  $O_2$ , temperatura e pH. As previsões realizadas por computador são testadas primeiramente com dados obtidos em laboratório, com colunas de lixiviação, por exemplo, para então serem realizados simulações com as condições de campo (Evangelou, 1995).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Rejeitos de carvão

As amostras de carvão utilizadas foram cedidas pela empresa Vale, que realiza a extração e beneficiamento da camada Chipanga, na Mina de Moatize. A coleta das amostras foi realizada pela própria empresa, no período de janeiro de 2014 a março de 2015, compreendendo vários meses de produção.

A camada Chipanga possui aproximadamente 30 metros de espessura e foi dividida em quatro subcamadas no período de amostragem, conforme as seções de trabalho explicitadas na Figura 7. Segundo estudos realizados na mina, ocorre um enriquecimento do carvão do topo para a base, de forma que as camadas inferiores geram menos rejeitos do que as camadas superiores. Este trabalho utilizou os rejeitos grossos ( $50 \text{ mm} > d > 1 \text{ mm}$ ) e finos ( $d < 1 \text{ mm}$ ) das quatro subcamadas exploradas, que foram estudados separadamente.

Seções Geológicas				Seção de Trabalho	
GS1	GS2		GS3		Mineração e Alimentação
Camada Chipanga ~ 30m	Chipanga Superior	13,5	UCT	4,08	UCT ▲
			UCB	9,42	UCB ▲
	Chipanga Média	6,89	MCU	1,86	MLCU ▲
			MC27	1,23	
			MCM	2,81	
			MC35	0,99	
	Chipanga Inferior	8,41	LCUT	2,03	LCUB ▲
			LCUB	3,38	
			LC456	3	LC456 ▲

Figura 7. Subdivisões da camada Chipanga.

Ainda, em Moçambique, as amostras foram embaladas em tambores metálicos devidamente identificados e foram analisadas com respeito à combustibilidade para fins de transporte marítimo. Uma vez verificada sua seguridade, as amostras foram embarcadas e enviadas à UFRGS, em Porto Alegre/RS, onde chegaram em maio do ano de 2016. Na UFRGS, as amostras receberam nova identificação e foram mantidas junto ao prédio do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental – LTM no Campus do Vale (Figura 8).



Figura 8. Tambores com amostras de carvão armazenadas junto ao prédio do LTM.

Cada tambor foi aberto individualmente e teve seu conteúdo espalhado em uma lona. Nos casos em que o material estava muito úmido, foi deixado ao ar livre para secagem por cerca de um dia. O material seco foi então quarteado, utilizando um quarteador Jones, até que fosse obtida uma amostra significativa de cerca de 20 kg. Após todas as amostras terem sido quarteadas, foi iniciada sua preparação para análise. A cominuição ocorreu da seguinte forma:

1. Quarteamento das amostras, sendo que metade do conteúdo foi estocado como contra-prova, e o restante processado em britador de mandíbulas;
2. Após britagem, o material foi novamente quarteado, sendo metade do material embalado em saco plástico e acomodado junto com a contra-prova e o restante processado em britador de rolos;
3. Na última etapa de preparação das amostras, uma porção de 100 g do material processado no britador de rolos foi cominuída em moinho pulverizador, com o objetivo de se obter um material com granulometria inferior a 60 mesh.

A Mina de Moatize é lavrada a céu aberto. O beneficiamento de grossos ( $50 \text{ mm} > d > 1 \text{ mm}$ ) é feito por ciclones de meio denso e os finos ( $d < 1 \text{ mm}$ ), por espirais, elutriação e flotação. Um fluxograma simplificado do processo de beneficiamento é apresentado na Figura 9 e o fluxograma detalhado é apresentado no Anexo B, onde são gerados aproximadamente 1,2 milhões de toneladas de rejeitos mensalmente.

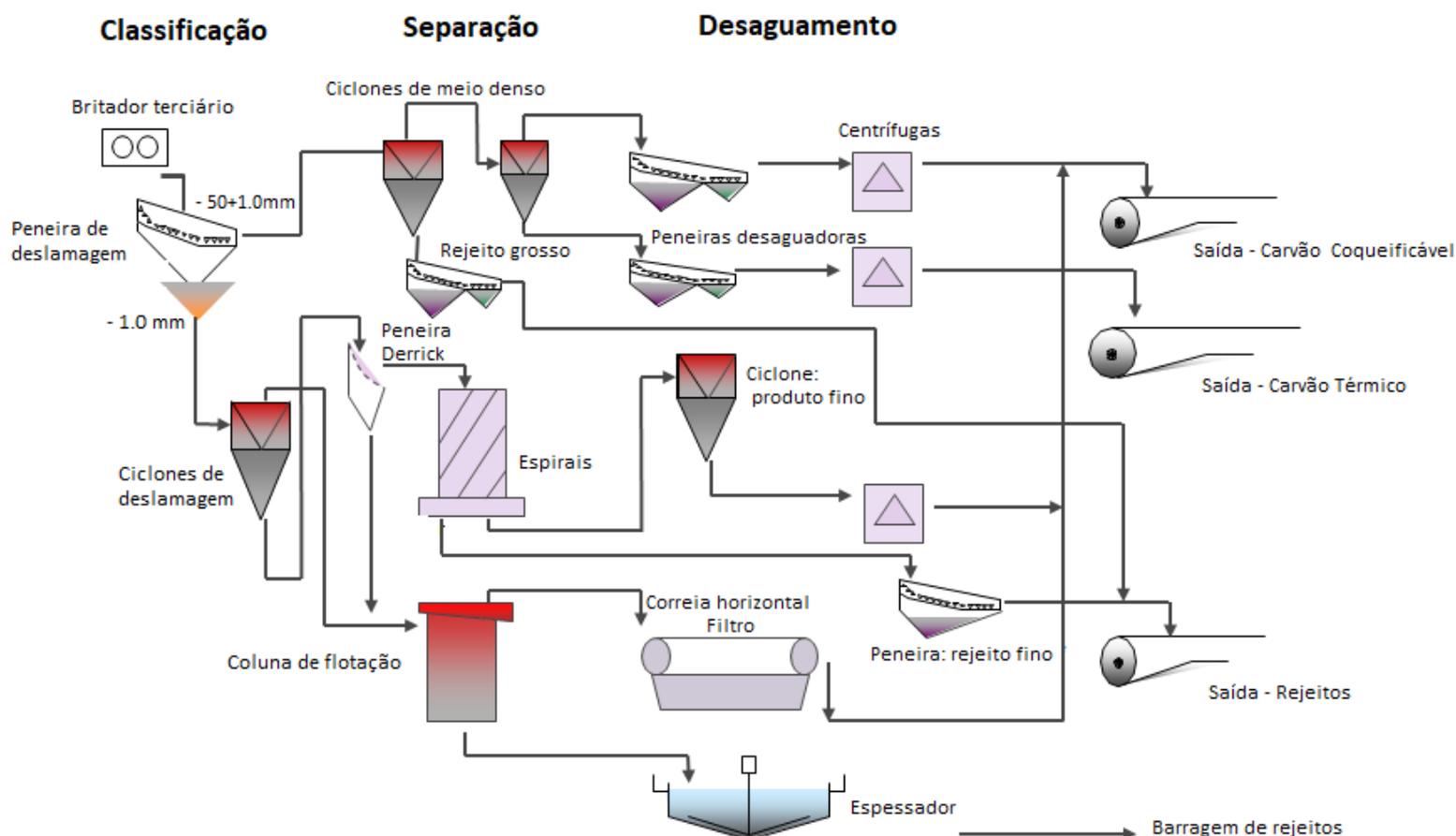


Figura 9. Fluxograma simplificado da planta de beneficiamento.

### 3.1.2. Água e Reagentes

A água utilizada foi a de abastecimento público da cidade de Porto Alegre, após tratamento em um sistema de osmose reversa seguido por desmineralização por troca iônica. Os reagentes empregados no presente trabalho foram de grau analítico e são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Reagentes utilizados.

Reagente	Marca
Hidróxido de sódio	Anidrol
Ácido sulfúrico	Dinâmica
Ácido clorídrico	Anidrol
Ácido nítrico	Anidrol
Carbonato de cálcio	Anidrol
Peróxido de hidrogênio	Dinâmica

### 3.1.3. Equipamentos

Os equipamentos utilizados neste trabalho estão listados na Tabela 10.

Tabela 10. Equipamentos utilizados.

Equipamento	Marca	Modelo
Quarteador	Hebro	-
Analizador de Enxofre	Leco	S-144DR
pH-metro	PHTEK	PHS-3E
Balança analítica	Bioscale	FA2204
Chapa de aquecimento	Jung	CV300
Forno-Mufla	EDG	3000
Estufa	DeLeo	-
Espectômetro de Fluorescência de Raios-X	Panalytical	Minipal 4
Britador de Mandíbula	Denver Lar Crusher	-
Britador de Rolos	-	-
Moinho de recipiente vibratório (pulverizador)	Astecma	-

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Análise de cinzas

O teor de cinzas é a massa residual resultante da combustão dos compostos orgânicos. A partir desta análise é possível obter a quantidade de matéria orgânica (carvão) presente na amostra. Foi realizada conforme procedimento ASTM-D3174 (2012), a partir da queima de 1,0 g de amostra à 800°C, por 1 hora.

### 3.2.2. Matéria volátil

A análise de matéria volátil foi realizada conforme ASTM D3175 (2011a), que determina o percentual de produtos gasosos do carvão que são liberados sob condições controladas de aquecimento. O procedimento consistiu em levar 1,0 g de amostra de carvão em um cadinho de platina com tampa a um forno de mufla pré-aquecido a 950°C durante 7 minutos. Após, deixou-se o cadinho resfriar até atingir a temperatura ambiente e mediu-se a massa do material remanescente.

### 3.2.3. Carbono fixo

A porcentagem de carbono fixo nas amostras foi calculada por diferença, conforme a equação (5).

$$\%CF = 100 - (\%U + \%MV_{bs} + \%CZ) \quad (5)$$

%U: Umidade    %MV<sub>bs</sub>: Matéria Volátil base seca    %CZ: Cinzas

### 3.2.4. Formas de enxofre

O teor de enxofre total foi determinado no equipamento LECO S144-DR. 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:

$$S_{orgânico} = S_{total} - (S_{pirítico} + S_{sulfático}) \quad (6)$$

### 3.2.5. Umidade

Foi realizada conforme o procedimento ASTM D3173 (2011b), pela da secagem de 1,0 grama de amostra a 110°C em estufa. Com este resultado foi possível converter os valores resultantes da análise de cinzas e enxofre para base seca.

### 3.2.6. Análise granulométrica

A análise granulométrica do material foi realizada a seco, utilizando um agitador mecânico de peneiras. As aberturas das peneiras utilizadas foram:

Tabela 11. Abertura das peneiras utilizadas para análise granulométrica.

Aberturas (mm)
50
25
9,5
4
2,83
1
0,5
0,25
0

### 3.2.7. Massa específica

A massa específica aparente dos materiais foi determinada gravimetricamente medindo-se a massa de material ocupada em um recipiente de 2 L. A determinação foi realizada utilizando os rejeitos grossos e finos separadamente e também com mistura de grossos e finos. Para essa mistura, inicialmente foi colocado o rejeito grosso no recipiente de 2 L, sendo o rejeito fino despejado lentamente de forma a preencher os espaços vazios.

A massa específica real dos grossos foi determinada pelo deslocamento de fluido (água) quando o material foi imerso no meio. A massa específica real dos finos foi determinada por picnometria.

O índice de vazios ( $\epsilon$ ) foi medido pelo volume de água ocupado entre os grãos, tanto dos grossos, finos e da mistura grossos:finos.

### 3.2.8. Composição mineralógica

A análise da composição mineralógica foi realizada pela técnica de difração de raios-x (DRX) para verificar as fases cristalinas presentes no rejeito de carvão. Com este método foi possível identificar, de maneira qualitativa, os minerais cristalinos constituintes das amostras. Do ponto de vista da geração de acidez, se houver presença de minerais cáusticos, maior será a tendência de o material neutralizar a acidez gerada.

O aparelho utilizado para a análise foi o Difratorômetro de Raios-X Philips, modelo X'Pert MPD, equipado com monocromador curvado de grafite e ânodo fixo de cobre, operando a 40 kV e 40 mA. As condições de análise foram: intervalo de ângulos analisados de 5° a 75°; passo utilizado de 5°/1s; radiação Cu K $\alpha$  (1,54184 Å), K $\alpha$ 1(1,54056 Å), K $\alpha$ 2 (1,54439 Å) e K $\beta$  (1,39222 Å). As amostras foram analisadas na forma em pó.

### 3.2.9. Potencial de geração de acidez

O potencial de geração de acidez (AP) e o potencial de neutralização de acidez (NP) foram determinados pelo método de contabilização de ácidos e bases. O método utilizado foi o ABA Modificado – “*Acid Basic-Accounting Method*” (ABA) – desenvolvido por Sobek (Sobek et al. 1978) baseado no enxofre pirítico. Os resultados decorrem da comparação do potencial de acidificação (AP) com o potencial de neutralização (NP) pelos componentes minerais de uma amostra. O teste envolveu 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 CaCO<sub>3</sub>/t de amostra.

