

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COBERTURAS SECAS SOBRE REJEITO  
DE OURO VISANDO A PREVENÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA

TÂNIA SENRA PRADO

ORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO

CO-ORIENTADORA: MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-336/2019

BRASÍLIA/DF, 31 de Outubro de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COBERTURAS SECAS SOBRE REJEITO  
DE OURO VISANDO A PREVENÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA

TÂNIA SENRA PRADO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

---

LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc. (UnB)  
(ORIENTADOR)

---

MARIA DAS GRAÇAS GARDONI, DSc. (UFMG)  
(CO-ORIENTADORA)

---

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

GUSTAVO FERREIRA SIMÕES, PhD (UFMG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 31 de Outubro de 2019

---

## FICHA CATALOGRÁFICA

PRADO, TÂNIA SENRA

Avaliação da Eficiência de Coberturas Secas Sobre Rejeito de Ouro Visando a Prevenção da Drenagem Ácida [Distrito Federal] 2019.

Xii, 82 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2019)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- |                         |                     |
|-------------------------|---------------------|
| 1. Barragens de Rejeito | 2. Drenagem Ácida   |
| 3. Cobertura Seca       | 4. Prevenção de DAM |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PRADO, T.S (2019). Avaliação da Eficiência de Coberturas Secas Sobre Rejeito de Ouro Visando a Prevenção da Drenagem Ácida. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-336/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Tânia Senra Prado

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação da Eficiência de Coberturas Secas Sobre Rejeito de Ouro Visando a Prevenção da Drenagem Ácida

GRAU / ANO: Mestre / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Tânia Senra Prado

Rua das Videiras 205, Vila Clóris

31.744-086 – Belo Horizonte/Minas Gerais – Brasil

tania\_senra@hotmail.com

Dedico este trabalho a todos que  
estiveram comigo nessa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por me dar força e coragem para seguir em frente nos momentos de mais dor e vontade de desistir.

Aos meus pais, Kay e Albino, e minhas irmãs, Isadora e Marina, pelo apoio, paciência e carinho. Sem vocês esse resultado seria impossível.

Ao meu namorado, Fabiano, por me ajudar a construir o equipamento utilizado na pesquisa e principalmente pelo companheirismo e compreensão em todos os momentos.

Ao Prof. Luís Fernando, pela orientação, confiança e amizade. Muito obrigada pela força e atenção que você teve comigo durante esse trabalho.

À Profa. Gardoni, pela orientação e amizade, lá se vão 10 anos desde a iniciação científica e agora o mestrado. E que venham mais 10.

Aos amigos que sempre me apoiam em tudo, Rodrigo, Lais, Nathália, Sheila e Viviane.

Aos amigos do mestrado que agora serão para a vida, Silvana, Leila, Fernando, Mariana, Thame, Fernanda, Allan e Wesley.

Aos amigos que fiz em Brasília, Dona Ione, Sílvia, Flávio e Élcio.

Aos professores e secretárias do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, ao Prof. Toninho e Técnico Marcos do LABGEO-UFMG, e a Técnica Hellen do DEMET-UFMG.

À Dra. Cláudia Caldeira por toda a paciência, explicações e apoio durante a execução dos ensaios.

À banca pelas contribuições ao meu trabalho.

À CAPES pela bolsa de estudos.

## **RESUMO – AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COBERTURAS SECAS SOBRE REJEITO DE OURO VISANDO A PREVENÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA**

Um dos impactos ambientais decorrentes das atividades de mineração é a drenagem ácida de mina (DAM). A DAM é um fenômeno que se inicia quando minerais sulfetados presentes no estéril e rejeito de mineração oxidam-se por reação com água e oxigênio atmosféricos. Esta solução age como agente lixiviante dos minerais presentes produzindo um percolado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico. A DAM pode ocorrer quando o mineral ou metal de interesse encontra-se associado a sulfetos. Sua ocorrência tem sido relatada na extração de ouro, carvão, cobre, zinco ou urânio. Atualmente, os trabalhos que abordam a DAM tem se concentrado na descrição do problema, na avaliação do potencial de geração de drenagem ácida e na obtenção de novas tecnologias de tratamento. Deste modo, o objetivo desse trabalho é avaliar qualitativamente a eficiência do emprego de duas coberturas seca, composta por estéril e cal virgem, sendo uma com 2% de cal e outra com 4%, sobre o rejeito de mineração de ouro visando à mitigação da geração de drenagem ácida de mina. Para isso foram realizados ensaios cinéticos do tipo coluna de lixiviação para determinação de alguns parâmetros do lixiviado, tais como pH, condutividade elétrica, alcalinidade total, acidez total e concentração de alguns metais. Os resultados dos ensaios obtidos mostram que a amostra de rejeito não tem potencial de geração de drenagem ácida, mas foi possível verificar a influência da porcentagem de cal nas coberturas empregadas e na proporção entre camada de cobertura e camada de rejeito.

## **ABSTRACT – EVALUATION THE EFFICIENCY OF DRY COVER SYSTEMS OVER GOLD MINE TAILINGS TO MITIGATION ACID MINE DRAINAGE**

Acid mine drainage (AMD) is an important impact caused by mining activities. The AMD phenomenon begins when sulphide minerals present in tailings and waste rocks oxidize by reaction with atmospheric water and oxygen. This reaction forms a solution that acts as a leaching agent for the present minerals and produces a percolate rich in dissolved metals and sulfuric acid. AMD can occur when the mineral or metal of interest is associated with sulfides. Its occurrence has been reported in the extraction of gold, coal, copper, zinc or uranium. Currently, studies addressing AMD have focused on describing the problem, assessing the potential for acid drainage generation and obtaining new treatment technologies. Thus, the objective of this work is to qualitatively evaluate the efficiency of the use of two types of dry coverage over gold mine tailings: the first coverage is a mixture of waste rock and 2% of virgin lime; the second one is a mixture of waste rock and 4%. The tests were conducted aiming at the mitigation of acid mine drainage generation. For this purpose, kinetic tests as leaching column experiments were performed to determine some leachate parameters, such as pH, electrical conductivity (EC), total alkalinity, total acidity and the concentration of some metals. The obtained results have shown that the tailing samples tested in this research have no potential to generate acid drainage. Also, it was possible to verify the influence of lime percentage on the employed coverages and the ration between the layers of coverage and tailings.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.....	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO .....	3
1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO .....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM) .....	5
2.1.1 MINERAIS ASSOCIADOS À DRENAGEM ÁCIDA.....	7
2.1.2 REAÇÕES DE PRODUÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA POR OXIDAÇÃO DE SULFETOS .....	7
2.1.3 REAÇÕES DE NEUTRALIZAÇÃO .....	8
2.2 MÉTODOS DE CONTROLE E TRATAMENTO DA DAM .....	10
2.2.1 MÉTODOS ESTÁTICOS .....	12
2.2.2 MÉTODOS CINÉTICOS .....	14
2.3 MÉTODOS DE PREVENÇÃO DA DAM.....	16
2.3.1 COBERTURAS ÚMIDAS.....	17
2.3.2 COBERTURAS SECAS.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
3.1 MATERIAIS.....	20
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	20
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	21
3.3.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA .....	21
3.3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	21
3.3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....	23
3.4 PREPARAÇÃO DAS COBERTURAS SECAS .....	26
3.5 EQUIPAMENTO.....	27