A determinação do potencial de acidez (AP) foi realizada a partir do teor de enxofre pirítico. Estequiometricamente, um mol de CaCO<sub>3</sub> é requerido por mol de S, logo:

$$AP \text{ (kg CaCO}_3\text{/t amostra)} = (1000/32) \times \% S_{\text{pirítico}} \quad (7)$$

O potencial de neutralização foi medido após conhecido o volume e a normalidade do HCl. A amostra foi submetida a uma solução ácida por 24 horas a temperatura ambiente para que os minerais neutralizantes fossem consumidos. Após, titulou-se a solução ácida com NaOH (de igual normalidade do ácido) até pH 8,3. O potencial de neutralização foi então calculado com base nas equações 8 a 10.

$$C = \frac{mLHCl (PB)}{mLNaOH (PB)} \times \frac{N_{\text{ácido}}}{N_{\text{base}}} \quad (8)$$

$$Eq. \text{ác. consumido} = \frac{(mL \text{ác. ad.}) \times (N \text{ác.}) - (mL \text{base ad.}) \times C}{1000} \quad (9)$$

$$NP = \frac{(Eq. \text{ác. consumido}) \times 50,0 \times 1000}{\text{massa da amostra (g)}} \quad (10)$$

Onde: C = constante; PB = prova em branco; N = normalidade; ad. = adicionado.

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

### 3.2.10. Estudo de lixiviação em células úmidas

O ensaio, conforme descrito na norma ASTM D5744 (1996), consistiu em utilizar uma amostra de 1000 gramas com granulometria inferior a 6,3 mm em recipiente fechado por onde foi injetado e retirado ar e água ciclicamente. O ciclo semanal ocorreu da seguinte forma:

- 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;
- Em seguida, injetou-se ar úmido por mais três dias;
- Completado o ciclo semanal, realizou-se lixiviação com 500 mL de água destilada novamente, e o ciclo foi reiniciado.

Este ciclo se repetiu durante 20 semanas com a coleta do lixiviado para análise de pH, Eh, acidez, alcalinidade, sulfatos e metais. O intuito foi simular as reações naturais e as mudanças na qualidade da água através do tempo.

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. Na Figura 10 é apresentado um modelo do estudo que foi realizado com células úmidas.

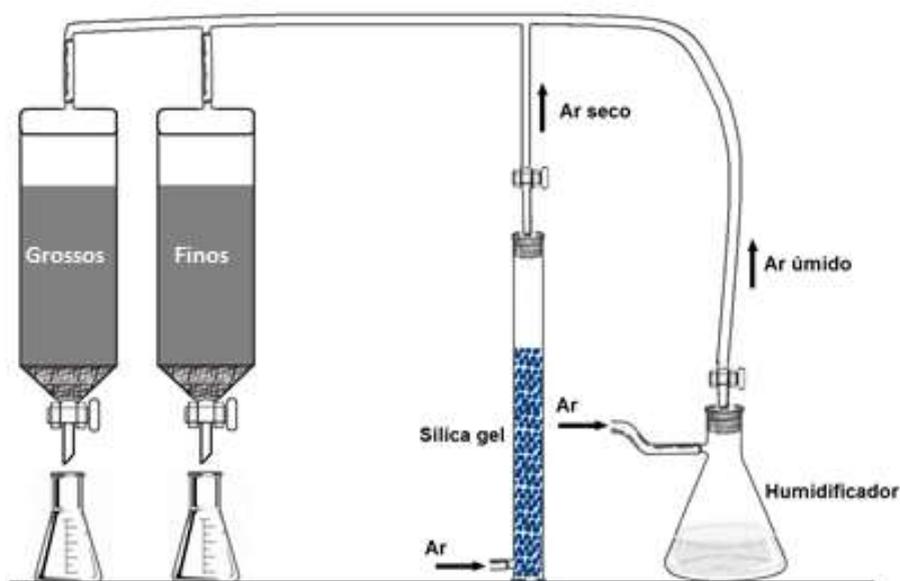


Figura 10. Modelo do método de estudo com células úmidas.

### **3.2.11. Quantificação de metais pelo método EPA 3050**

A quantificação de metais ambientalmente disponíveis presentes nas amostras foi realizada conforme método US EPA 3050 (US EPA, 1996). Foram quantificados os elementos Al, As, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Va, Zn, Ba, Na, Ca, K e Mg.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Dados de produção da mina de Moatize

Os resultados do balanço de massa de produtos e rejeitos (calculado a partir de dados fornecidos pela Vale), durante o período de amostragem estão listados na Tabela 12, juntamente com os teores de cinzas e enxofre total médio. Pode-se observar que a recuperação mássica de produtos foi maior na subcamada LC45/6, principalmente do carvão coqueificável. Essa recuperação se reduziu para as subcamadas superiores. A qualidade dos produtos, em termos do teor de cinzas, foi semelhante.

Tabela 12. Massa, teores de cinzas e de enxofre por camada para carvão ROM, produtos e rejeitos.

	% Massa	% Cinza (bs)	% Enxofre (bs)
<b>UCT</b>			
Carvão ROM	100,0	48,9	1,3
Carvão coque	13,2	10,3	1,2
Carvão térmico	13,7	26,5	1,1
Rejeitos	72,8	57,7	2,3
<b>UCB</b>			
Carvão ROM	100,0	49,2	0,9
Carvão coque	22,3	10,6	1,1
Carvão térmico	14,8	27,5	0,9
Rejeitos	62,9	62,7	1,1
<b>MLCU</b>			
Carvão ROM	100,0	44,4	0,9
Carvão coque	23,5	11,9	0,9
Carvão térmico	13,4	30,4	0,9
Rejeitos	63,1	57,0	1,0
<b>LC45/6</b>			
Carvão ROM	100,0	52,4	0,9
Carvão coque	35,7	10,7	0,9
Carvão térmico	12,6	24,9	0,8
Rejeitos	51,6	60,1	1,1

(bs = base seca)

Em relação ao enxofre total, percebem-se valores da ordem de 1% tanto para o carvão ROM como para produtos e rejeitos. Todavia, esses valores são levemente superiores na camada UCT.

## 4.2. Análise granulométrica dos rejeitos

Nas Figuras 11 a 14 são apresentadas curvas granulométricas geradas após ensaio em peneira vibratória, sendo que a legenda apresenta a nomenclatura presente na lista de tambores que consta como Anexo A neste trabalho. As Tabelas 14 e 15 apresentam a distribuição granulométrica dos rejeitos de carvão para as camadas UCT, UCB, MLCU e LC45/6.

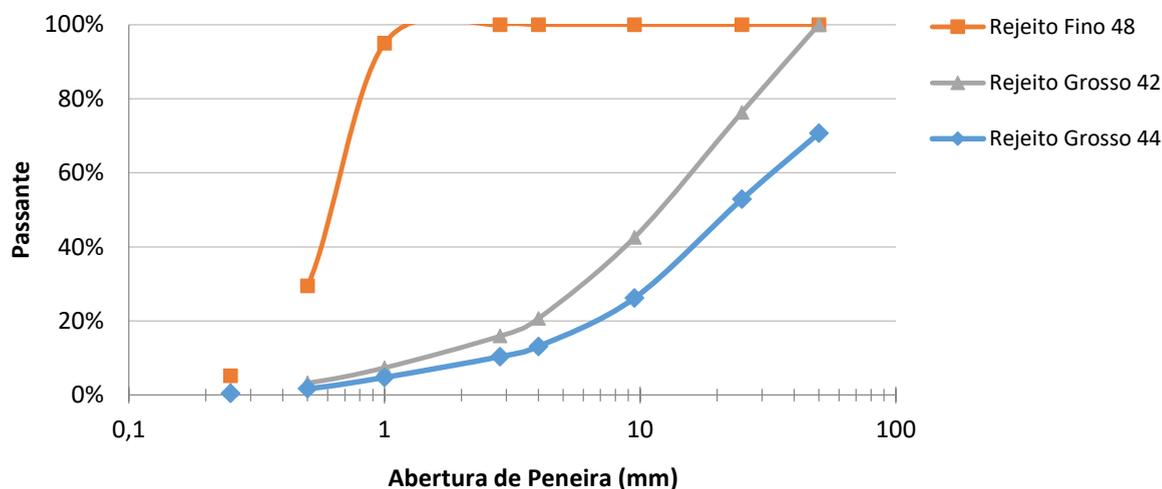


Figura 11. Curvas granulométricas dos rejeitos da camada UCT.

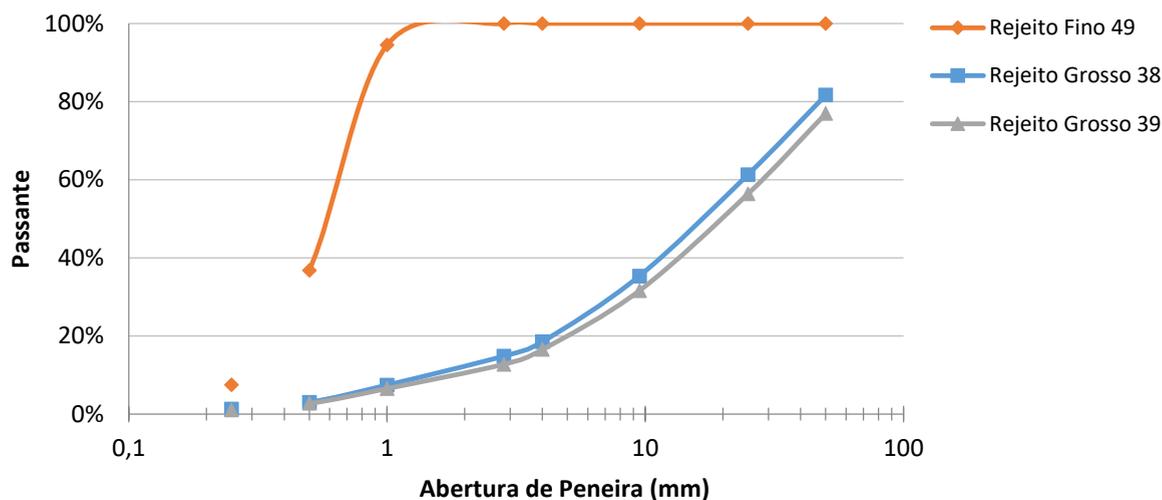


Figura 12. Curvas granulométricas dos rejeitos da camada UCB.

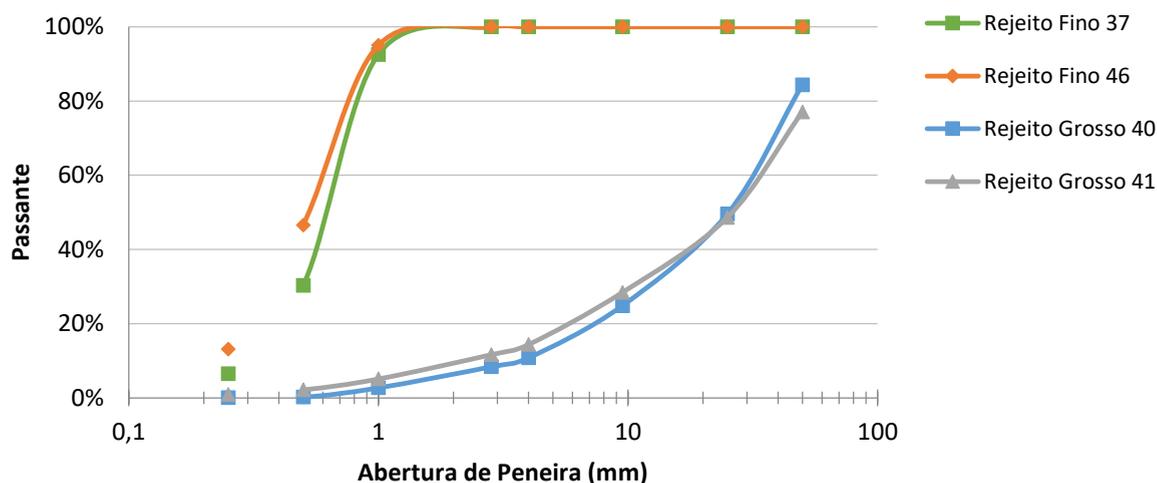


Figura 13. Curvas granulométricas dos rejeitos da camada MLCU.

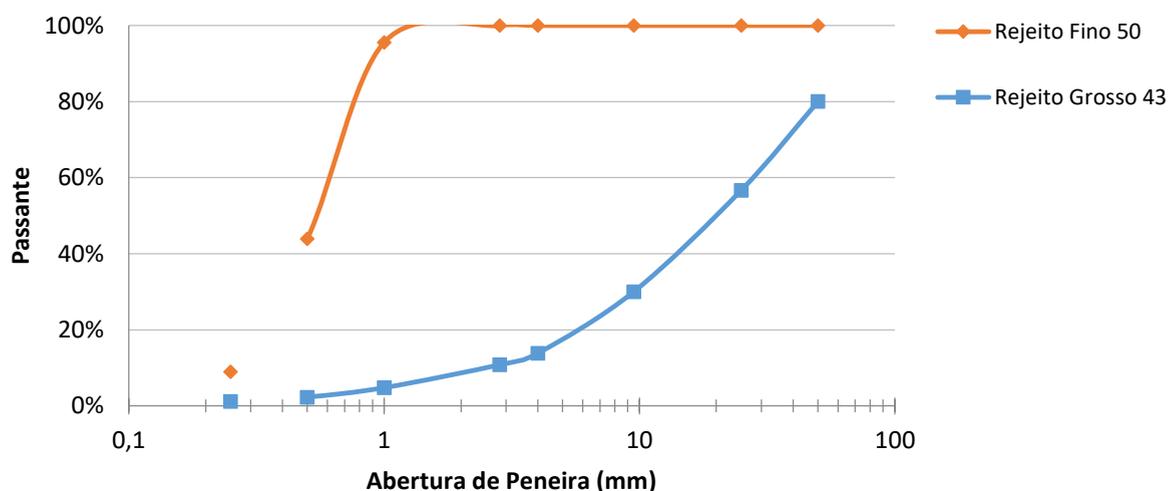


Figura 14. Curvas granulométricas dos rejeitos da camada LC456.