3.6	MONTAGEM DAS COLUNAS DE LIXIVIAÇÃO.....	31
3.7	ENSAIO DE COLUNA DE LIXIVIAÇÃO.....	32
3.8	ANÁLISES DA SOLUÇÃO LIXIVIADA .....	37
3.8.1	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS .....	37
3.8.2	ANÁLISES QUÍMICAS .....	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	CHARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	39
4.2	CHARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	41
4.3	CHARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....	42
4.3.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	42
4.3.2	DETERMINAÇÃO DO MÉTODO ESTÁTICO .....	43
4.4	COLUNA DE LIXIVIAÇÃO – ANÁLISE DO LIXIVIADO.....	44
4.4.1	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO LIXIVIADO.....	46
4.4.2	PARÂMETROS QUÍMICOS DO LIXIVIADO.....	55
4.4.3	CONCENTRAÇÃO DE METAIS.....	60
5.	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Classificação do teste de Fizz (modificado Farfán <i>et al</i> , 2004) .....	24
Tabela 3-2 – Volume de HCL 1,0 N adicionado no MABA em função do teste de Fizz .....	24
Tabela 3-3 – Exigências químicas e físicas da cal virgem (modificado ABNT, 2003) .....	26
Tabela 3-4 – Identificação e Composição das Colunas de Lixiviação .....	31
Tabela 4-1 – Classificação granulométrica do rejeito e estéril conforme ABNT (NBR 7.181/2016).....	42
Tabela 4-2 – Caracterização química das amostras de rejeito e estéril .....	42
Tabela 4-3 – Resultado do balanço ácido base modificado (MABA) .....	43
Tabela 4-4 – Características das colunas de lixiviação – Massa de materiais nas colunas .....	45
Tabela 4-5 – Características das colunas de lixiviação – Altura de materiais, volume total percolado e massa específica .....	45
Tabela 4-6 – Padrão de Qualidade do Lixiviado .....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Formação da drenagem ácida de mina na pilha de estéril (Borma, 2006) .....	6
Figura 2-2 – Formação da drenagem ácida de mina na barragem de rejeito (Borma, 2006) .....	6
Figura 2-3 – Esquema dos métodos de controle e tratamento da DAM (Abreu, 2012).....	11
Figura 3-1 – Amostras de rejeito (a) e estéril (b) utilizadas nos ensaios de coluna de lixiviação.....	21
Figura 3-2 – Sistema de Classificação de Solos segundo NBR 7.181 (ABNT, 2016) .....	23
Figura 3-3 – Preparação da Cobertura 1 utilizada nos ensaios de coluna de lixiviação .....	27
Figura 3-4 – Equipamento construído para o realização dos ensaios de coluna de lixiviação .....	27
Figura 3-5 – Materiais de construção das colunas de lixiviação.....	28
Figura 3-6 – Esquema das colunas de lixiviação (dimensões em cm) .....	28
Figura 3-7 – Montagem do ensaio para a lavagem inicial (o sentido do fluxo está indicado na figura)	29
Figura 3-8 – Montagem do ensaio para o ciclo úmido (o sentido do fluxo está indicado na figura) .....	30
Figura 3-9 – Montagem do ensaio para o ciclo seco (o sentido do fluxo de ar está indicado na figura) .....	30
Figura 3-10 – Esquema das Colunas de Lixiviação.....	31
Figura 3-11 – Colunas de Lixiviação – Lavagem inicial – Colunas C1 a C10 .....	33
Figura 3-12 – Lavagem inicial – Coluna C1 (amostra de rejeito).....	33
Figura 3-13 – Lavagem inicial – Coluna C3 (amostra de estéril).....	34
Figura 3-14 – Colunas de Lixiviação – Ciclo seco – Colunas C1 a C10.....	34
Figura 3-15 – Ciclo seco – Colunas C1, C4 e C6 .....	35
Figura 3-16 – Colunas de Lixiviação – Ciclo úmido Colunas – C5 a C10 .....	36
Figura 3-17 – Ciclo úmido – Colunas C1 e C3.....	36
Figura 3-18 – Ciclo úmido – Coluna C10 .....	37
Figura 4-1 – Difratoograma de raios X das amostras de rejeito e estéril.....	39
Figura 4-2 – Difratoograma de raios X da amostra de rejeito .....	40
Figura 4-3 – Difratoograma de raios X da amostra de estéril .....	40
Figura 4-4 – Curva Granulométrica das amostras de rejeito e estéril .....	41
Figura 4-5 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C1, C2, C3 e C4 .....	47
Figura 4-6 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C3, C4, C5 e C6 .....	48
Figura 4-7 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C5, C7 e C8 .....	49
Figura 4-8 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C6, C9 e C10 .....	50
Figura 4-9 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C7, C8, C9 e C10.....	51
Figura 4-10 – Leituras de CE das soluções lixiviadas das colunas C1, C2, C3 e C4 .....	52
Figura 4-11 – Leituras de CE das soluções lixiviadas das colunas C3, C4, C5 e C6 .....	53
Figura 4-12 – Leituras de CE das soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C5, C7 e C8.....	53
Figura 4-13 – Leituras de CE das soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C6, C9 e C10.....	54
Figura 4-14 – Evolução da concentração de sulfato para as colunas C1, C3 e C4 .....	55
Figura 4-15 – Evolução da concentração de sulfato para as colunas C3, C4, C5 e C6.....	56
Figura 4-16 – Evolução da concentração de sulfato para as colunas C1, C4, C5, C7 e C8 .....	57

Figura 4-17 – Evolução da concentração de sulfato para as colunas C1, C4, C6, C9 e C10 .....	57
Figura 4-18 – Leituras da acidez dos lixiviados das colunas .....	58
Figura 4-19 – Leituras da alcalinidade total dos lixiviados das colunas .....	59
Figura 4-20 – Variação das concentrações de cálcio nas colunas .....	61
Figura 4-21 – Variação das concentrações de enxofre nas colunas .....	62
Figura 4-22 – Variação das concentrações de ferro nas colunas .....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

DAM – Drenagem Ácida de Mina

USEPA – *United State Environmental Protection Agency*

INAP - *International Network for Acid Prevention*

MABA – Balanço Ácido Base Modificado

NAG – *Net Acid Generation* ou Geração Ácida Líquida

PA – Potencial de Geração de Ácido

PN – Potencial de Neutralização

GCL – *Geo Clay Liner* – Geocomposto bentonítico

ICP-OES – *Inductivity Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*

ADTI – *Acid Drainage Technology Initiative*

PVC – Policloreto de vinila

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

# 1. INTRODUÇÃO

O equilíbrio entre os benefícios e os custos ambientais associados à atividade mineradora é um dos desafios a serem solucionados. Fazem parte dessa solução a incorporação dos princípios do desenvolvimento sustentável nas fases de projeto, instalação, operação e descomissionamento desses empreendimentos. Dentre estes princípios, devem ser privilegiados métodos de produção mais limpa, de minimização do consumo de materiais, energia e geração de efluentes, além da maximização de benefícios sociais.

Entre os passivos críticos advindos da mineração, tem-se a geração das águas ácidas, que pode ocorrer nos taludes em rocha das cavas de mina à céu aberto, nos depósitos de rejeitos e nas pilhas de estéril. As águas ácidas podem impactar os recursos hídricos nas proximidades na qual ocorre a atividade mineradora assim como em áreas mais afastadas da mina, podem acarretar na degradação química desses ambientes aquáticos em decorrência da alteração do pH e do aumento da concentração de sólidos dissolvidos e/ou em suspensão (Jarvis e Younger, 2000).

A geração de drenagem ácida ocorre quando a rocha ou resíduo de mineração (rejeito ou estéril) contendo minerais sulfetados são oxidados na presença de água. Quando ocorre na rocha exposta ao ambiente é chamada de drenagem ácida de rochas (DAR), pode ocorrer, por exemplo, nos taludes expostos das cavas de mina a céu aberto, em galerias subterrâneas e em túneis escavados em rocha. A drenagem ácida de mina (DAM) é a solução aquosa ácida gerada quando minerais sulfetados presentes em resíduos de mineração, tanto o rejeito quanto os estéreis, são oxidados em presença de água. Esta solução age como agente lixiviante dos minerais presentes nos resíduos produzindo um percolado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico (Menezes et al., 2004).

A DAM pode ocorrer quando o mineral ou metal de interesse encontra-se associado a sulfetos. Sua ocorrência foi observada na extração de ouro, carvão, cobre, zinco e urânio. Exemplos deste tipo de contaminação são comumente encontrados no Brasil, como o minério de urânio do complexo mineiro-industrial das Indústrias Nucleares do Brasil – INB, o minério das minas de carvão da região de Criciúma,

sudeste do Estado de Santa Catarina, e da região de Candiota, sul do Estado do Rio Grande do Sul (Menezes et al., 2004; Soares *et al.*, 2005).

A geração de drenagem ácida representa uma questão ambiental complexa em diversas minerações ao redor do mundo, em pais como Noruega, Finlândia, Alemanha, Suécia, Polônia e França (Wolkersdorfer e Boller, 2005 citado por Roeser, 2006) que vem desenvolvendo tecnologias para prevenção e mitigação desse problema.

Segundo a USEPA (1994), o potencial para uma mina produzir drenagem ácida e liberar contaminantes depende basicamente de três fatores:

- Disponibilidade de água, oxigênio, íons férricos e bactérias para catalisar as reações de oxidação;
- Capacidade de neutralização da produção de ácido;
- Hidrologia local, geologia e tipo de tecnologia minerária empregada.

A previsão, prevenção e o tratamento da DAM requer um sistema de gestão que estabeleça critérios para a escolha do local e forma de disposição dos rejeitos e estéril. Estes critérios são estabelecidos a partir de análise de fatores como o tipo de resíduo, suas características físicas, químicas e mineralógicas e seu potencial de geração de ácidos, além de aspectos específicos da área de disposição, tais como o clima, geologia, distância em relação aos cursos d'água e precipitação anual. A análise destes fatores condiciona a necessidade da implantação de obras de engenharia para redução de percolado e estruturas de retenção de contaminantes que visam a proteção dos recursos hídricos na área do empreendimento (Ritcey, 1994).

De acordo com a USEPA (1994), a previsão da geração de drenagem ácida deve ser feita para verificar se certo volume de resíduos de mina tem potencial para produzir ácido e prever a qualidade da drenagem baseada na taxa de geração de água ácida.

Como prevenção da geração de drenagem ácida, materiais de reação alcalina podem ser misturados ao material gerador de drenagem ácida para a neutralização da acidez. No Brasil, alguns estudos têm revelado a necessidade de doses elevadas de calcário para neutralizar a acidez em solos e em áreas afetadas por mineração. Outros materiais corretivos como óxido de cálcio, cal hidratada, soda cáustica,

carbonato de sódio e hidróxido de amônio têm sido utilizados para a neutralização de drenagem ácida (Mello *et. al*, 2014).

Alguns estudos relatam que na presença de bactérias ferro-oxidantes e sulfato-redutoras, presentes naturalmente em ambientes aquáticos e que se desenvolvem melhor em condições de pH entre 2,8 e 3,2, o processo de oxidação dos minerais sulfetados é acelerado a uma ordem de  $10^5$  quando comparado a um ambiente esterilizado (Moraes, 2010).

Os métodos analíticos que preveem a geração de drenagem ácida são classificados como estáticos ou cinéticos. Os métodos estáticos determinam o potencial de produção de acidez e o potencial de neutralização de acidez de uma amostra. Os métodos cinéticos simulam os processos encontrados nos locais da mina, normalmente a uma taxa acelerada. Eles requerem mais tempo e são considerados mais caros que os métodos estáticos (Moraes, 2010).

Diversas técnicas são sugeridas na literatura para tratamento de efluentes de DAM. A escolha do processo de tratamento de DAM deve ser simples e eficiente.

## **1.1 OBJETIVO**

Os objetivos desse trabalho constituem em avaliar qualitativamente a eficiência do emprego de uma camada seca alcalina (estéril + cal virgem) colocada sobre o rejeito de mineração de ouro visando à mitigação da geração de drenagem ácida de mina. Para isso foram realizados ensaios cinéticos do tipo coluna de lixiviação para determinação de alguns parâmetros do lixiviado obtido, tais como pH, CE, alcalinidade total, acidez total, e concentração de alguns metais. Os objetivos específicos incluem:

- Desenvolver um equipamento para realizar os ensaios de coluna de lixiviação;
- Calibrar o equipamento para realizar os ensaios de coluna de lixiviação;
- Definir uma metodologia para execução dos ensaios cinéticos;
- Caracterizar as amostras de rejeito e estéril;
- Efetuar análises no lixiviado (pH, CE, alcalinidade e acidez total, concentração de metais e sulfatos).

## **1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução do trabalho, sendo apresentado resumidamente o tema, assim como os objetivos a serem alcançados nesse trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre o tema de drenagem ácida em mina.

O terceiro capítulo aborda a metodologia e os materiais utilizados nos ensaios para obtenção da drenagem ácida de mina.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e as análises efetuadas.

O quinto capítulo apresenta a conclusão e sugestões para futuros trabalhos.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM)**

As atividades de mineração envolvem etapas de extração, processamento e beneficiamento, o que representa fontes de metais para o ambiente uma vez que cada uma dessas etapas está relacionada com a geração de resíduos. Os resíduos gerados podem ser classificados como estéril e rejeito. Os estéreis consistem em solos ou rochas de cobertura, camadas intermediárias ou circundantes ao mineral de interesse, que são extraídos por uso de explosivos ou por máquinas, como escavadeiras. Em geral são materiais de granulometria variada, com grande porcentagem de material grosseiro, e normalmente são dispostos sob a forma de pilhas de estéril. Os rejeitos são resultantes do processo de beneficiamento do minério e passam por diversos processos físicos e químicos antes de serem depositados. Devido ao processo de separação, os rejeitos são mais homogêneos em termos granulométricos (Blowes *et al.*, 2003).

Os rejeitos e estéreis depositados em barragens e pilhas, dependendo do tipo de rocha, podem conter elevadas concentrações de metais que são dispersas em solução e na forma de particulado.

As pilhas de estéril podem conter menor concentração de sulfetos devido à grande mistura com solos inertes. No entanto, algumas condições físicas da disposição desse material pode favorecer a geração de drenagem ácida, como baixo teor de umidade, heterogeneidade no tamanho das partículas e elevada porosidade, que podem permitir a entrada de água e oxigênio atmosférico, e favorecer a geração de acidez (Figura 2-1). Os rejeitos em geral apresentam maiores concentrações de sulfetos, porém quando dispostos em barragens de rejeitos encontram-se saturados, com nível d'água elevado (Figura 2-2) e baixa permeabilidade ao oxigênio, gerando acidez em taxas de reação mais lentas que nas pilhas de estéril. O período crítico de geração de drenagem ácida numa barragem de rejeitos ocorre após o seu descomissionamento, quando os rejeitos são drenados, permitindo a entrada de oxigênio (Borma, 2006).



Figura 2-1 – Formação da drenagem ácida de mina na pilha de estéril (Borma, 2006)

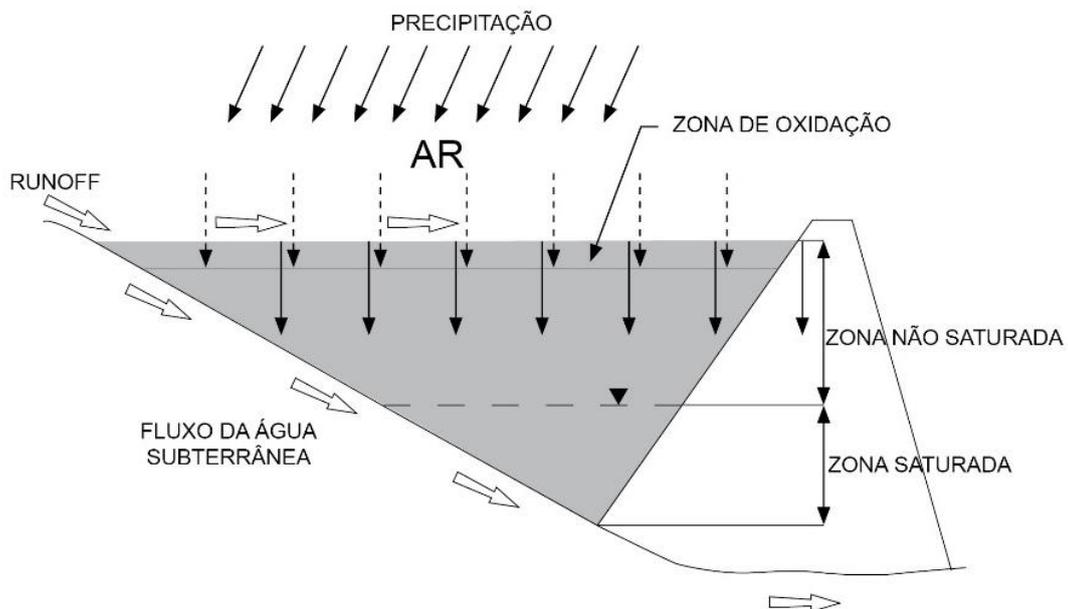


Figura 2-2 – Formação da drenagem ácida de mina na barragem de rejeito (Borma, 2006)

A DAM ocorre significativamente quando são satisfeitas as seguintes condições (Hutchinson e Ellison, 1992):

- O rejeito e/ou estéril contém sulfetos em quantidade suficiente para reagir química e biologicamente gerando ácido em volume e velocidade maior que aquela pela qual pode ser neutralizado pelos álcalis presentes no meio;
- As propriedades físicas dos resíduos são tais que permitem a infiltração de água e oxigênio em quantidade suficiente para promover a ocorrência de reações químicas e processos biológicos;
- Percolação da água de chuva através do rejeito e/ou estéril.

### **2.1.1 MINERAIS ASSOCIADOS À DRENAGEM ÁCIDA**

Os principais minerais sulfetados associados à geração de drenagem ácida de mina (DAM) são a pirita, marcassita e a pirrotita, porém outros minerais sulfetados são passíveis de sofrer oxidação e gerar drenagem ácida, tais como a calcopirita, calcocita, millerita, arsenopirita e cinábrio (USEPA, 1994).

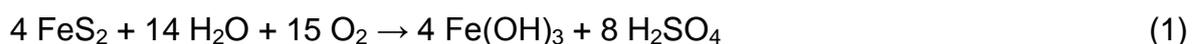
A pirita é o mineral mais importante associado à produção de drenagem ácida e está associada a depósitos de carvão e minérios metálicos incluindo zinco, cobre, urânio, ouro e prata (Farfan et al., 2004).

Dependendo do ambiente de formação a pirita pode variar significativamente sua morfologia e tamanho de grão. A pirita pode apresentar diferentes formas, tais como: grãos maciços euhedricos, framboidais e poliframboidais; e cristais octaédricos e piritoédricos. Quanto ao tamanho, foi relatada a existência de grãos variando de 5 µm a 400 µm. A forma de pirita mais reativa é a framboidal, devido a sua extensa área superficial e alta porosidade (Evangelou, 1995).

### **2.1.2 REAÇÕES DE PRODUÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA POR OXIDAÇÃO DE SULFETOS**

Os fatores que controlam a oxidação dos sulfetos incluem taxa de difusão de oxigênio, taxa de infiltração de água, pH, temperatura, presença de minerais alcalinos, tais como carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), carbonato de magnésio (MgCO<sub>3</sub>), carbonato de cálcio e magnésio (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) variabilidade vertical ou lateral da camada no estrato e a presença de bactérias ferro-oxidantes e sulfato-redutoras (Evangelou, 1995).

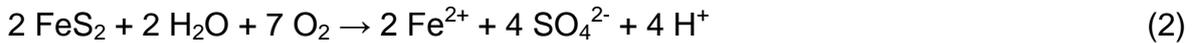
Utilizando como exemplo a pirita, o processo de geração de DAM pode ser representado de forma simplificada pela equação (USEPA, 1994):



O processo completo ocorre em vários estágios, alguns dos quais simultâneos, em função do tempo de exposição ao oxigênio atmosférico, dos processos microbiológicos e das condições predominantes no interior da pilha ou barragem de

rejeito. As reações químicas associadas a esses estágios são comumente representadas pelas seguintes equações:

- Oxidação da pirita pelo oxigênio atmosférico (oxidação direta), a velocidade dessa reação depende da superfície da pirita exposta ao oxigênio, da concentração de oxigênio no meio e da temperatura:



- Oxidação da pirita pelo íon férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) em solução (oxidação indireta), essa é uma reação rápida desde que exista  $\text{Fe}^{3+}$  em concentração suficiente para que ela ocorra (Singer e Stumm, 1970):



- Oxidação do íon ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) a íon férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ):



- Precipitação do hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ):



Segundo Apello e Postma (1994), a cinética da Eq.(4) depende do pH e da ação de bactérias em especial as *Thiobacillus Ferrooxidans*. Para valores de pH acima de 4,0, a velocidade de oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  aumenta rapidamente com o aumento do pH. Entretanto, nessas condições, o  $\text{Fe}^{3+}$  não estará disponível para oxidação da pirita, tendendo a precipitar como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , Eq.(5). Para valores de pH inferior a 4,5, a velocidade de oxidação do íon ferroso é mais lenta.