Tabela 13. Parâmetros granulométricos das camadas analisadas.

Camada	<i>Top size</i> (mm)		$D_{10}$ (mm)		$D_{50}$ (mm)		$D_{90}$	
	Grossos	Finos	Grossos	Finos	Grossos	Finos	Grossos	Finos
UCT	50*	1,0*	2,83	0,25	25	0,5*	-	1,0
UCB	50*	1,0*	2,83	0,25	25	0,5*	-	1,0
MLCU	50*	1,0*	2,83	0,25	25	0,5*	-	1,0
LC456	50*	1,0*	2,83	0,25	25	0,5*	-	1,0

\* Valore de *top size* (grossos e finos) e  $D_{50}$  (finos) estimados pelo comportamento da curva.

O *top size* entre as camadas se manteve aproximado, sendo de 50 mm para rejeitos grossos e de 1 mm para rejeitos finos. Houve uma grande semelhança entre as distribuições granulométricas dos carvões retirados das diferentes subcamadas, o que pode ser verificado nos

parâmetros granulométricos apresentados na Tabela 13. Essa semelhança também pode ser observada nas Tabelas 14 e 15, que mostram os valores médios retidos nas diferentes malhas granulométricas para o material coletado nas diferentes subcamadas.

Tabela 14. Distribuição granulométrica média dos rejeitos grossos.

Peneira (mm)	% Retido Acumulado			
	UCT	UCB	MLCU	LC456
50	14,7	20,7	19,3	20,0
25	35,4	41,2	51,0	43,3
9,5	65,6	66,5	73,4	70,0
4	83,1	82,5	87,4	86,1
2,83	86,8	86,2	90,0	89,2
1	93,9	93,0	96,1	95,2
0,5	97,5	97,1	98,8	97,7
0,25	99,0	98,8	99,5	98,8
0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 15. Distribuição granulométrica média dos rejeitos finos.

Peneira (mm)	% Retido Acumulado			
	UCT	UCB	MLCU	LC456
50	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0
2,83	0,0	0,0	0,0	0,0
1	5,0	5,5	6,2	4,4
0,5	70,5	63,2	61,6	56,1
0,25	94,8	92,5	90,2	91,0
0	100,0	100,0	100,0	100,-

A obtenção de informações de tamanho e distribuição das partículas é importante, pois auxilia na prevenção da geração da DAM, uma vez que o tamanho de partículas tem uma influência direta nas áreas superficiais e na forma com que os espaços serão ocupados. Segundo Bradham e Caruccio (1990) e Caruccio et al (1993), a distribuição do tamanho de partículas pode bloquear ou minimizar a entrada de oxigênio e água no sistema, inibindo ou até mesmo cessando a produção de DAM.

### 4.3. Massa específica

Os resultados das medidas de massa específica real, massa específica aparente e do índice de vazios ( $\epsilon$ ) estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 16 e 17 para rejeitos grossos e para

os rejeitos finos. Pode-se observar que a massa específica real média dos rejeitos grossos é de 2,21 g cm<sup>-3</sup>, enquanto que para os rejeitos finos a massa específica real média é de 1,79 g cm<sup>-3</sup>. Os rejeitos grossos apresentaram, em média, uma massa específica aparente de 1,18 g cm<sup>-3</sup> com um volume de vazios de 39%. Os valores para os rejeitos finos de massa específica aparente foram de 1,08 g cm<sup>-3</sup> e um volume de vazios de 46%.

Tabela 16. Resultados do ensaio de massa específica para os rejeitos grossos.

	UCT	UCB	MLCU	LC 456	Média
<b>Massa específica real (g cm<sup>-3</sup>)</b>	2,05	2,26	2,28	2,26	2,21
<b>Massa específica aparente (g cm<sup>-3</sup>)</b>	1,07	1,20	1,20	1,23	1,18
<b>ε (%)</b>	40	38	38	42	39

Tabela 17. Resultados do ensaio de massa específica para os rejeitos finos.

	UCT	UCB	MLCU	LC 456	Média
<b>Massa específica real (g cm<sup>-3</sup>)</b>	1,824	1,75	1,77	1,80	1,79
<b>Massa específica aparente (g cm<sup>-3</sup>)</b>	1,05	1,12	1,06	1,12	1,08
<b>ε (%)</b>	47	44	46	45	46

A Tabela 18 apresenta-se a massa específica aparente, a relação mássica grossos:finos máxima de incorporação dos finos nos espaços vazios entre as partículas grossas e o índice de vazios. Os valores médios obtidos foram, respectivamente, de 1,52 g cm<sup>-3</sup>, 1 : 0,29 e 30%.

Tabela 18. Resultados do ensaio de massa específica para a mistura de rejeitos grossos e finos.

	UCT	UCB	MLCU	LC 456	Média
<b>Massa específica aparente (g cm<sup>-3</sup>)</b>	1,42	1,48	1,60	1,57	1,52
<b>Relação mássica grossos:finos (m/m)</b>	1 : 0,32	1 : 0,23	1 : 0,34	1 : 0,27	1 : 0,29
<b>ε (%)</b>	33	23	29	34	30

Pela análise de massa específica foi possível observar que houve aumento no valor da massa específica aparente e uma diminuição do índice de vazios na mistura grossos:finos quando comparado com os valores das amostras individuais.

Segundo fluxograma da planta de beneficiamento (Anexo B), a relação mássica entre a quantidade de rejeitos grossos e rejeitos finos produzidos é de 1:0,1. Contudo, o sistema apresenta um potencial de atingir uma relação de incorporação de quase 1:0,3, ou seja, um terço maior do que a relação grossos:finos de saída na planta. Tendo em vista que os rejeitos grossos gerados são

devolvidos para a cava e que os rejeitos finos são destinados para uma bacia de rejeitos, se ambos os rejeitos fossem misturados e seguissem a destinação dos grossos, haveria uma redução de área para destinação dos resíduos, no caso a ocupada pelos finos.

#### 4.4. Análise imediata e de enxofre

Na Tabela 19 são apresentados os resultados das análises de cinzas, matéria volátil e carbono fixo para as amostras de rejeitos grossos e finos das quatro subcamadas analisadas.

Não houve grande variação dos resultados entre camadas nem entre as granulometrias dos rejeitos. Os valores médios dos rejeitos grossos e finos foram, respectivamente, de 58,9% e 58,4% de cinzas, 16,5% e 16,6% de matéria volátil e 24,6% e 25,0% de carbono fixo.

Tabela 19. Resultados da análise imediata realizada nos rejeitos de carvão.

Camadas	Grossos			Finos		
	Cinzas (%)	Matéria Volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)	Matéria Volátil (%)	Carbono Fixo (%)
UCT	60,5	15,8	23,7	54,4	18,4	27,3
UCB	59,2	16,5	24,2	60,3	15,2	24,5
MLCU	51,6	17,7	30,7	64,8	14,2	20,9
LC456	64,4	15,9	19,8	54,0	18,6	27,4
<b>Média</b>	58,9	16,5	24,6	58,4	16,6	25,0

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos na análise de enxofre total e suas especiações (pirítico, sulfático e orgânico) para os rejeitos grossos e finos.

Não foi possível indicar diferença significativa na quantidade de enxofre entre as camadas. Entretanto, foi possível perceber uma diferença entre as granulometrias. Os rejeitos grossos apresentaram um valor médio de 0,9%, enquanto que os rejeitos finos apresentaram uma quantidade maior de enxofre, com média de 1,3%.

Isso também pode ser percebido nas formas do enxofre, em especial no pirítico. Os rejeitos grossos (com uma média de 0,4%) possuem uma menor quantidade de pirita que os rejeitos finos (com uma média de 0,6%) e, por isso, menor potencial de geração de acidez.

Tabela 20. Análise de enxofre total e suas especiações.

	Grossos				Finos			
	S <sub>total</sub> (%)	S <sub>pirítico</sub> (%)	S <sub>sulfático</sub> (%)	S <sub>orgânico</sub> (%)	S <sub>total</sub> (%)	S <sub>pirítico</sub> (%)	S <sub>sulfático</sub> (%)	S <sub>orgânico</sub> (%)
UCT	1,0	0,6	0,1	0,4	1,3	0,7	0,2	0,4
UCB	1,1	0,4	0,0	0,6	1,3	0,6	0,2	0,5
MLCU	0,8	0,4	0,0	0,3	1,2	0,4	0,1	0,7
LC456	0,7	0,3	0,2	0,1	1,5	0,7	0,2	0,6
Média	0,9	0,4	0,1	0,4	1,3	0,6	0,2	0,6

O rejeito grosso proveniente da Mina de Moatize é depositado na própria cava. Tendo como base a produção atual da mina de cerca de 600 toneladas por mês deste rejeito, estima-se que até o final da vida útil da mina 81 toneladas de enxofre total serão depositadas, sendo 36 toneladas de enxofre pirítico. Quanto ao rejeito fino, que tem como destino uma bacia de rejeitos, a deposição média é de 68 toneladas por mês. Desta forma a bacia acumulará cerca de 13 toneladas de enxofre total ao longo da vida útil da mina, sendo 6 toneladas de enxofre pirítico.

#### 4.5. Composição mineralógica

Através da análise de DRX foi possível identificar os compostos cristalinos presentes nos rejeitos de carvão estudados. Observa-se que, em todas as amostras, o quartzo aparece como componente majoritário. A calcita, forma cristalina do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), é um componente sempre presente como minoritário. A presença de pirita não foi identificada, possivelmente devido a baixa concentração nas diferentes amostras.

Tabela 21. Componentes cristalinos majoritários e minoritários identificados nas amostras.

	Grossos		Finos	
	Majoritários	Minoritários	Majoritários	Minoritários
UCT	quartzo	quartzo	quartzo	halita, calcita, hematita
UCB	quartzo, hematita	quartzo, hematita	quartzo	calcita, hematita
MLCU	quartzo, hematita	quartzo, hematita	quartzo	calcita, hematita
LC456	quartzo, alumina	quartzo, alumina	quartzo	calcita

#### 4.6. Contabilização de ácidos e bases

Os resultados do ensaio estático de contabilização de ácidos e bases são apresentados na Tabela 22. Observa-se que o potencial de geração de acidez é inferior ao potencial de neutralização para todas as amostras analisadas, resultando em um potencial de neutralização líquido positivo,

embora esteja na faixa de difícil indicação de potencial ( $-20 < \text{NNP} < +20 \text{ kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$ ). O equilíbrio apresentado pode ser explicado devido à baixa concentração de enxofre pirítico e a presença de componentes alcalinos, como a calcita, que foi identificada como um mineral minoritário através da análise por Difração de Raios-X (DRX).

Tabela 22. Resultados do teste estático de contabilização de ácidos e bases.

	Grossos			Finos		
	NP (kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> )	AP (kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> )	NNP (kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> )	NP (kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> )	AP (kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> )	NNP (kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup> )
UCT	29,7	18,8	10,9	27,4	22,4	5,0
UCB	15,6	13,8	1,8	20,0	19,5	0,5
MLCU	20,5	13,0	7,5	22,5	12,9	9,7
LC	28,3	10,4	17,9	31,1	21,0	10,1
<b>Média</b>	<b>23,5</b>	<b>14,0</b>	<b>9,5</b>	<b>25,3</b>	<b>19,0</b>	<b>6,3</b>

#### 4.7. Quantificação de metais pelo método EPA 3050

A quantificação de metais ambientalmente disponíveis presentes nas amostras foi realizada conforme método US EPA 3050 (US EPA, 1996). Os elementos analisados foram Al, As, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Va, Zn, Ba, Na, Ca, K e Mg. Os resultados obtidos para os rejeitos grossos estão detalhados na Tabela 23, enquanto os resultados para os rejeitos finos, na Tabela 24.

Tabela 23. Resultado dos metais ambientalmente disponíveis no rejeito grosso, conforme EPA 3050.

Elemento	UCT	UCB	MLCU	LC45	Média	DP	
Al	% m/m	4,3	3,3	6,05	3,7	4,43	1,26
As	mg kg <sup>-1</sup>	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	-
Ba	mg kg <sup>-1</sup>	231	203	236,5	234	225	16
Ca	% m/m	0,99	1,2	0,64	0,91	0,94	0,25
Cd	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	-
Co	mg kg <sup>-1</sup>	9	5	7,5	11	7,71	2,29
Cr	mg kg <sup>-1</sup>	36	35,5	39,5	43	37,86	2,97
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	37	32,5	42	44	38,14	4,91
Fe	% m/m	2	1,9	2,05	2,6	2,07	0,27
K	% m/m	0,65	0,41	0,47	0,44	0,50	0,11
Mg	% m/m	0,43	0,5	0,31	0,45	0,42	0,10
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	257	230,5	288	515	295,1	104,5
Mo	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	-
Na	mg kg <sup>-1</sup>	378	323	456	446	394,29	64,68
Ni	mg kg <sup>-1</sup>	16,5	10,5	14,5	20	14,71	3,55
Pb	mg kg <sup>-1</sup>	26,5	26	22	24	24,71	2,75
Se	mg kg <sup>-1</sup>	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	-
Va	mg kg <sup>-1</sup>	36,5	28,5	40,5	40	35,86	6,15
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	73,5	47	66	75	64,00	13,25

Tabela 24. Resultado dos metais ambientalmente disponíveis no rejeito fino, conforme EPA 3050.