### 2.1.3 REAÇÕES DE NEUTRALIZAÇÃO

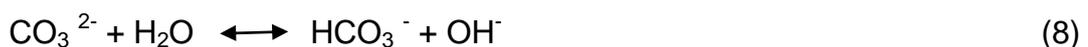
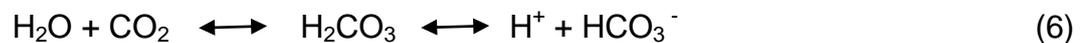
A acidez e alcalinidade da água são importantes parâmetros para a produção e controle da DAM. A alcalinidade pode ser definida como a capacidade da água em neutralizar ácidos, sendo uma relação direta, da presença ou ausência dos íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) na solução.

A principal fonte de espécies provenientes do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que são responsáveis pela alcalinidade natural da água está relacionada com a dissolução

do dióxido de carbono atmosférico. A alcalinidade também pode ser influenciada pela presença de boratos ( $\text{BO}_4^{2-}$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4^{2-}$ ) e silicatos ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ) (Hem, 1985).

A acidez, assim como a alcalinidade, pode ser definida como a medida da capacidade da água de neutralizar bases. Em águas naturais a principal fonte de acidez é o dióxido de carbono proveniente de trocas atmosféricas ou pela oxidação biológica da matéria orgânica. Porém outras fontes podem contribuir com a acidez, sobretudo de efluentes industriais e de ambientes que geram DAM, como os sais de metais, do tipo que hidrolisam como ferro e alumínio, e também liberam acidez. (Greenberg *et al.*, 1992).

A dissolução do dióxido de carbono em água resulta em um sistema de tampão de carbonatos. A química ácido-base dos sistemas aquáticos naturais é dominada pela interação do íon carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), uma base moderadamente forte, com o ácido carbônico, um ácido fraco ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Normalmente existe um equilíbrio entre o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o ácido carbônico aquoso ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). O ácido carbônico também se encontra em equilíbrio com o íon bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Apesar de quase insolúveis, as rochas calcárias ( $\text{CaCO}_3$ ) são fontes predominantes de íon carbonato. O íon carbonato dissolvido atua como base, produzindo na água íons bicarbonato e hidróxido ( $\text{OH}^-$ ). (Baird, 2002).



Em rejeitos e estéreis de mineração, a presença de minerais sulfetados está frequentemente associada à geração de ácido, sobretudo sulfetos de ferro. No entanto, na natureza existem minerais capazes de neutralizar essa acidez gerada, sendo os mais comuns os carbonatos, hidróxidos de alumínio, óxi-hidróxidos de ferro e aluminossilicatos. A matéria orgânica também tem a capacidade de retardar a acidez, pois além de competir com os sulfetos pelo consumo de oxigênio, ao se oxidar ela produz gás carbônico que expulsa o oxigênio dos poros do material sólido (Blowes *et al.* 2003, Trindade e Soares 2004).

Os principais minerais geradores de alcalinidade são calcita, dolomita e anquerita. Na dissolução desses minerais o pH da água se estabiliza próximo da neutralidade.

Em muitos lugares, a quantidade de minerais carbonatados em rejeitos de mineração excede a de sulfetos, e sua rápida dissolução é suficiente para manter o pH em condições neutras.

A dissolução de minerais secundários como hidróxidos também pode contribuir para a neutralização de ácidos. Dados experimentais em colunas de lixiviação revelaram que após o consumo de carbonatos, o pH da água diminui até 4,0 a 4,5, e coincide com o aumento da concentração de alumínio em solução, confirmando a dissolução de hidróxido de alumínio amorfo e/ou gibbsita  $[Al(OH)_3]$ . Após consumo desses hidróxidos o pH diminui novamente até uma faixa de 2,5 a 3,5, isso se deve a dissolução de minerais oxi-hidróxidos de ferro, normalmente ferrihidrita ( $9Fe_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) e goethita ( $\alpha-FeOOH$ ) (Blowes et al. 2003).

A dissolução de aluminossilicatos também consome  $H^+$  da solução. No entanto, geralmente não é rápida o suficiente para tamponar a água num pH específico. Os aluminossilicatos frequentemente associados a sulfetos metálicos são a clorita, esmectita, biotita, moscovita, plagioclásio, anfibólio e piroxênio (Blowes et al. 2003).

## **2.2 MÉTODOS DE CONTROLE E TRATAMENTO DA DAM**

Os métodos de controle e tratamento da DAM podem ser subdivididos em três vias de ação: previsão, prevenção e remediação. A previsão, também denominada de predição, é realizada a partir de trabalhos preliminares ao projeto de um empreendimento de mineração. Nesta etapa são utilizados diferentes métodos, no qual se procura avaliar a capacidade ou probabilidade de determinado material gerar ácido e bases sob determinada condição física e química. Os métodos de previsão podem ser desenvolvidos em laboratórios ou em campo. Normalmente os métodos de previsão estão associados a modelos geoquímicos (INAP, 2018).

Na prevenção da DAM tenta-se encontrar maneiras de prevenir a sua geração ou mesmo diminuir a quantidade gerada atuando no controle da oxidação de sulfetos pelo desenvolvimento de metodologias específicas para cada sítio. A prevenção pode ter caráter físico ou químico (Blowes et al., 2003).

Caso as técnicas preventivas não sejam totalmente viáveis ou efetivas, são adotadas tecnologias de remediação. A remediação de DAM pode ser feita através de tecnologias de contenção ou tratamento, que podem ser classificadas como

ativas ou passivas, de acordo com a existência ou não da necessidade de se introduzir energia no sistema para inicializar e continuar o processo. Pode ser classificada como remediação biótica ou abiótica dependendo da presença ou ausência de microrganismos no tratamento (Johnson e Hallberg, 2005).

A Figura 2-3 apresenta esquematicamente os métodos de controle e tratamento de DAM.

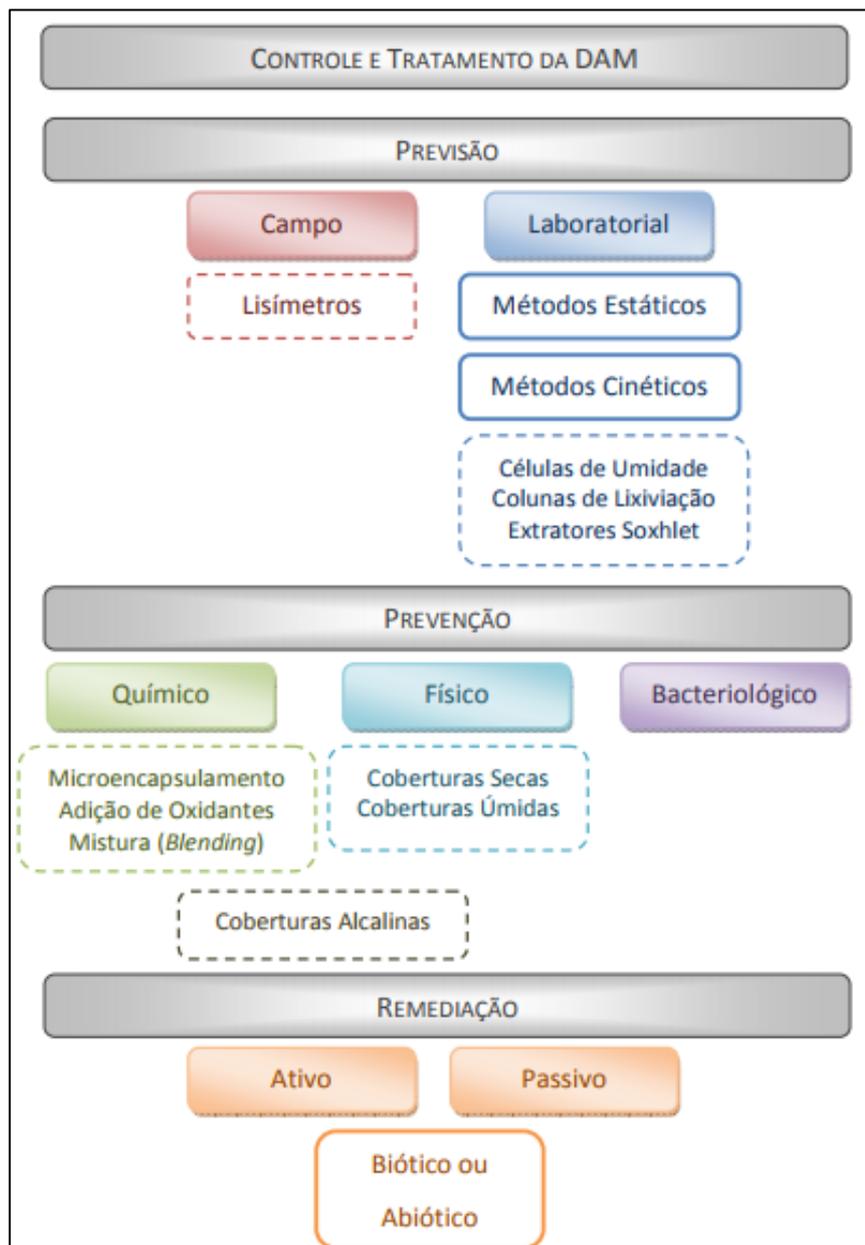


Figura 2-3 – Esquema dos métodos de controle e tratamento da DAM (Abreu, 2012)

Segundo Evangelou (1995), os diversos métodos que podem ser utilizados para a avaliação e previsão do potencial de geração de DAM podem ser classificados em: Métodos Estáticos, para determinar as propriedades geoquímicas (potencial para

gerar acidez e potencial de neutralização) do material; Métodos Cinéticos, para determinar o comportamento geoquímico do material no tempo e a determinação dos componentes solúveis.

Os Métodos Estáticos definem o balanço entre minerais potencialmente geradores de acidez e aqueles potencialmente consumidores de acidez de uma amostra. São métodos simples e de custos relativamente baixos. Entre os principais Métodos Estáticos tem-se: balanço ácido base - ABA (método Sobek); balanço ácido base (ABA) modificado; teste de pesquisa inicial British Columbia (B.C.); e produção de ácido apurado (Guevara, 2007).

Os Métodos Cinéticos têm como finalidade confirmar o potencial de geração de acidez e prever a qualidade da água de drenagem em longo prazo. A metodologia consiste em submeter amostras ao intemperismo sob condições controladas de laboratório, ou em condições similares às do local de disposição do rejeito e/ou estéril, com o objetivo de determinar as velocidades de geração de acidez, de oxidação de sulfetos e de neutralização. Existem diversos métodos cinéticos disponíveis, variando entre eles a complexidade, tempo de duração, custos e tipo dos resultados. Dentre os principais Métodos Cinéticos tem-se: confirmação de pesquisa B.C; células úmidas; colunas de lixiviação (Guevara, 2007).

### **2.2.1 MÉTODOS ESTÁTICOS**

Os testes estáticos procuram avaliar o teor de ácido gerado por uma amostra (Potencial de Geração de Ácido – PA) e o teor de base nela presente (Potencial de Neutralização – PN). Eles se dividem entre aqueles que medem estes potenciais separadamente, como o MABA padrão, MABA modificado e Análise de Carbono Enxofre, e aqueles que medem o efeito líquido final da reação entre as espécies presentes (bases) e geradas (ácido sulfúrico) na amostra, como o pH em pasta e o teste NAG.

#### **a) Método Balanço Ácido Base (MABA) Padrão**

O MABA foi desenvolvido por Smith e seus colaboradores em 1974 e depois modificado por Sobek et al. (1978), sendo conhecido como método padrão Sobek. O potencial de geração ácida (PA) deste material é baseado no total de enxofre presente na amostra (Leite, 2010).

A determinação do potencial de neutralização (PN) consiste basicamente na digestão à quente da amostra com uma quantidade pré-determinada de ácido. O sistema é aquecido para garantir que a neutralização do ácido pelos carbonatos eventualmente presentes seja completa (Kania, 1998 *in* Leite, 2010). Presumindo que a amostra irá neutralizar parte do ácido adicionado, o excedente ácido é então quantificado por titulação de retorno com solução padrão de uma base (NaOH), obtendo-se o PN do material.

A quantidade de ácido a ser adicionada é pré-determinada pela quantidade de carbonatos presentes na amostra. Esta presença de carbonatos é avaliada pelo teste do “fizz” (análise auditiva do ruído “fizz” gerado pela reação de carbonato com ácido), que mensura a quantidade de carbonato de cálcio e magnésio contidos na amostra. Gotas de solução de ácido clorídrico são adicionadas a uma pequena alíquota da amostra, e a dimensão do “fizz” é observada. O potencial de neutralização ácida (PN) é expresso em toneladas de carbonato equivalentes por mil toneladas de material (Sobek *et al.*, 1978).

O resultado é expresso em quantidade de carbonato porque a avaliação do potencial de neutralização é feita baseando-se na premissa de que o material que irá neutralizar o ácido adicionado seja carbonato (Sobek *et al.*, 1978).

#### **b) Método Balanço Ácido Base (MABA) Modificado**

O MABA modificado foi desenvolvido por Coastech Research Initial (1989), sendo uma modificação do método ABA padrão de Sobek (1978). A modificação foi introduzida na digestão ácida da amostra, realizada à temperatura ambiente com duração de um a dois dias, para se mensurar o potencial de neutralização (PN). A quantidade de ácido utilizada para a digestão é definida pelo teste do “fizz”, como descrito no item anterior. O potencial de geração de ácido (PA) é baseado na quantidade de enxofre reduzido (sulfeto) presente na amostra (Coastech Research Initial 1989 e White III *et al.* 1999).

## 2.2.2 MÉTODOS CINÉTICOS

Na prática os testes cinéticos envolvem ciclos repetidos de ar úmido ou soluções aquosas em um determinado período de tempo. Farfan *et al.* (2004) destacam como principais objetivos dos ensaios cinéticos: a confirmação do potencial da DAM; avaliação das taxas de oxidação de enxofre e de geração de ácido; determinação da relação entre o início da DAM e o decréscimo de potencial de neutralização; determinação do efeito das bactérias; avaliação do grau de metais lixiviáveis e indicação das concentrações de cátions e ânions que se pode esperar e; seleção de teste para avaliação e gerenciamento de resíduos, plantas e as respectivas estratégias de controle.

Dessa forma, testes cinéticos trazem informações importantes com relação às condições ambientais. Por outro lado, na realização destes ensaios, o controle e conhecimento de fatores físicos, químicos e biológicos são fundamentais para a avaliação dos resultados obtidos. Dentre os fatores físicos pode-se destacar:

- o tamanho, forma e estrutura do sistema a ser usado para conduzir o teste;
- quantidade e distribuição do tamanho da partícula;
- trajeto e condições de saturação resultante (Ex. zona saturada, capilaridade, umidade relativa dos poros).

Como fatores químicos destacam-se a composição química e mineralógica detalhada do material e a composição química do influente e do efluente (lixiviado). Além disso, fatores biológicos como a presença e abundância de bactérias que catalisam as reações de produção de DAM e disponibilidade de nutrientes e outros ingredientes que dão suporte a vida das bactérias também devem ser considerados (Hornberger & Brady, 1998).

A interpretação dos resultados dos testes cinéticos depende do objetivo do procedimento. Alguns ensaios são projetados para obtenção de parâmetros individuais como a taxa de oxidação do mineral sulfetado, outros testes são destinados, por exemplo, a estimar a razão de liberação de metais dissolvidos e a taxa de esgotamento de minerais sulfetados associada à neutralização de minerais carbonatados (Blowes *et al.*, 2003).

### **a) Ensaios de Células de Umidade**

As células de umidade são equipamentos usados para estudos de intemperismo acelerado e também para avaliação de potencial de geração ácida de determinado material. Estes equipamentos podem ter dimensões variadas e tem como princípio o contato do material com fluxos controlados de ar seco e úmido alternados lixiviando o mesmo. Atualmente, os laboratórios têm adotado como procedimento padrão a Norma D5744 (ASTM, 2018). Nesta norma são estipuladas as dimensões para o tamanho da célula, o tamanho das partículas utilizadas no teste, a vazão da entrada de ar e a duração mínima do teste de 20 semanas (Blowes et al. 2003, Machado & Schneider 2008).

### **b) Ensaios de Coluna de Lixiviação**

Nas colunas de lixiviação a disposição do material a ser ensaiado é feita em colunas, e é adicionado um determinado volume de água ao topo das mesmas, normalmente que represente a precipitação da área estudada. Os testes utilizando colunas podem ser realizados em laboratório, em escala piloto ou in situ. Permite-se que a água percole pela coluna lixiviando o material. Devido à falta de padronização deste procedimento há uma grande variedade de sistemas de colunas de lixiviação na literatura o que dificulta a interpretação dos resultados e comparação entre estudos similares de diferentes litologias (Abreu, 2012). Além disso, os trabalhos revelam poucos detalhes com relação à construção das colunas e obtenção de lixiviados.

Através das análises químicas do lixiviado é possível verificar se a amostra ensaiada tem potencial para geração da DAM. De acordo com Guevara (2007), os principais parâmetros que indicam a variação de geração de acidez em função do tempo são:

- pH: Se o valor do pH estiver entre 5,0 a 5,5, indica que a amostra não será geradora de acidez, se estiver entre 3 a 5 indica que a amostra tem potencial para geração de ácido.
- Eh: Se os valores de Eh encontrados são < 400 mV indica que a geração da DAM encontra-se nos seus estágios iniciais. Valores de Eh > 450 mV indicam um ambiente com forte oxidação e influência das bactérias ferro oxidantes no processo de oxidação. Para Eh acima de 500 mV a oxidação dos sulfetos pelo íon férrico é significativa.

- Condutividade Elétrica (CE): Quantifica a facilidade com que um elemento conduz uma corrente elétrica, ela reflete a presença de íons na solução.
- Sulfato: É um produto da oxidação completa do sulfeto e pode ser um indicativo da velocidade da oxidação dos sulfetos e da geração da DAM.
- Acidez: É uma medida acumulativa de diversas espécies aquosas como o  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ . Assim a acidez pode ser utilizada como um parâmetro indicador para quantificar, de maneira grossa, o estado do processo de geração de ácido.

## 2.3 MÉTODOS DE PREVENÇÃO DA DAM

As técnicas de prevenção de DAM, segundo o INAP (2018), consistem em métodos que minimizem o fornecimento dos reagentes primários para a oxidação de sulfeto e/ou maximizem a quantidade e a disponibilidade de reagentes neutralizadores do ácido. Portanto as soluções devem:

- minimizar o fornecimento de oxigênio;
- minimizar a infiltração de água e a lixiviação, pois a água atua tanto como reagente como mecanismo de transporte;
- minimizar, remover ou isolar os minerais sulfetados;
- controlar o pH da água intersticial;
- maximizar a disponibilidade de minerais neutralizadores de ácido e da alcalinidade da água intersticial;
- controlar a presença de bactérias e de processos biogeoquímicos.

Como prevenção de caráter químico, Blowes et al. (2003) destacam o uso da tecnologia de revestimento, ou micro-encapsulamento, da partícula responsável pela geração de acidez e a adição de oxidantes fortes como permanganato para acelerar a oxidação das partículas de sulfeto. Assim, a superfície da partícula de sulfeto oxidado fica com uma camada de proteção. Geralmente é realizada com adição de reagentes aniônicos de fosfato ou silicato.