Elemento		UCT	UCB	MLCU	LC45	Média	DP
Al	% m/m	3,6	4,3	3,8	3,2	3,77	0,75
As	mg kg <sup>-1</sup>	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	-
Ba	mg kg <sup>-1</sup>	218,5	241,5	222,0	218	226,00	13,65
Ca	% m/m	1,8	1,0	1,2	1,4	1,35	0,35
Cd	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	-
Co	mg kg <sup>-1</sup>	11,0	10,5	8,5	10	10,00	1,29
Cr	mg kg <sup>-1</sup>	42,5	29,5	35,0	42	36,57	7,16
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	30,5	30,0	29,5	30	30,00	1,00
Fe	% m/m	2,2	2,5	2,0	2,8	2,30	0,36
K	% m/m	0,7	0,5	0,4	0,35	0,50	0,19
Mg	% m/m	0,4	0,3	0,4	0,45	0,37	0,05
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	371,0	275,5	258,5	482	327,43	90,70
Mo	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	-
Na	mg kg <sup>-1</sup>	300,5	338,5	345,0	371	334,14	35,87
Ni	mg kg <sup>-1</sup>	17,5	16,0	15,0	17	16,29	1,25
Pb	mg kg <sup>-1</sup>	21,0	25,5	23,0	19	22,57	3,05
Se	mg kg <sup>-1</sup>	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	-
Va	mg kg <sup>-1</sup>	41,5	40,5	38,5	40	40,14	2,91
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	66,5	65,0	55,0	60	61,86	5,40

Os resultados indicam que não há teores ambientalmente anômalos para os metais analisados. Para fins de comparação, a Tabela 25 apresenta valores de prevenção e de investigação para áreas agrícolas, residenciais e industriais previstos na Resolução CONAMA 420/2009 (Brasil, 2009). A concentração de metais no rejeito está sempre abaixo dos limites de prevenção estabelecidos no Brasil. Não se encontraram os valores estabelecidos em Moçambique.

Tabela 25. Concentração de metais nos rejeitos grossos e finos e os valores de prevenção (VP) e de investigação (VI) para áreas agrícolas, residenciais e industriais (em mg kg<sup>-1</sup>) previsto na Resolução CONAMA 420/2009.

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Rejeito grosso	< 2	< 2	38	38	15	25	64
Rejeito fino	< 2	< 2	37	30	16	23	62
VP	15	1,3	75	60	30	72	300
VI - Área agrícola	35	3	150	200	70	180	450
VI - Área residencial	55	8	300	400	100	300	1000
VI - Área industrial	150	20	400	600	130	900	2000

Fonte: Brasil, 2009.

#### 4.8. Ensaio cinético em células úmidas

Nas Figuras 15 e 16 estão apresentados os resultados das análises semanais de pH, Eh, e nas Figuras 17 e 18 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 +250 mV e -50 mV para os lixiviados, indicando um comportamento predominantemente oxidativo.

Em relação à acidez, os maiores valores ocorreram para o rejeito fino, resultado que provavelmente se deve à maior quantidade de enxofre pirítico nessa amostra. Entretanto, os valores de alcalinidade superam 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.

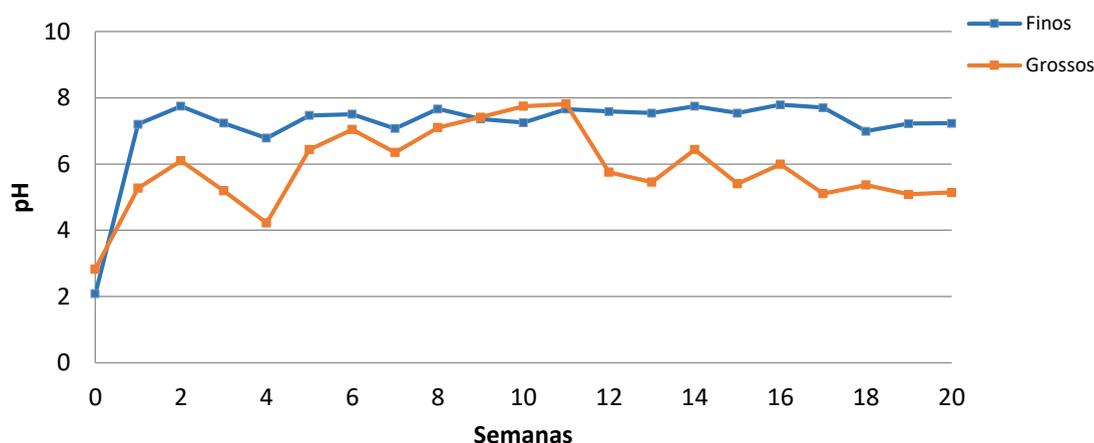


Figura 15. Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – pH.

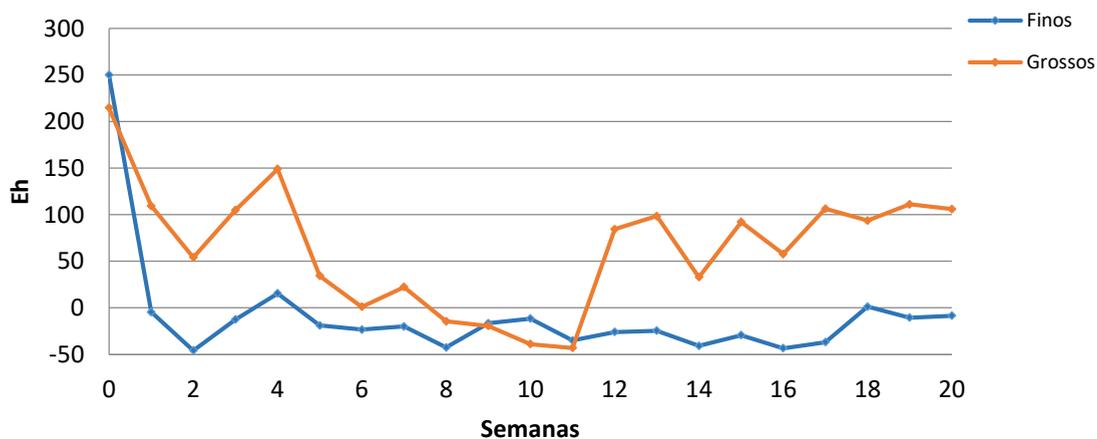


Figura 16. Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – Eh.

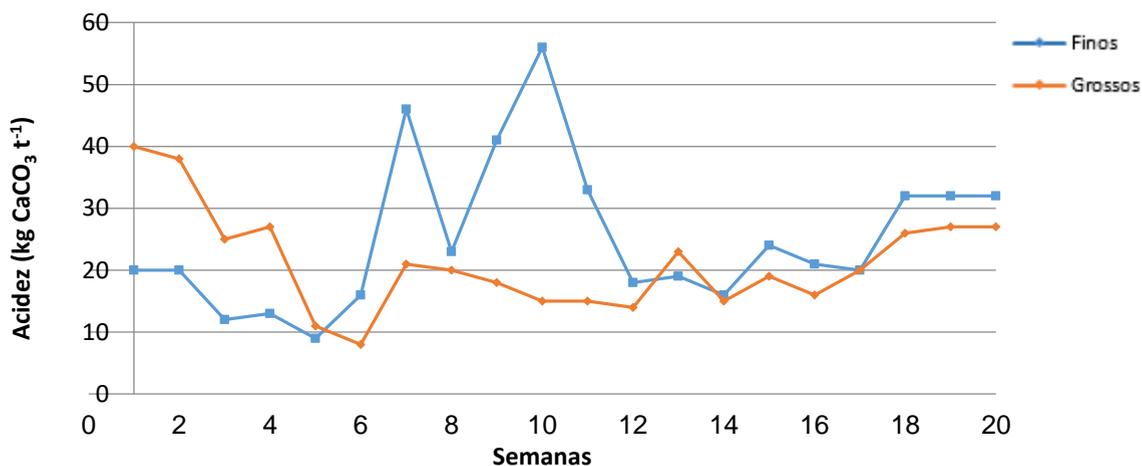


Figura 17. Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – acidez.

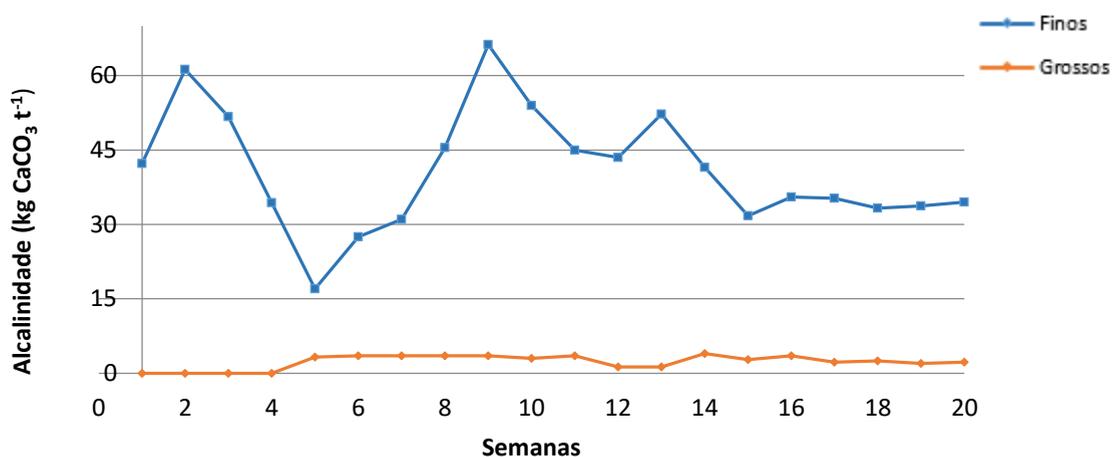


Figura 18. Qualidade da água lixiviada em função do tempo de ensaio nas células úmidas – alcalinidade.

As Figuras, de 19 a 33, apresentam os resultados das análises de K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Mn, Na, Ni, Pb, Al, Co, As, Ba e  $SO_4^{2-}$  ao longo das 20 semanas de estudos nas células úmidas.

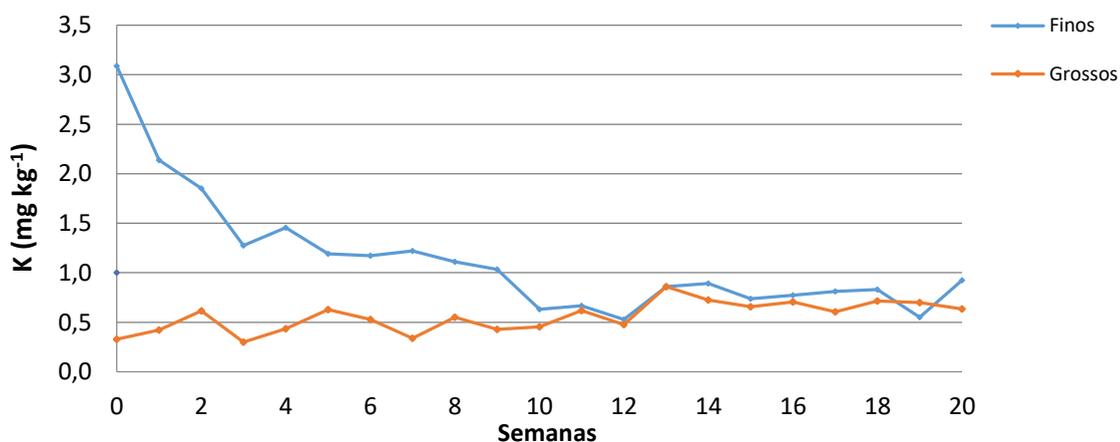


Figura 19. Valores de K (potássio) ao longo das semanas de estudo.

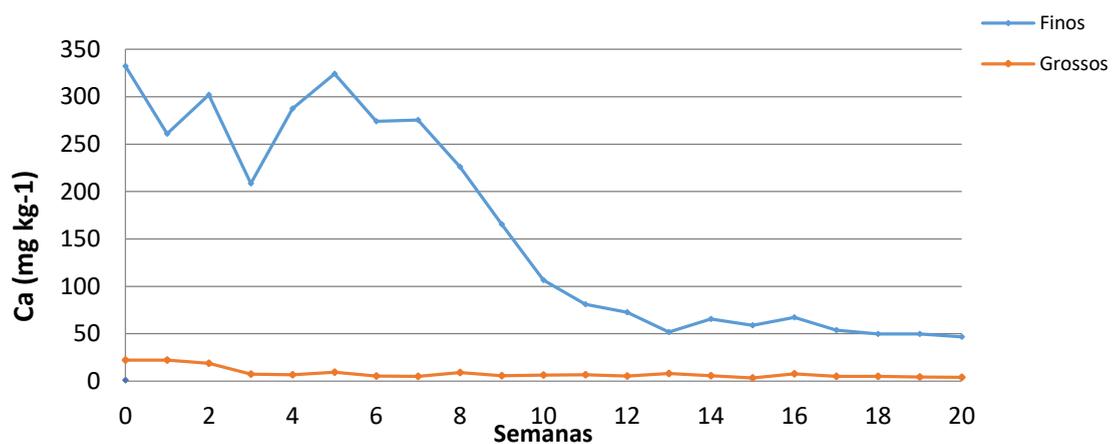


Figura 20. Valores de Ca (cálcio) ao longo das semanas de estudo.