Outra abordagem bem comum é o controle do pH da água pela adição de materiais alcalinos. Métodos utilizando materiais alcalinos incluem: mistura com resíduos de rochas, alteração de rejeitos, disposição do material alcalino abaixo ou acima dos resíduos como revestimento, coberturas, camadas ou tratamento da DAM (INAP, 2011).

Como alternativa de prevenção utilizando aditivos alcalinos pode-se destacar o método da mistura conhecida como *blending*. No qual o material gerador de DAM é misturado homogeneamente com o material alcalino. A mistura é feita para neutralização da acidez e imobilização de metais por precipitação (INAP, 2011). Os aditivos alcalinos tradicionalmente utilizados são a cal (virgem ou hidratada) e o calcário.

Como prevenção de caráter físico, Ritcey (1989) considera a redução do fluxo de oxigênio e água pelas pilhas de estéreis e rejeitos para diminuir a taxa de oxidação de sulfetos e assim evitar o desencadeamento da DAM. Para isto, cada vez mais está sendo adotado o uso barreiras físicas no controle da geração da DAM. Os métodos mais utilizados para este fim são: cobertura úmida (*wet cover*) ou disposição subaquática, e cobertura seca (*dry cover*) ou disposição subaérea (Borma e Soares, 2002).

### **2.3.1 COBERTURAS ÚMIDAS**

A utilização de coberturas úmidas para a mitigação da geração da DAM consiste na elevação do nível de água dentro de áreas de disposição de rejeitos. Dessa forma, pode evitar a oxidação por meio de bloqueio da entrada de oxigênio no sistema, uma vez que o coeficiente de difusão do oxigênio na água é cerca de 4 ordens de grandeza menor que seu coeficiente de difusão no ar (MEND/CANMET, 1994, Blowes et al., 2003).

O sistema de coberturas úmidas é usado, sobretudo, em locais onde o nível do lençol freático pode ser restabelecido ou elevado de forma a submergir os rejeitos geradores de acidez. O uso de cavas e antigas bacias de rejeito reduz o investimento necessário para a disposição sub-aquática segura de resíduos, uma vez que podem ser aproveitadas as estruturas de contenção construídas anteriormente para retenção de sólidos e águas (MEND/CANMET, 1994).

### **2.3.2 COBERTURAS SECAS**

Os sistemas de coberturas secas (*dry covers*) são, normalmente, divididos em dois tipos: prescritivos e evapotranspirativos. As coberturas prescritivas utilizam dos princípios de resistência ao fluxo, ou seja, camadas com baixa condutividade

hidráulica (argilas compactadas com/sem geomembrana ou GCL) são utilizadas para minimizar a infiltração e maximizar o escoamento superficial e a evapotranspiração. Seus componentes básicos são: uma camada de solo com maior teor de matéria orgânica, apropriado para o plantio; e uma camada barreira feita com solo compactado de baixa condutividade hidráulica localizada acima do rejeito a ser coberto (O’Kane e Barbour, 2003).

As coberturas evapotranspirativas consistem em: uma camada de solo com maior teor de matéria orgânica, apropriado para o plantio de uma cobertura vegetal; uma camada de solo pouco compactado acima do rejeito a ser coberto (camada de trafegabilidade), que tem a função de armazenar os líquidos que se infiltram durante o período de chuvas. Durante o período de chuvas essa camada é saturada progressivamente, evitando que uma quantidade significativa de líquidos alcance o rejeito. Quando a precipitação cessa ou diminui, a evapotranspiração passa a predominar e seca gradualmente. Esse processo de armazenamento e secagem se repete a cada período seco e chuvoso (Amorim et al., 2008).

Além de coberturas com materiais sintéticos também podem ser utilizadas as coberturas orgânicas e coberturas alcalinas.

As coberturas orgânicas atuam como barreira física frente ao oxigênio, material potencialmente consumidor de oxigênio, inibidor químico através da presença de produtos de decomposição e compostos que possam inibir o crescimento de bactérias acidificantes, fonte de carbono para bactérias redutoras de sulfato e barreira de infiltração da água. Para esta função, têm sido avaliados, materiais orgânicos como resíduos de madeira, resíduos de cana de açúcar, resíduos da indústria de papel e celulose, lamas de depuração e adubo (Blowes et al. 2003, INAP, 2018).

As coberturas alcalinas como método de prevenção da DAM tem como princípio o aditivo alcalino colocado acima dos materiais geradores de acidez. Tal disposição pode aumentar a alcalinidade de infiltração, proporcionando um controle de pH, e ainda atuar como um revestimento dos minerais sulfetados.

A água de infiltração alcalina pode reagir com a superfície dos minerais sulfetados formando uma camada de isolamento, também conhecida como barreira química que é formada na interface entre o material alcalino e o material gerador de acidez.

A utilização dessa cobertura deve levar em consideração as condições climáticas, disponibilidade de materiais alcalinos, geometria e reatividade dos materiais alcalinos e tempo de consumo (INAP, 2018).

O material alcalino como cobertura pode atuar sozinho ou como mistura (*blending*). Assim como na utilização de materiais alcalinos para controle e mitigação da DAM, os agentes neutralizantes tradicionalmente utilizados para sistemas de coberturas são a cal e o calcário (Murta et al., 2008).

Segundo Duarte (2012), os tipos de cobertura seca com solos mais comum utilizadas atualmente são:

- Camada superficial: a camada orgânica superficial (ou *top soil*) que é responsável pelo controle de erosão das camadas inferiores, pelo controle de poeira, pela sustentação da vegetação e por permitir a trafegabilidade sobre o reservatório. Em regiões áridas, onde é difícil estabelecer e manter a vegetação essa camada tem sido substituída por cascalho.
- Cobertura de armazenamento e liberação de água: Essa camada deverá ser capaz de acumular a água de infiltração durante o período chuvoso e liberá-la de volta para a atmosfera por evapotranspiração durante os períodos de estiagem.
- Barreira capilar: consiste de uma camada de material granular, sobreposta por uma camada de material fino. Como a capacidade drenante do material granular é muito maior do que a do material fino da cobertura, o material granular da base torna-se não saturado muito mais rapidamente que a camada de material fino acima dele. Em condições não saturadas e elevados valores de sucção, a condutividade hidráulica do material granular torna-se muito baixa com valores menores do que a do material fino no topo da cobertura, formando uma barreira capilar de baixíssima condutividade hidráulica que impede a infiltração de água.
- Barreira hidráulica: consiste na construção de uma camada compactada de solo argiloso de baixa permeabilidade sobre o material a ser coberto. Tem como função minimizar a percolação da água através do sistema e indiretamente promover a drenagem ou armazenagem da água em camadas superiores, aumentando a evapotranspiração e o escoamento superficial.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 MATERIAIS**

Para a realização dos ensaios de coluna de lixiviação foram utilizados os seguintes materiais: rejeito, estéril e cal virgem.

As amostras de rejeito e estéril utilizadas nos ensaios foram coletadas em uma mineração de ouro localizada no estado da Bahia em dezembro de 2018.

As amostras deformadas de rejeito (*underflow*) foram coletadas em alguns pontos nos quais a empresa proprietária do empreendimento informou que havia geração de drenagem ácida. As amostras deformadas de estéril foram coletadas da pilha de material rochoso britado.

Foram coletados aproximadamente 50 kg de cada material, os quais foram devidamente embalados em sacos plásticos e encaminhados ao Laboratório de Geotecnia da UFMG (LABGEO/UFMG), localizado em Belo Horizonte – MG.

A cal virgem (CaO) utilizada nos tipos de coberturas secas alcalinas ensaiadas é proveniente do estoque do LABGEO/UFMG.

#### **3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS**

As amostras foram secas ao ar para retirar uma possível umidade residual (Figura 3-1). Esta secagem foi realizada em ambiente protegido de vento para não haver perda de material fino das amostras. Após a secagem, as amostras foram destorroadas e realizou-se o quarteamento e homogeneização das mesmas.

De cada amostra foram separados 10 kg para realização dos ensaios de coluna de lixiviação e caracterização mineralógica, física e química. O restante das amostras foi acondicionado em sacos plásticos e reservado em local adequado caso houvesse necessidade de realizar ensaios adicionais.



Figura 3-1 – Amostras de rejeito (a) e estéril (b) utilizadas nos ensaios de coluna de lixiviação

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS**

#### **3.3.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

A caracterização mineralógica do rejeito e do estéril foi feita a partir de ensaios de difratometria de raios-X realizados no Laboratório de Difração e Fluorescência de Raios-X do CPTMC/IGC-UFMG ( Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa – Instituto de Geociências da UFMG). Este procedimento visou obter a composição mineralógica a partir da identificação dos picos difratométricos constituintes do material, pela caracterização de sua estrutura cristalina.

As amostras foram preparadas para a realização dos ensaios no próprio laboratório, sendo pulverizadas e peneiradas para obtenção de partículas com diâmetro menor que 75  $\mu\text{m}$ .

#### **3.3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

A caracterização física das amostras de rejeito e estéril utilizadas nos ensaios de coluna de lixiviação foram realizadas no LABGEO/UFMG (Laboratório de Geotecnia da UFMG).

### **a) Teor de Umidade**

O teor de umidade é a relação entre o peso de água e o peso dos sólidos. O teor de umidade das amostras de rejeito e estéril foi obtido de acordo com a norma NBR 16.097 (ABNT, 2012) pelo método de secagem em estufa. Utilizando a balança analítica, foram determinadas as massas iniciais de cada amostra em seu estado natural. Em seguida, as amostras foram colocadas na estufa a 110 °C até a constância de massa. Com os valores de massa inicial e final, foi obtido o teor de umidade de cada amostra.

### **b) Massa Específica dos Grãos**

A massa específica dos grãos é a relação entre a massa dos grãos de um solo e o seu volume real. É uma característica física de cada material, em função dos seus constituintes mineralógicos.

A massa específica das amostras de rejeito e estéril foram obtidas de acordo com os procedimentos descritos na NBR 6.458 (ABNT, 2016) utilizando um picnômetro calibrado com volume de 500 cm<sup>3</sup> e 60 g de cada amostra. Os ensaios foram feitos em triplicada sendo considerados resultados satisfatórios somente aqueles que não diferiram mais que 0,02 g/cm<sup>3</sup> com relação à média.

### **c) Análise Granulométrica**

A granulometria do solo é a distribuição de suas partículas constituintes, de natureza inorgânica ou mineral, de acordo com o seu diâmetro equivalente. O diâmetro equivalente das partículas dos materiais granulares é obtido por meio do processo de peneiramento da amostra, já o diâmetro equivalente dos materiais finos é obtido pelo processo de sedimentação em meio líquido. A análise granulométrica divide essas partículas em grupos pelas suas dimensões (frações de solo) e determinar suas proporções relativas ao peso total da amostra.

As análises granulométricas e classificação das amostras de rejeito e estéril foram realizadas de acordo os procedimentos descritos na norma NBR 7.181 (ABNT, 2016) e Figura 3-2.



Figura 3-2 – Sistema de Classificação de Solos segundo NBR 7.181 (ABNT, 2016)

### 3.3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

#### a) Ensaio Estático

- Ensaio preliminar

Os ensaios preliminares constituem na realização dos testes de determinação do pH em pasta e de Fizz (*Fizz test*) nas amostras de rejeito e estéril, foram feitos no laboratório do DEMET/UFMG (Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG).

O teste para a determinação do pH em pasta tem como objetivo verificar as características químicas das amostras em relação a acidez ou a alcalinidade (Farfán *et al*, 2004). As amostras foram pulverizadas para obtenção de diâmetro inferior a 0,43 mm, em seguida foram preparadas soluções com 20,0 g de cada amostra e 20,0 ml de água destilada para formar uma pasta de consistência moderada, de acordo com metodologia proposta por Sobek *et. al.* (1978).

Para a leitura do pH em pasta, o eletrodo do pHmetro foi introduzido na pasta e com movimentos leves foi misturando a pasta para obter um bom contato entre a amostra preparada e o eletrodo.

Se o valor do pH for superior a 7, a amostra possui carbonato reativo. Se for inferior a 5, a amostra contém acidez proveniente da degradação de sulfetos anteriores aos testes de drenagem ácida ou ácidos orgânicos oriundos de atividade biológica no solo.

O teste de Fizz foi realizado para verificar a previsão de quantidade de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) ativo nas amostras. O teste indica o volume e a concentração do reagente (HCl) a ser utilizado na determinação do potencial de neutralização (NP) do Balanço Ácido Base Modificado (MABA).

Para a realização do teste de Fizz foram adicionadas duas gotas de solução de ácido clorídrico com concentração de 25% (uma parte de HCl concentrado por três

partes de água destilada) a 0,5 g de cada amostra com granulometria inferior a 0,43 mm.

A adição do ácido clorídrico tem como objetivo verificar a presença de carbonatos nas amostras, o qual pode ser reconhecido pelo borbulhamento ou pelo som efervescente. Dependendo da intensidade do som (fizz ou efervescência) as amostras foram padronizadas segundo a classificação apresentada na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Classificação do teste de Fizz (modificado Farfán *et al*, 2004)

Classificação no teste de Fizz	Comportamento do HCl 25% em contato com a amostra
0 ou Nenhum	Não ferve
1 ou Suave	Solta bolhas
2 ou Moderado	Ferve moderadamente
3 ou Forte	Ferve intensamente

- Determinação do Balanço Ácido Base Modificado

Foi realizado o Balanço Ácido Base Modificado (MABA) para a determinação do potencial de neutralização (NP) das amostras de rejeito e estéril, de acordo com a metodologia proposta por Lawrence e Wang (1997), para quantificar a capacidade de neutralização da acidez adicionada e gerada pela amostra.

No início do teste foi adicionado um volume de HCl 1,0 N de acordo com a classificação do teste de Fizz, e após 2 h, foi adicionada a segunda quantidade de ácido, conforme indicado na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Volume de HCl 1,0 N adicionado no MABA em função do teste de Fizz (modificado Lawrence and Wang, 1996)

Classificação no teste de Fizz	Volume de HCl 1,0 N (ml)	
	Tempo 0 h	Tempo 2 h
0 ou Nenhum	1,0	1,0
1 ou Suave	2,0	1,0
2 ou Moderado	2,0	2,0
3 ou Forte	3,0	2,0

Após adicionar a segunda quantidade de ácido a solução foi agitada por 20 horas. No Tempo 22 h, foi verificado o pH da polpa. Se ele for superior a 2,5, deve-se adicionar um volume suficiente de HCl 1,0 N para ajustar o pH na faixa de 2,0 a 2,5. No Tempo 24 h, foi adicionada água destilada ao frasco até que atingisse o volume de 125 ml. Em seguida, foi verificado novamente o pH e se necessário, adicionar mais ácido para ajustar na faixa de 2,0 a 2,5. Titulou-se o conteúdo do frasco usando NaOH 0,1 N ou 0,5 N normalizado, até o pH se manter em 8,3 por no mínimo 30 s.

Ao final, foi calculado o potencial de neutralização modificado (NP) e o potencial de geração de ácidos (AP) em kg CaCO<sub>3</sub>/ton.

$$\text{Modified NP} = \frac{(N \times \text{vol(ml) HCl}) - (N \times \text{vol(ml) NaOH})}{\text{Massa de amostra (g)}} \times 50 \quad (9)$$

$$\text{AP} = (\% \text{ Sulfeto}) \times 31,25 \quad (10)$$

Onde: % Sulfeto = percentual de enxofre sulfeto da amostra;

N = normalidade da solução.

Os resultados de AP e NP são expressos em quantidade equivalente de carbonato de cálcio (kg CaCO<sub>3</sub>/ton), levando em conta que a calcita é o principal mineral consumidor de ácido.

A diferença entre esses dois valores, NP e AP, corresponde ao potencial líquido de neutralização (Net NP ou NNP – *net neutralization potential*), que classifica a amostra como potencialmente consumidora ou produtora de acidez.

Normalmente, um resultado positivo de NNP mostra que a amostra é consumida de ácido para valores superiores a 20 kg CaCO<sub>3</sub>/ton, ou seja, a amostra possui potencial neutralizador. Valores inferiores a -20 kg CaCO<sub>3</sub>/ton de material indicam que a amostra é potencialmente geradora de ácido. Na faixa entre 20 e -20 kg CaCO<sub>3</sub>/ton, conhecida como zona de incerteza, as amostras também podem ser

potencialmente geradoras de ácido (Lawrence e Wang, 1997). Nesse caso, outros métodos de predição devem ser realizados para melhor caracterização da amostra.

## b) Composição Química

A determinação da composição química das amostras de rejeito e estéril foi realizada no laboratório da SGS Geosol, localizado no município de Vespasiano/Minas Gerais, e no DEMET/UFMG (Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG).

Foram realizadas determinação por digestão com água régia e digestão multiácida por ICP-OES, e determinação de carbono e enxofre totais por infravermelho (LECO).

### 3.4 PREPARAÇÃO DAS COBERTURAS SECAS

O sistema de cobertura seca verificado nesse trabalho foi a chamada cobertura alcalina, que foi preparada com uma mistura do estéril e agente de neutralização, no caso a cal virgem.

De acordo com a norma da NBR 6.453 (ABNT, 2003), cal virgem é o produto obtido pela calcinação de carbonatos de cálcio e/ou magnésio, e é constituído principalmente por óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). Segundo essa norma, a cal virgem utilizada nos ensaios pode ser classificada como CV-E (cal virgem especial) e possui parâmetros químicos e físicos dentro dos limites conforme apresentado na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Exigências químicas e físicas da cal virgem (modificado ABNT, 2003)

Parâmetros		Limites (%)
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )		≤ 8
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO <sub>total</sub> + MgO <sub>total</sub> )		≥ 90
Água combinada		≤ 3,6
Finura	Peneira 1,00 mm	≤ 2
	Peneira 0,30 mm	≤ 15

Para o estéril utilizado nas coberturas foi considerada somente a fração com diâmetro menor que 25 mm, correspondente a ¼ do diâmetro interno do tubo de PVC utilizado nas colunas de lixiviação, como referenciado por ADTI (2002).

Nos ensaios de coluna de lixiviação foram verificados dois tipos de coberturas, sendo:

- Cobertura 1 – composta por 98% de estéril e 2% de cal virgem;
- Cobertura 2 – composta por 96% de estéril e 4% de cal virgem.

A Figura 3-3 mostra a preparação da Cobertura 1.



Figura 3-3 – Preparação da Cobertura 1 utilizada nos ensaios de coluna de lixiviação

### 3.5 EQUIPAMENTO

Para a realização dos ensaios de coluna de lixiviação foi desenvolvido um equipamento no Laboratório de Geotecnia da UFMG (Figura 3-4). Foram construídas 10 colunas de lixiviação, todas com as mesmas dimensões. Diferentes materiais foram ensaiados para verificar a influência da camada de cobertura nos parâmetros dos lixiviados obtidos nos ensaios.