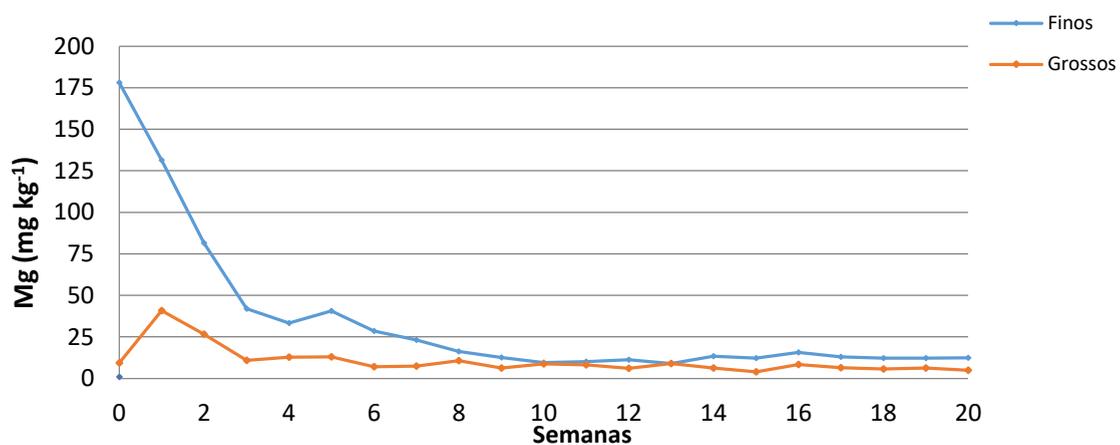


Figura 21. Valores de Mg (magnésio) ao longo das semanas de estudo.

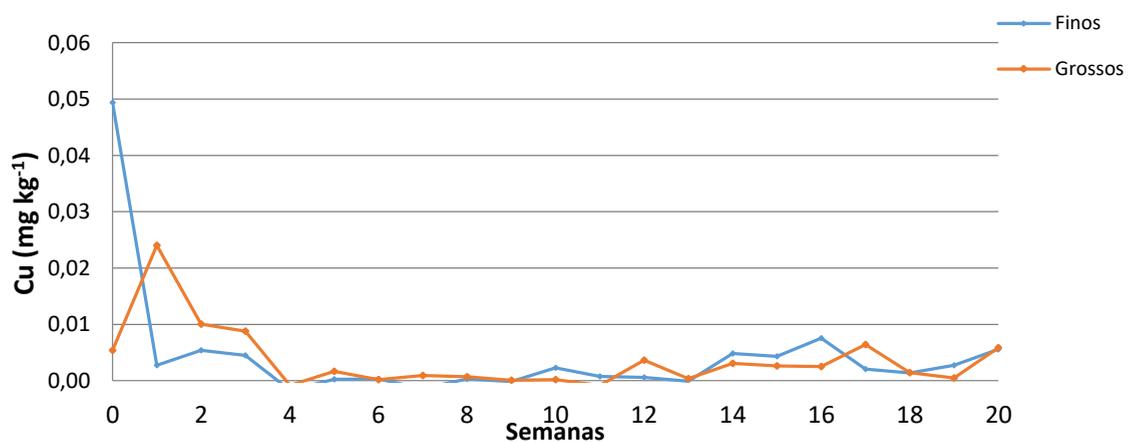


Figura 22. Valores de Cu (cobre) ao longo das semanas de estudo.

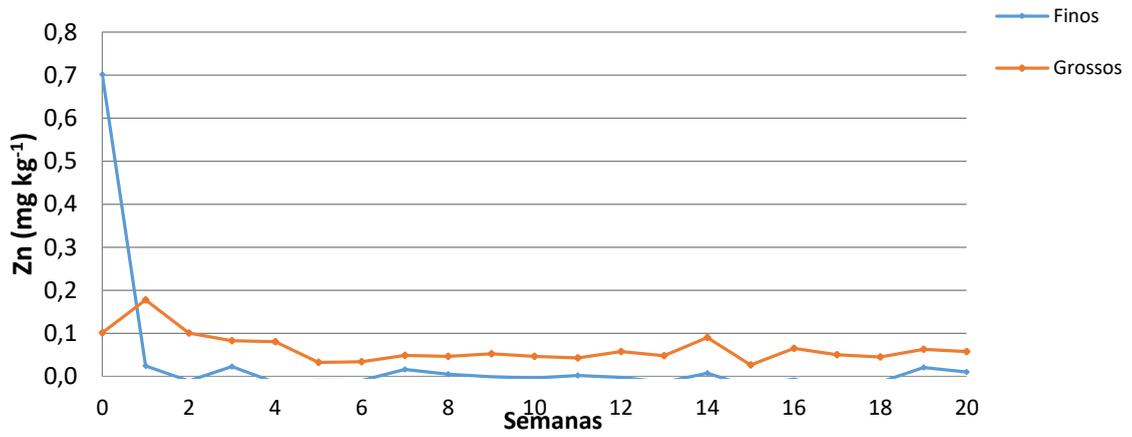


Figura 23.Valores de Zn (zinco) ao longo das semanas de estudo.

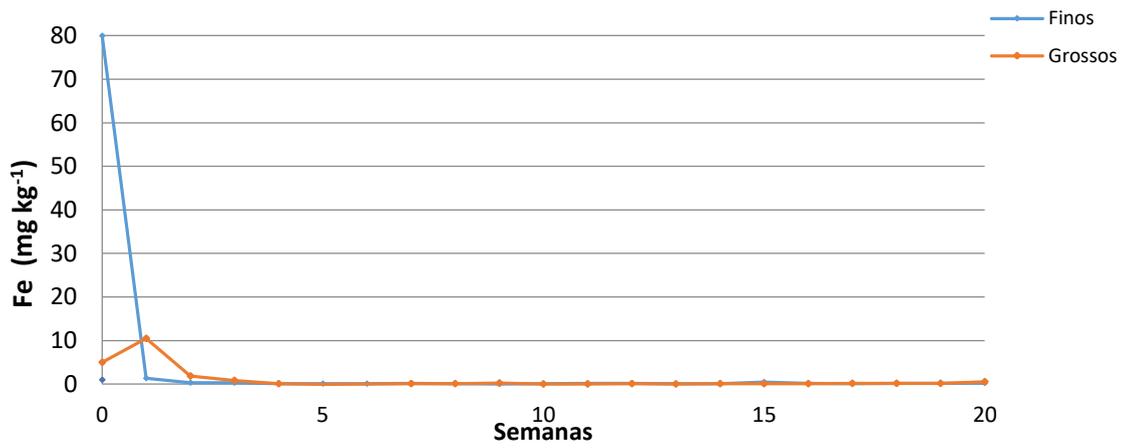


Figura 24.Valores de Fe (ferro) ao longo das semanas de estudo.

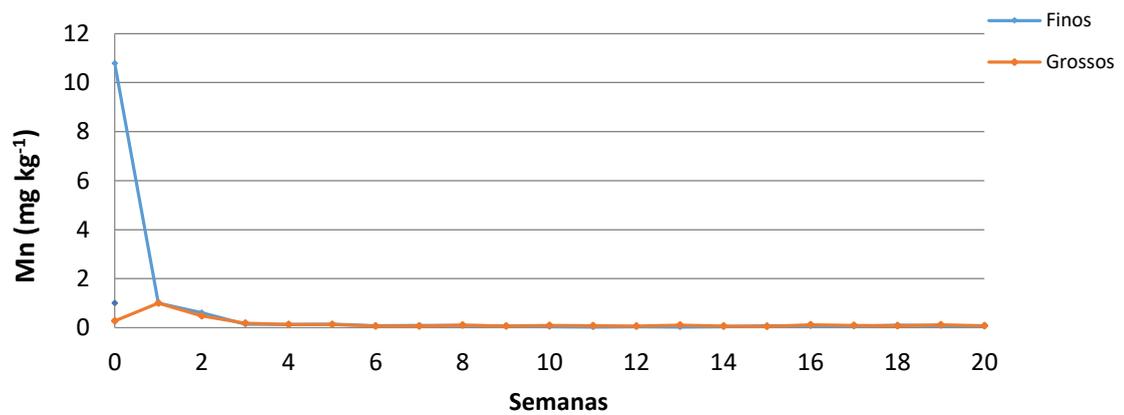


Figura 25.Valores de Mn (manganês) ao longo das semanas de estudo.

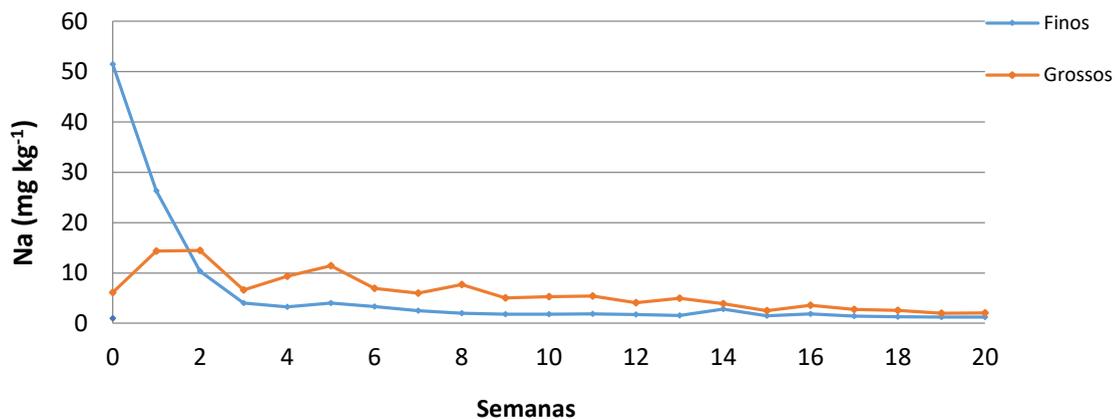


Figura 26. Valores de Na (sódio) ao longo das semanas de estudo.

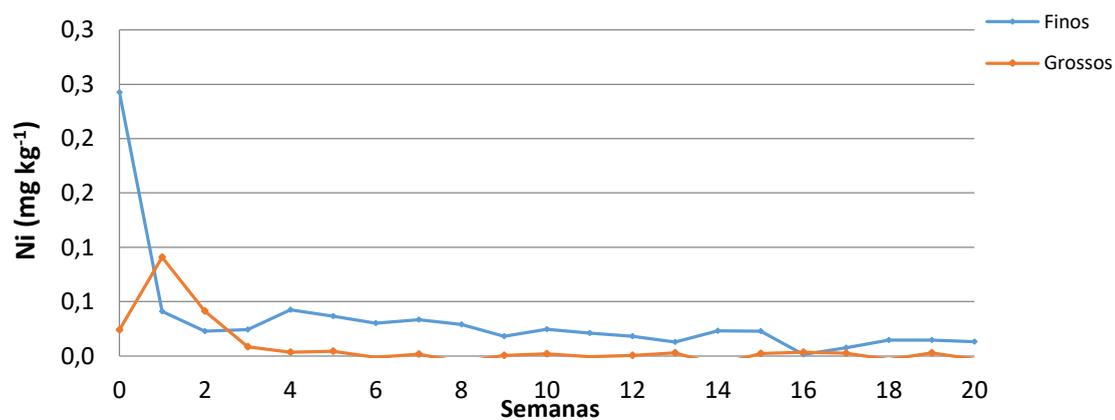


Figura 27. Valores de Ni (níquel) ao longo das semanas de estudo.

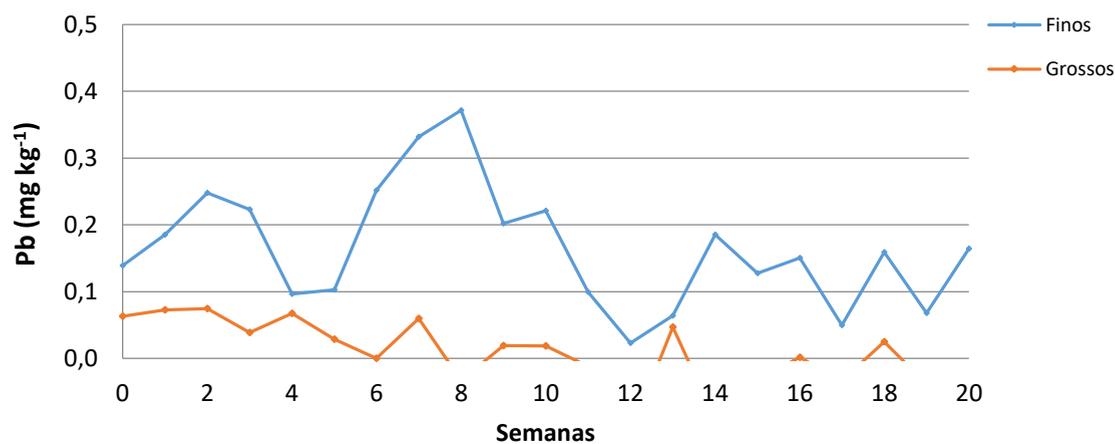


Figura 28. Valores de Pb (chumbo) ao longo das semanas de estudo.

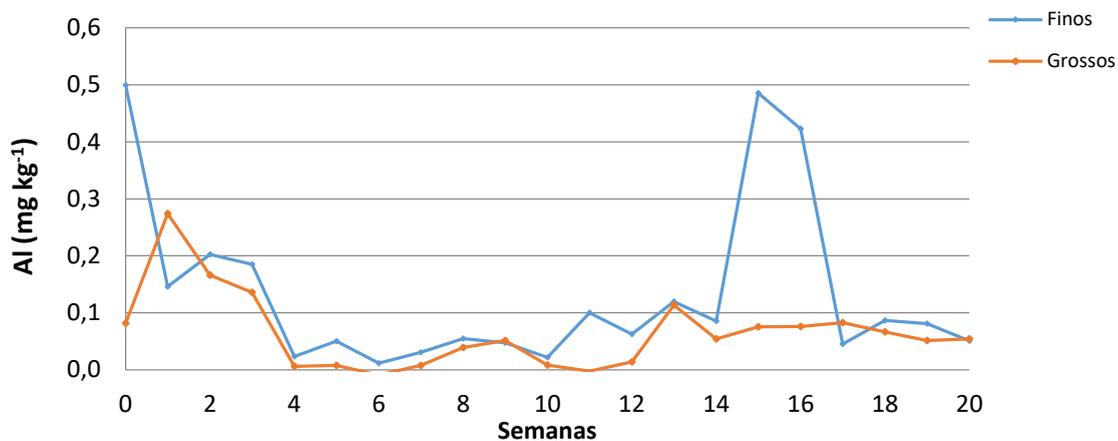


Figura 29. Valores de Al (alumínio) ao longo das semanas de estudo.

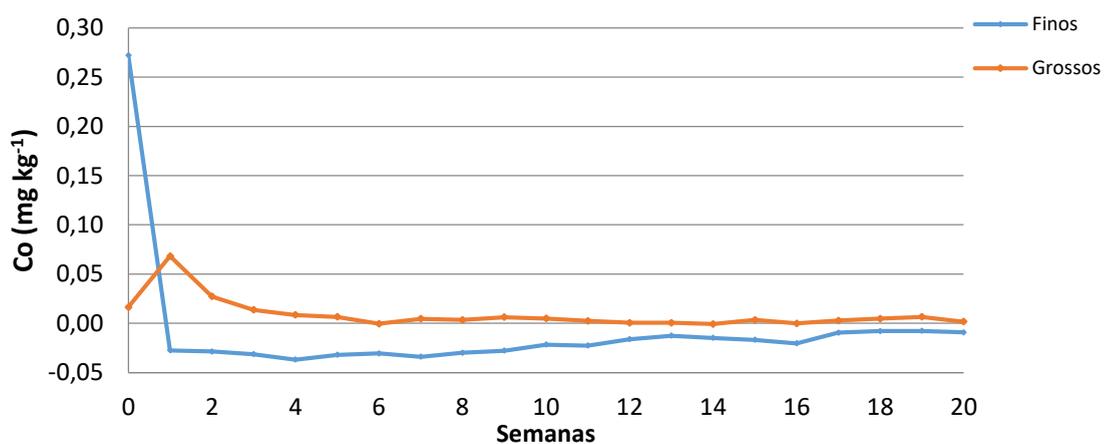


Figura 30. Valores de Co (cobalto) ao longo das semanas de estudo.

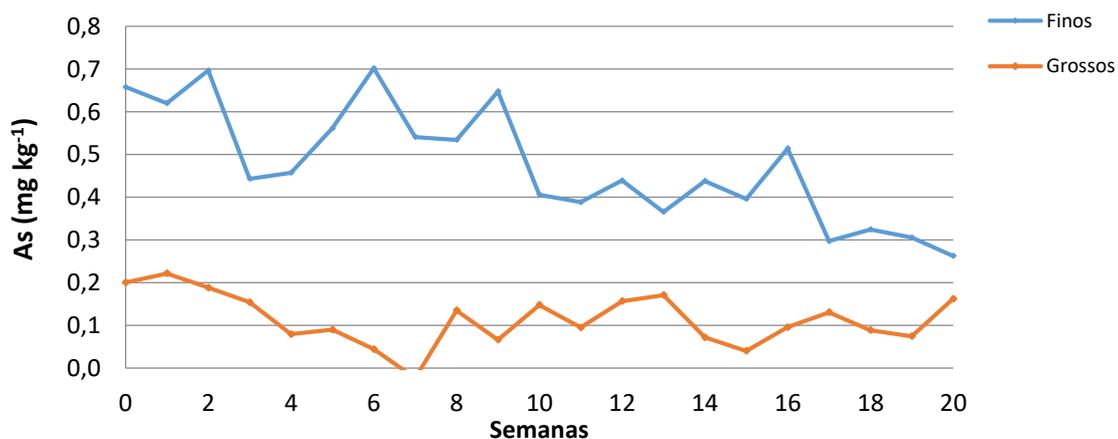


Figura 31. Valores de As (arsênio) ao longo das semanas de estudo.

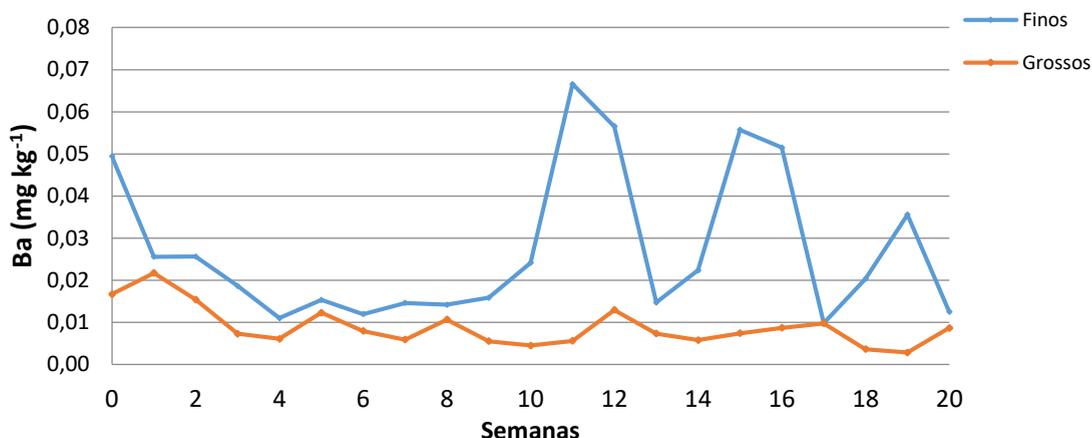


Figura 32. Valores de Ba (bário) ao longo das semanas de estudo.

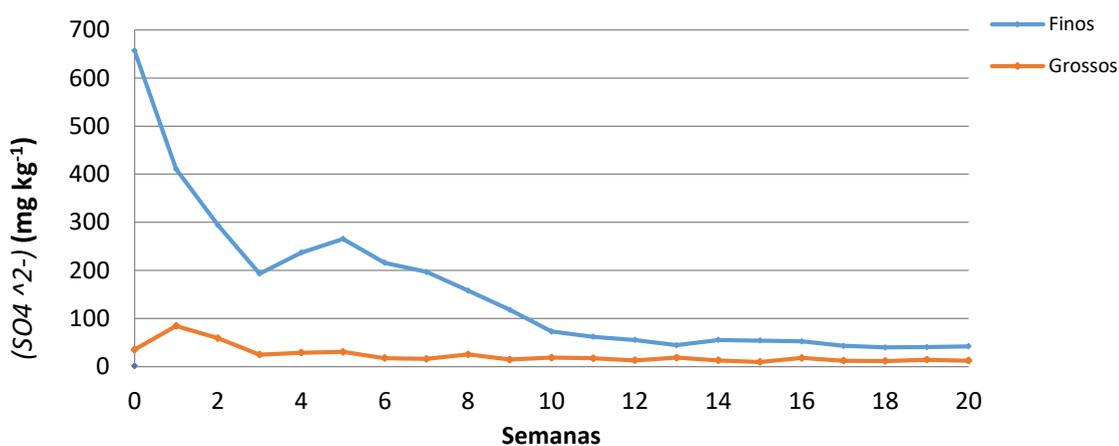


Figura 33. Valores de  $SO_4^{2-}$  (sulfato) ao longo das semanas de estudo.

As Tabelas 26 e 27 mostram, respectivamente para os rejeitos grossos e finos, os valores individuais e médios dos obtidos na análise pelo método EPA 3050. Também apresentam o valor acumulado durante 20 semanas no processo de lixiviação. A análise pelo método EPA 3050 determina a máxima quantidade de metal que uma amostra pode liberar para o meio ambiente. O resultado obtido nas células úmidas representa somente o que foi coletado durante o processo de lixiviação com água destilada durante as 20 semanas nas células úmidas. Assim, os resultados das células úmidas sempre serão menores do que o obtido no método EPA 3050. Em termos percentuais, os metais lixiviados em maior quantidade foram o Na, Ca e o Mg, tanto para os rejeitos grossos como finos. Outros metais foram lixiviados em menores concentrações, o que está consistente com mobilidade geoquímica de solos e rochas (Sposito, 2008).

Tabela 26. Valores da quantidade de metais acumulados nos rejeitos grossos ao longo das 20 semanas de estudo em células úmidas.

Elemento		EPA 3050					CÉLULAS ÚMIDAS		
		UCT	UCB	MLCU	LC45	Média	DP*	Acumulado	%(pela média)
Al	% m/m	4,3	3,3	6,05	3,7	4,43	1,26	0,0003	0,006
As	mg kg <sup>-1</sup>	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	-	2,42	-
Ba	mg kg <sup>-1</sup>	231	203	236,5	234	225	16	0,19	0,1
Ca	% m/m	0,99	1,2	0,64	0,91	0,94	0,25	0,04	3,7
Cd	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	-	nd	-
Co	mg kg <sup>-1</sup>	9,0	5,0	7,5	11	7,71	2,29	0,18	2,3
Cr	mg kg <sup>-1</sup>	36	35,5	39,5	43	37,86	2,97	0,00	-
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	37	32,5	42	44	38,14	4,91	0,08	0,2
Fe	% m/m	2,0	1,9	2,05	2,6	2,07	0,27	0,004	0,2
K	% m/m	0,65	0,41	0,47	0,44	0,5	0,11	0,002	0,5
Mg	% m/m	0,43	0,5	0,31	0,45	0,42	0,1	0,04	10,4
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	257	230,5	288	515	295,1	104,5	3,49	1,2
Mo	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	-	nd	-
Na	mg kg <sup>-1</sup>	378	323	456	446	394,29	64,68	127,17	32,3
Ni	mg kg <sup>-1</sup>	16,5	10,5	14,5	20	14,71	3,55	0,17	1,1
Pb	mg kg <sup>-1</sup>	26,5	26	22	24	24,71	2,75	0,51	2,1
Se	mg kg <sup>-1</sup>	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	-	nd	-
Va	mg kg <sup>-1</sup>	36,5	28,5	40,5	40	35,86	6,15	nd	-
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	73,5	47	66	75	64	13,25	0,79	1,2

(\*DP: Desvio Padrão)

Tabela 27. Valores da quantidade de metais acumulados nos rejeitos finos ao longo das 20 semanas de estudo em células úmidas.

Elemento		EPA 3050					CÉLULAS ÚMIDAS		
		UCT	UCB	MLCU	LC45	Média	DP*	Acumulado	%(pela média)
Al	% m/m	3,6	4,3	3,8	3,2	3,77	0,75	0,0006	0,015
As	mg kg <sup>-1</sup>	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	-	10,00	-
Ba	mg kg <sup>-1</sup>	218,5	241,5	222,0	218	226,00	13,65	0,57	0,3
Ca	% m/m	1,8	1,0	1,2	1,4	1,35	0,35	0,67	49,8
Cd	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	-	nd	-
Co	mg kg <sup>-1</sup>	11,0	10,5	8,5	10	10,00	1,29	0,27	2,7
Cr	mg kg <sup>-1</sup>	42,5	29,5	35,0	42	36,57	7,16	nd	-
Cu	mg kg <sup>-1</sup>	30,5	30,0	29,5	30	30,00	1,00	0,09	0,3
Fe	% m/m	2,2	2,5	2,0	2,8	2,30	0,36	0,01	0,3
K	% m/m	0,7	0,5	0,4	0,35	0,50	0,19	0,005	0,9
Mg	% m/m	0,4	0,3	0,4	0,45	0,37	0,05	0,14	38,9
Mn	mg kg <sup>-1</sup>	371,0	275,5	258,5	482	327,43	90,70	13,81	4,2
Mo	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	-	nd	-
Na	mg kg <sup>-1</sup>	300,5	338,5	345,0	371	334,14	35,87	127,38	38,1
Ni	mg kg <sup>-1</sup>	17,5	16,0	15,0	17	16,29	1,25	0,69	4,3
Pb	mg kg <sup>-1</sup>	21,0	25,5	23,0	19	22,57	3,05	3,46	15,3
Se	mg kg <sup>-1</sup>	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	-	nd	-
Va	mg kg <sup>-1</sup>	41,5	40,5	38,5	40	40,14	2,91	0,46	1,1
Zn	mg kg <sup>-1</sup>	66,5	65,0	55,0	60	61,86	5,40	1,35	2,2

(\*DP: Desvio Padrão)

Por fim, a Tabela 28 mostra os resultados da forma de enxofre e da contabilização de ácidos e bases para as partículas grossas e finas antes e após os testes em células úmidas. Ambos os rejeitos mostram uma redução no teor de enxofre após as 20 semanas de lixiviação, particularmente devido a uma diminuição do enxofre pirítico, o qual diminuiu em 20% para os rejeitos grossos e 50% para os rejeitos finos. Como resultados, o potencial de acidificação diminuiu. Esses resultados estão de acordo com o trabalho de Erguler e Kalyoncu (2015), que demonstraram uma cinética mais rápida de geração de DAM para materiais finos do que grossos em colunas de lixiviação, em decorrência da maior área superficial exposta. Por sua vez, o potencial de neutralização (NP) após o teste manteve-se aproximadamente igual ao do início. Assim, o balanço ácido-base (NNP), manteve-se dentro do intervalo de “difícil previsão de geração de acidez”.

Tabela 28. Valores das formas de enxofre e dos parâmetros do teste de contabilização de ácidos de bases antes e após as 20 semanas do ensaio em células úmidas para os rejeitos grossos e finos.

	Finos		Grossos	
	Antes	Depois	Antes	Depois
<b>S<sub>total</sub> (%)</b>	1,33	0,94	0,89	0,77
<b>S<sub>piritico</sub> (%)</b>	0,61	0,32	0,45	0,36
<b>S<sub>sulfático</sub> (%)</b>	0,18	0,14	0,09	0,28
<b>S<sub>orgânico</sub> (%)</b>	0,55	0,53	0,35	0,13
<b>NP (kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>)</b>	25,3	29,8	23,5	33,6
<b>AP (kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>)</b>	19,0	10,0	14,0	11,3
<b>NNP (kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>)</b>	6,3	19,8	9,5	22,2

Assim, os rejeitos de carvão da camada Chipanga da Mina de Moatize, tanto grossos como finos, apresentam, no balanço ácido-base, um comportamento levemente alcalino, o que é explicado pela baixa concentração de pirita e a presença de carbonatos. Os resultados dos estudos estáticos e cinéticos comprovaram que o material possui tendência à formação de um lixiviado neutro a levemente alcalino. Isso confirma o que também foi constatado por Pondja et. al (2017) em outro estudo relacionado com o potencial de geração de acidez de rejeitos de carvão da região de Moatize. Assim, não é esperado que haja, em curto prazo, uma geração de drenagem ácida nos rejeitos de carvão mineral da jazida estudada. Contudo, no longo prazo, poderá haver o consumo dos minerais alcalinos (carbonatos) e a geração de drenagem ácida poderá se dar pela oxidação da pirita.

Em relação à prática corrente de manuseio dos rejeitos grossos e finos e sua disposição na mina, as partículas grossas provenientes do circuito de ciclones de meio denso, com *top size* esperado de 50 mm (ou como constatado, um pouco maior), são enviadas temporariamente para silos de estocagem e continuamente removidas por caminhões, retornando para a cava de exploração mineral. As partículas finas, provenientes dos circuitos de “reflux”, espirais e flotação, com *top size* de 1 mm, são bombeadas para a barragem de rejeitos.

O retorno do material grosso para a cava é um procedimento satisfatório e seguro e ajuda na reconformação do terreno. Atualmente, os rejeitos finos estão sendo dispostos em barragens de rejeitos, estruturas que recebem o material fino em suspensão, propiciando a sedimentação dos sólidos por ação da gravidade, enquanto a água é drenada e/ou evaporada. Estas estruturas requerem grandes áreas e há risco de rompimento. O material fino pode também ser transportado pelo vento ou pela água para regiões próximas, comprometendo o solo e corpos d’água. No

decorrer do tempo, pela ação do ar e da água, pode entrar em processo de geração de águas ácidas ou compactar, dificultando o processo de revegetação ( Wu et al., 2010; Kossoff et al., 2014; Wang e Harbottle, 2014).

O espessamento, filtração e empilhamento a seco podem ser considerados uma prática ambiental positiva e uma alternativa para a disposição em barragens de rejeitos (Wu et al. 2010; Franks et al., 2012; Edraki et al., 2014; Wang et al., 2014). Uma vez secos, os rejeitos finos podem ser misturados aos rejeitos grossos e retornados a cava, ou preparados para futuros usos como a fabricação de solos (Firpo et al, 2015; Weiler et al, 2018). Outro processo de reciclagem que pode ser considerado é o uso do material como matéria prima para a fabricação de blocos de concreto para pavimentação ou peças cerâmicas como tijolos (Santos et al., 2015; Taha et al, 2017).

Assim, de acordo com os resultados deste estudo, os rejeitos de carvão da Mina de Moatize apresentam um baixo potencial de geração de acidez e um baixo potencial de liberar elementos tóxicos para o ambiente. Os elementos com maior mobilidade foram o Ca, Mg, Na e S (este na forma de sulfatos). No presente caso, o melhor uso para os rejeitos grossos poderia ser na configuração do terreno escavado e os finos no preenchimento dos espaços vazios dos grossos e, talvez, na transformação de substratos para crescimento vegetal.

A mineração de carvão a céu aberto movimentava também um volume grande de estéril. No caso da Mina de Moatize, o estéril é composto por quartzitos, argilitos, siltitos e doleritos com uma composição inerte ou alcalina. O processo de escavação expõe grandes fragmentos de rochas, da ordem de centenas de centímetros. Assim, os rejeitos grossos, com uma granulometria de até 80 mm, podem ajudar em operações de nivelamento e os rejeitos finos convertidos em substrato para crescimento vegetal, preparando o local para receber solo fértil, ou, com o uso de aditivos, o próprio rejeito ser preparado para o crescimento vegetal. A intenção seria tornar o solo aproveitável para atividades agropecuárias ou suscitar o processo de sucessão ecológica para restaurar o bioma original.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados desta pesquisa pode-se concluir que:

- O rejeito grosso apresentou um *top size* de 50 mm e um  $D_{50}$  de 25 mm enquanto o rejeito fino um *top size* de 1 mm e um  $D_{50}$  de 0,5 mm. Em termos de granulometria, os rejeitos são bastante parecidos nas diferentes subcamadas da Camada Chipanga.
- Através da análise de massa específica dos materiais e índices de vazios foi possível observar que é possível incorporar os finos nos rejeitos grossos de carvão com uma relação mássica grossos:finos de até 1 : 0,29.
- Não houve diferença significativa nos componentes cristalinos entre os diferentes níveis estudados da camada Chipanga. Os principais componentes cristalinos que compõem os rejeitos são quartzo, hematita, calcita e alumina.
- Os teores médios de enxofre total e pirítico determinados foram 0,9% e 0,4% (grossos) e 1,3% e 0,6% (finos), respectivamente. Os ensaios estáticos de contabilização de ácidos e bases indicaram que os valores do NNP para rejeitos grossos e finos foram de 9,5 kg  $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$  e 6,3 kg  $\text{CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$ , respectivamente.
- A análise do material pelo método EPA 3050 não demonstrou a presença de elementos tóxicos em concentrações ambientalmente nocivas.
- O ensaio cinético em células úmidas comprovou que o rejeito de carvão não é gerador de acidez. As amostras de água lixiviada ao longo das 20 semanas mantiveram um valor de pH entre 4 e 8 (grossos) e 6 e 8 (finos). O potencial redox variou entre +200mV e -50mV para os lixiviados, indicando um comportamento predominantemente oxidativo.
- O ensaio cinético em células úmidas demonstrou ainda que os elementos que apresentaram maior mobilidade geoquímica foram Ca, Mg, Na e S. Não houve uma liberação expressiva de metais tóxicos no processo de lixiviação em água.
- Os rejeitos de carvão da camada Chipanga da Mina de Moatize, tanto grossos como finos, apresentam, no balanço ácido-base e nos ensaios em células úmidas, um comportamento levemente alcalino, o que é explicado pela baixa concentração de pirita e a presença de carbonatos. Os resultados dos estudos estáticos e cinéticos mostraram que o material possui tendência à formação de um lixiviado neutro a levemente alcalino. Assim, não é esperado

que haja, em curto prazo, uma geração de drenagem ácida nos rejeitos de carvão mineral das jazidas de Moatize.

- O material mostra-se adequado para reconfiguração do terreno, com risco pequeno de geração de drenagem ácida de mina.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da emissão de  $CO_2$ ,  $CH_4$  e  $NO_x$  a partir dos rejeitos.
- Avaliação da possibilidade de utilizar o rejeito fino para preenchimento dos vazios provocados pela disposição dos rejeitos grossos na cava, buscando diminuir o volume das bacias de rejeitos que seriam necessárias ao longo da vida útil da mina.
- Realização de ensaio em células úmidas utilizando amostras mistas de rejeitos grossos e finos, para fim de analisar a evolução da drenagem ácida no caso dos rejeitos finos retornarem para a cava juntamente com os rejeitos grossos.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, R., MARQUES, J., FERRARA, M. A evolução geológica de Moçambique, Ministério da Ciência e da Tecnologia. Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisboa, 1998.
- AGUIAR, D. C., BALESTIERI, J. A. P. Carvão Mineral: um estudo sobre o consumo nacional e respectivas emissões de  $CO_2$ . XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Brasil, 2007.
- AKCIL, A., KOLDAS, S. Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, p. 1139-1145, 2006.
- ALEXANDRE, N. Z., KREBS, A. S. J. Qualidade das águas superficiais do município de Criciúma, SC. CPRM, vol. 1, p. 73. Porto Alegre, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. ASTM D 5744: Standard Test Method for accelerated weathering of solid materials using a modified humidity cell. USA, 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. ASTM D3175: Standard Test Method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke. USA, p. 6, 2011a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. ASTM D3173: Standard Test Method for forms of moisture in the analysis sample of coal and coke. USA, p. 4, 2011b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. ASTM D3174: Standard Test Method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. USA, p. 6, 2012.
- ANAWAR, H.M. Sustainable rehabilitation of mining waste and acid mine drainage using geochemistry, mine type, mineralogy, texture, ore extraction and climate knowledge. *Journal Environmental Management*, p. 111–121, 2015. Doi: <10.1016/j.jenvman.2015.04.045>
- ARMSTEAD, M. Y.; YEAGER, J.L.; EMERSON, L. Benthic Macroinvertebrate Studies Conducted in Mountaintop Mining / Valley Fill Influenced Streams in Conjunction with the Environmental Impact Study – USEPA. 2004. in: ASMR. National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and the 25th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force. USA, p. 87–93, 2004.
- BABBITT, C. W.; LINDNER, A. S. A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida. *Journal of Cleaner Production*, p. 903 – 912, 2005.
- BAKER, B.J., BANFIELD, J.F. Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology*. vol. 44, p. 139–152, 2003. Doi: <10.1016/S0168-6496(03)00028-X>.
- BALISTRERI, L.S., SEAL, R.R., PIATAK, N.M., PAUL, B. Assessing the concentration, speciation, and toxicity of dissolved metals during mixing of acid-mine drainage and ambient river water downstream of the Elizabeth Copper Mine. USA, vol. 22, p. 930–952, 2007. Doi: <10.1016/j.apgeochem.2007.02.005>

BIAN, Z.; INYANG, H. I.; DANIELS, J. L.; OTTO, F.; STRUTHERS, S. Environmental issues from coal mining and their solutions. *Mining Science Technology*, p. 215-223, 2010.

BOLAN, N.S., KIRKHAM, M.B., OK, Y.S. Spoil to Soil: mine site rehabilitation and revegetation. USA, p.392, 2017. ISBN-13: 9781498767613.

BOUZHAH, H., BANZAAZOUA, M., BUSSIÈRE, B., PLANTE, B. ASTM: normalized humidity cell kinetic test: protocol improvements for optimal sulfide tailings reactivity. *Mine Water and the Environment*, vol. 34, p. 242-257, 2015.

BRADHAM, W. S.; CARUCCIO, F. T. A comparative study of tailings analysis using acid/base accounting, cells, columns and Soxhlet. USA, 1990. In: MINING AND RECLAMATION CONFERENCE AND EXHIBITION. Anais... Charleston: West Virginia University Publication Services. USA, vol. 1, p. 19-26, 1990.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009.

BREGER, I. Geochemistry of coal. *Encontro de Geologia*. Brasil, p. 823-841, 1958.

BROADHURST, J.L. Generalised strategy for predicting environmental characteristics of solid mineral wastes – a focus on copper. Tese de Doutorado - Universidade da Cidade do Cabo. África do Sul, p. 256, 2007.

BURMISTRZ, P.; CHMIELNIAK, T.; CZEPIRSKI, L.; GAZDA-GRZYWACZ, M. Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification. *Journal of Cleaner Production*, vol. 139, p.858-865, 2016.

BUGGEY, L.; ATKIN, B.P.; CLOKE, M.; MILES, N. J. The analysis of trace elements in coal, 1995. In: PAJARES, J. A.; TASCÓN, J.M.D. (eds). *Internacional Conferencial on Coal Science, Spain. Proceedings...* Amsterdam: Elsevier, p.151-153, 1995.

CARUCCIO, F. T.; BRADHAM, W.; GEIDEL, G. Overburden analyses: some important factors. In: SURFACE MINE DRAINAGE TASK FORCE SYMPOSIUM. USA, 1993. Anais... Morgantown: Department of Geological Sciences. University of South Carolina, 1993.

CARVALHO, L. Formações vulcânicas de Carinde, (Tete-Moçambique). Tese de doutorado, Instituto Superior Técnico, 1977.

CHUGH, Y.P., BEHUM, P.T. Coal waste management practices in the USA: an overview. *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 1, p. 163-176, 2014. Doi: <10.1007/s40789-014-0023-4>.

DO AMARAL FILHO, J.R., WEILER, J., BROADHURST, J.L., SCHNEIDER, I.A.H. The use of static and humidity cell tests to assess the effectiveness of coal waste desulfurization on acid rock drainage risk. *Mine Water and the Environment*, vol. 36, p. 1-7, 2017. Doi: <10.1007/s10230-017-0435-7>.

EDRAKI, M., BAUMGARTL, T., MANLAPIG, E., BRADSHAW, D., FRANKS, D.M., MORAN, C.J. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, vol. 84, p. 411-420, 2014.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. EPA 530-R-94-036: Acid Mine Drainage Prediction. Technical Document, 1994

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. EPA 3050. SW-846. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils, Washington, 1996.

ERGULER, Z.; KALYONCU, E.G. The effect of particle size on acid mine drainage generation: kinetic column tests. *Minerals Engineering*, vol. 76, p.154-176, 2015.

EVANGELOU, V.P. Pyrite oxidation and its control: solution chemistry, surface chemistry, acid mine drainage (AMD), molecular oxidation mechanisms, microbial role, kinetics, control, ameliorates and limitations, microencapsulation. Boca Raton, p. 293, 1995.

EVANGELOU, V. P.; ZHANG, Y. L. A review: pyrite oxidation mechanism and acid mine drainage prevention. *Critical Reviews In Environmental Science And Technology*, vol. 25, p.141-199, 1995.

FERNANDES, P. Evolução da matéria orgânica: do original aos carvões e petróleo. V Encontro de Professores de Geociências do Algarve - Universidade do Algarve. Portugal, 2004.

FIRPO, B. A., AMARAL FILHO, J.R., SCHNEIDER, I.A.H. A brief procedure to fabricate soils from coal mine wastes based on mineral processing, agricultural, and environmental concepts. *Minerals Engineering*, vol. 76, p. 81-86, 2015.

FRANKS, D.M., BOGER, D.V., CÔTE, C.M., MULLIGAN, D.R. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*, vol. 36, p. 114-122, 2012. Doi: <10.1016/j.resourpol.2010.12.001>.

GARCIA, C. et al. Factors affecting the transformation of a scale-up column tests. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 118, p. 35-43, 2005.

GARCÍA GIMÉNEZ, R., VIGIL DE LA VILLA, R., FRÍAS, M. From coal-mining waste to construction material: a study of its mineral phases. *Environmental Earth Science*, vol. 75, p. 478, 2016. Doi: <10.1007/s12665-016-5494-8>.

HAMMARSTROM, J.M., SEAL, R.R., MEIER, A.L., KORNFELD, J.M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology*, vol. 215, p. 407–431, 2005. Doi: <10.1016/j.chemgeo.2004.06.053>.

HE Z., SHENTU J., YANG X., BALIGAR V.C., ZHANG T., STOFFELLA P.J. Heavy metal contamination of soils: sources, indicators, and assessment. *Journal of Environmental Indicators*, vol. 9, p. 17-18, 2015.

HESAMI, S., MODARRES, A., SOLTANINEJAD, M., MADANI, H. Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Construction and Building Materials*, vol. 111, p. 625–636, 2016.

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*, vol. 104, p. 459-464, 2010.

Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM. Gestão para a sustentabilidade na mineração – 20 anos de história. Brasil, p. 70, 2013.

International Organization for Standardization – ISO. ISO 157 Hard coal: determination of forms of sulfur. Genebra, 1996.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY – JICA. Estudo de viabilidade da recuperação das áreas mineradas na região sul de Santa Catarina. Mitsubishi Materials Corporation, Chiyoda-Dames & Moore Co. Ltd. Brasil, 1998.

JESUS, R.M.; ROLIM, S.G. Experiências relevantes na restauração da mata atlântica. Brasil, 2003. In: EMBRAPA. Seminário Restauração Florestal: Fundamentos e Estudos de Casos. Curitiba, p. 13-31, 2003.

JORNAL NOTÍCIAS. Moçambique, África do Sul, ed. 14 nov. 2008. Em: JOSÉ, D. S., SAMPAIO, C. H. Estudo da arte da mineração em Moçambique: Caso carvão de Moatize, Tete. Universidade Federal do rio Grande do Sul, Brasil, s/ ano. Disponível em: [http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es\\_A7\\_A8\\_A9/A9\\_ARTIGO\\_03.pdf](http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_A7_A8_A9/A9_ARTIGO_03.pdf).

KARGBO, D.M., HE, J. A simple accelerated rock weathering method to predict acid generation kinetics. *Environmental Geology*. USA, vol. 46, p. 775-783, 2004.

KEFENI, K.K., MSAGATI, T.A.M., MAMBA, B.B. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 151, p. 475–493, 2017.

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

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

KOPEZINSKI, I. Mineração x Meio ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores. Porto Alegre: Editora da Universidade, 2000.

KOSSOFF, D.D., PORTER, W.E., EDWARDS, S.J., MACKLIN, M.G., HUDSON EDWARDS, K.A. Mine Tailings Dams: Characteristics, Failure, Environmental Impacts, and Remediation, *Applied Geochemistry* V.51, p. 229-245, 2014.

LAPAKKO, K.A., TRUJILLO, E. Pyrite oxidation rates from laboratory tests on waste rock. Proc, 10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA, Annual Conference, Chile, 2015.

LAPAKKO, K.A., WHITE, W. Modification of the ASTM 5744-96 kinetic test, 2000. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, vol. 1, p.631-639, 2000.

LENGKE, M.F., DAVIS, A., BUCKNAM, C. Improving management of potentially acid generating waste rock. Mine Water and the Environment, vol. 29, p. 29-44, 2010.

LORENZ, U.; GRUDZINSKI, Z. Hard coal for energetic purposes: price-quality relationships; international coal Market observations and Polish practice. Applied Energy, vol. 74, p. 271-279, 2003.

MACHADO, L. A. Controle da geração da drenagem ácida da mineração de carvão pelo método de aditivos alcalinos com escória de aciaria elétrica. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, p. 25, 2013.

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, vol. 17, p. 1414-1425, 2009.

MENEZES, J.C.C.C, COLLING, A.V., SILVA, R.A.S., SCHNEIDER, I.A.H. Effect of pyrite concentration on the quality of ferric sulfate coagulants obtained by leaching from coal tailings. Minerals & Metallurgical Processing, vol. 33, p. 77-81, 2016.

MICOA (Ministério para Coordenação Acção Ambiental). Plano de acção nacional de combate à seca e à desertificação. República de Moçambique, 2002.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Balanço mineral brasileiro. Brasil, 2001.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Estatísticas e Economia Mineral. Brasil, 2001.

MONTEIRO, K. V. Carvão: o combustível de ontem. Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra Brasil, 2004.

MOSLEY, L.M., DALY, R., PALMER, D., YEATES, P., DALLIMORE, C., BISWAS, T., SIMPSON, S.L. Predictive modelling of pH and dissolved metal concentrations and speciation following mixing of acid drainage with river water. Applied Geochemistry, vol. 59, p. 1–10, 2015. Doi: <10.1016/j.apgeochem.2015.03.006>.

NICHOLLS, B. D. The Geochemistry of coal bearing strata. In: MURCHISON, D.; WESTON, T. S. (eds). Coal and Coal Bearing Strata. Oliver and Boyd, Scotland, p. 269-307, 1968.

NIETO, J.M., SARMIENTO, A.M., OLÍAS, M., CANOVAS, C.R., RIBA, I., KALMAN, J., DELVALLS, T.A. Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva Estuary. *Environment International*, vol. 33, p. 445–455, 2007. Doi: <10.1016/j.envint.2006.11.010>.

PIRES, M.; TEIXEIRA, E.C. Geochemical distribution of trace elements in Leao. *Fuel*, vol. 71, p. 1093-1096, 1992.

PONDJA JR., E.A., PERSSON, K.M., MATSINHE, N.P. Assessment of coal mine water in Moatize by static and leaching tests. *Sustainable Water Resource Management*, vol. 3, p.403-412, 2017.

REDDICK, J.F., BLOTTNITZ, H.V., KOTHUIS, B. Cleaner production in the South African coal mining and processing industry: a case study investigation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 28, p. 224-236, 2008.

RESTREPO, A.; BAZZO, E.; MIYAKE, R. A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation. *Journal of Cleaner Production*, vol. 92, p. 179-186, 2015.

Santos, C.R.; Tubino, R.M.C; Schneider, I.A.H. Mineral processing and characterization of coal waste to be used as fine aggregates for concrete paving blocks. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 8, 2015.

SANTOS, R. Reabilitação de ecossistemas degradados pela mineração de carvão a céu aberto em Santa Catarina. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil, 2003.

SAPSFORD, D.J., BOWEL, R.J., DEY, M., WILLIAMS, K.P. Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage. *Minerals Engineering*, vol. 22, p. 25-36, 2009.

SASAKI, K. et al. The role of sulfur-oxidizing bacteria *Thiobacillus thiooxidans* in pyrite weathering. *Colloids And Surfaces: A Physicochemical and Engineering Aspects*, vol.133, p. 269-278, 1998.

SIMATE, G.S., NDLOVU, S. Acid mine drainage: challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, p. 1785-1803, 2014.

SCHUMANN, W. Rochas e Minerais. Editora: Ao Livro Técnico S/A, Rio de Janeiro, 1985.

SPOSITO, G. The chemistry of soil. Oxford University Press, USA, ed. 2, p. 329, 2008.

TAHA, Y., BENZAAZOUA, M., HAKKOU, R., MANSORI., M. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly brick production. In *Minerals Engineering*, vol. 107, p. 123-138, 2017.

TORREY, S. Trace contaminants from coal. Park Ridge, Napes. Data Corporation, 1978.

TUCKER, M. E. Sedimentary petrology: a introduction to the origin of sedimentar rocks. Oxford: Brackwell Scientific Publications, 1991.

VASCONCELOS, L., ACHIMO, M. O carvão de Moçambique. Ciências geológicas – Ensino e Investigação da sua História, 2010. In: COTELO NEIVA, J.M., RIBEIRO, A., MENDES VICTOR, L., NORONHA, F., RAMALHO, M.M. Geologia das ex-colônias de África. Moçambique, Lisboa, vol. 3, p. 191-206.

WANG, C., HARBOTTLE, D. Current state of fine mineral tailings treatment: a critical review on theory and practice. In Minerals Engineering, vol. 58, p. 113–131, 2014.

WANG, S., LUO, K., WANG, X., SUN, Y. Estimate of sulfur, arsenic, mercury, fluorine emissions due to spontaneous combustion of coal gangue: an important part of Chinese emission inventories. Environmental Pollution, vol. 209, p. 107–113, 2016. Doi: <10.1016/j.envpol.2015.11.026>.

WEILER, J., FIRPO, B.A., SCHNEIDER, I.A.H. Coal waste derived soil-like substrate: an opportunity for coal waste in a sustainable mineral scenario. Journal of Cleaner Production, v. 174, p. 739-745, 2018.

WIJESEKARA, H., BOLAN, N.S., VITHANAGE, M., XU, Y., MANDAL, S., BROWN, S.L., HETTIARACHCHI G.M. Utilization of biowaste for mine spoil rehabilitation. Advances in Agronomy, vol. 138, p. 97–173, 2016.

WU, Z.H., HU, Y.J., LEE, D.J., MUJUMDAR, A.S., LI, Z.Y.. Dewatering and drying in mineral processing industry: potential for innovation. Drying Technology, vol. 28, n.7, p.834–842, 2010.

YANG, C., LU, G., CHEN, M., XIE, Y., GUO, C., REINFELDER, J., YI, X., WANG, H., DANG, Z. Spatial and temporal distributions of sulfur species in paddy soils affected by acid mine drainage in Dabaoshan sulfide mining area. South China. Geoderma, p. 21–29, 2016. Doi:<10.1016/j.geoderma.2016.06.032>.

ZHANG, J.X., ZHANG, Q., SPEARING, A.J.S., MIAO, X.X., GUO, S., SUN, Q. Green coal mining technique integrating mining-dressing-gas draining-backfilling-mining. International Journal of Mining Science and Technology, vol. 27, p. 17–27, 2017.

ZHU, S., CHERNI, J.A. Coal mining in China: policy and environment under market reform. International Journal of Energy Sector Management, vol. 3, p. 9-28, 2009. Doi: <10.1108/17506220910947827>.

## ANEXOS

Anexo A. Listagem dos tambores de carvão provenientes da Mina Moatize.

<b>UCT - ± 200 kg /cada</b>					
Alimentação	3	17	18	19	20
Coqueificável	26	27			
Térmico	32	33			
Rejeito Fino	48				
Rejeito Grosso	42	44			

<b>UCB - ± 150 kg /cada</b>					
Alimentação	6	9	15	16	
Coqueificável	23	24	25		
Térmico	36				
Rejeito Fino	49				
Rejeito Grosso	38	39			

<b>MLCU - ± 200 kg /cada</b>					
Alimentação	5	7	8	12	14
Coqueificável	21	22			
Térmico	34	35			
Rejeito Fino	37	46			
Rejeito Grosso	41				

<b>LC 456 ± 500 kg /cada</b>					
Alimentação	1	4	10	11	
Coqueificável	28	29			
Térmico	30				
Rejeito Fino	50				
Rejeito Grosso	43				

Anexo B. Fluxograma da Planta de Beneficiamento.