Figura 3-4 – Equipamento construído para o realização dos ensaios de coluna de lixiviação

As colunas de lixiviação foram construídas com um tubo de PVC com diâmetro interno de 10 cm e altura de 25 cm. Para conter a amostra a ser ensaiada foi inserido um sistema de filtro composto por geotêxtil não tecido de poliéster com

gramatura de 300 g/m<sup>2</sup> e espessura de 1,9 mm, e um ralo feito com o mesmo material do tubo de PVC. Para direcionar o lixiviado até os recipientes de coleta foi colocado um funil de plástico logo abaixo do sistema de filtro. A vedação nas interfaces dos materiais foi feita com silicone. A Figura 3-5 mostra os materiais utilizados na construção e a Figura 3-6 apresenta o esquema interno das colunas de lixiviação.

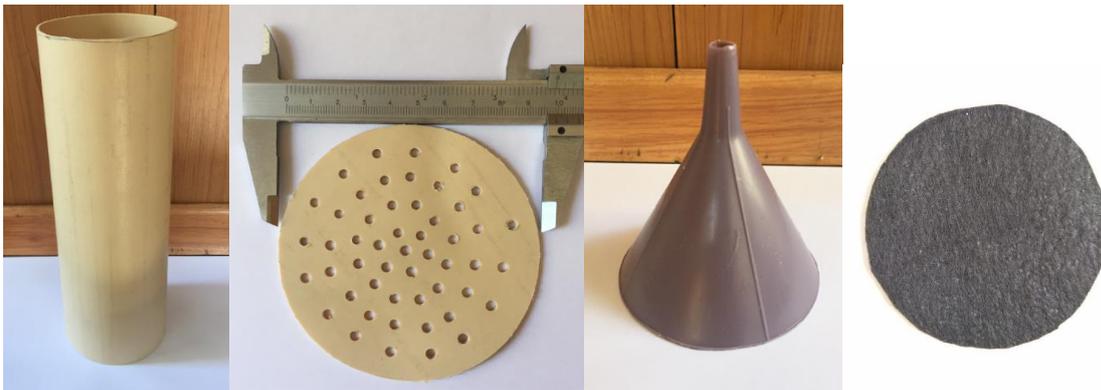


Figura 3-5 – Materiais de construção das colunas de lixiviação

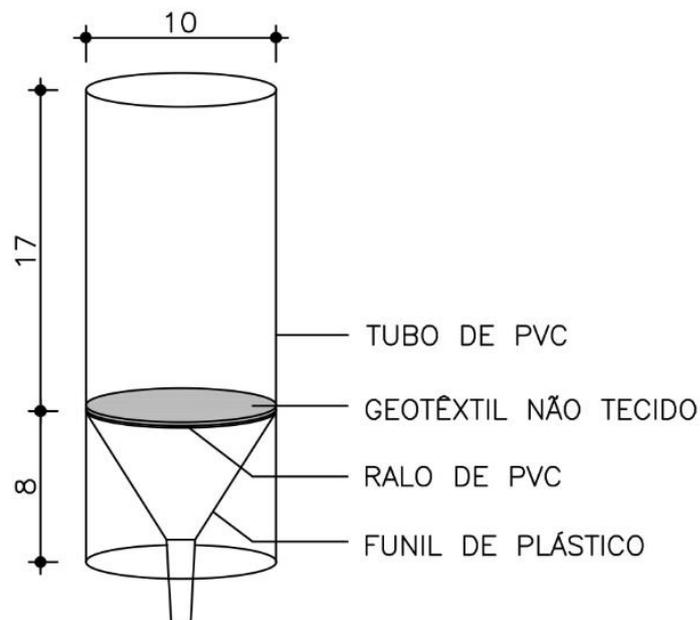


Figura 3-6 – Esquema das colunas de lixiviação (dimensões em cm)

Os ensaios foram feitos em três fases diferentes: lavagem inicial, com a entrada de água na coluna de lixiviação no sentido ascendente; ciclo úmido, com entrada de água na coluna de lixiviação no sentido descendente; e ciclo seco, com entrada de ar comprimido na coluna de lixiviação no sentido descendente.

Para a lavagem inicial, a água entra nas colunas no sentido ascendente, dessa forma a montagem do ensaio foi feita da seguinte maneira: um recipiente com capacidade para 1,0 l de água destilada para alimentação no sistema (1), foi conectado a mangueira com dosador (do tipo equipo para soro hospitalar) (2), para que a entrada de água nas colunas fosse controlada, ligado a mangueira de PVC com diâmetro de 12,70 mm ( $\frac{1}{2}$  polegada) (3), que fornece água a coluna de lixiviação no sentido ascendente (Figura 3-7).



Figura 3-7 – Montagem do ensaio para a lavagem inicial (o sentido do fluxo está indicado na figura)

Para o ciclo úmido, a montagem do ensaio consistiu em um recipiente com capacidade de 1,0 l para a alimentação de água destilada no sistema (1), mangueira com dosador (do tipo equipo para soro hospitalar) (2) conectando o recipiente de alimentação de água destilada à coluna (3). O dosador foi ajustado para que a vazão de água de entrada no sistema fosse de 0,025 l/min, aproximadamente 8 gotas/segundo. Na saída da coluna foi colocada uma mangueira de PVC com diâmetro de 12,70 mm ( $\frac{1}{2}$  polegada) e um registro para controlar a saída do lixiviado que foi coletado numa garrafa com capacidade de 1,0 l (4), conforme indicado na Figura 3-8.



Figura 3-8 – Montagem do ensaio para o ciclo úmido (o sentido do fluxo está indicado na figura)

Para o ciclo seco, a montagem do ensaio foi feita com um tubo polietileno transparente (1) conectando o sistema de ar comprimido do laboratório (2) à coluna de lixiviação (3) (Figura 3-9). Nesse caso, a coluna permaneceu fechada com um CAP 100 mm de PVC com um furo para a entrada do ar (4), e o registro localizado na base da coluna ficou aberto para a saída do ar. Foi colocado um manômetro no registro do ar comprimido para medir a pressão de ar que entra nas colunas.



Figura 3-9 – Montagem do ensaio para o ciclo seco (o sentido do fluxo de ar está indicado na figura)

### 3.6 MONTAGEM DAS COLUNAS DE LIXIVIAÇÃO

Os ensaios foram realizados em 10 colunas de lixiviação, que foram preenchidas com as amostras de rejeito, estéril ou cal, com as proporções indicadas na Tabela 3-4 e no esquema da Figura 3-10.

Tabela 3-4 – Identificação e Composição das Colunas de Lixiviação

Identificação	Preenchimento das Colunas (% em massa seca)
C1	100% Rejeito
C2	100% Rejeito
C3	100% Estéril
C4	100% Estéril
C5	98% de estéril + 2% de cal virgem (Cobertura 1)
C6	96% de estéril + 4 % de cal virgem (Cobertura 2)
C7	80% de rejeito + 20% de Cobertura 1
C8	60% de rejeito + 40% de Cobertura 1
C9	80% de rejeito + 20% de Cobertura 2
C10	60% de rejeito + 40% de Cobertura 2

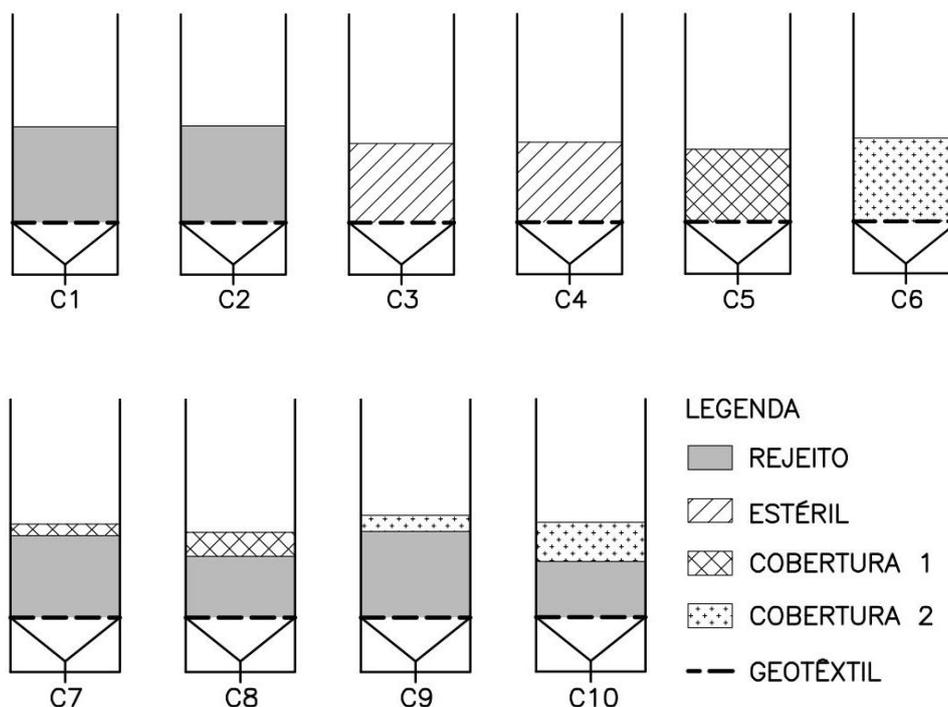


Figura 3-10 – Esquema das Colunas de Lixiviação

As colunas C1 a C6 foram ensaiadas com a finalidade de servir como referência para a comparação dos resultados e verificação da influência da cobertura aplicada sobre o rejeito nas colunas C7 a C10.

Cada coluna foi carregada com aproximadamente 1,0 kg de material, sendo que o maior diâmetro de partícula não excedeu  $\frac{1}{4}$  do diâmetro interno do tubo de PVC, como mencionado por Acid Drainage Technology Initiative (ADTI, 2002).

### **3.7 ENSAIO DE COLUNA DE LIXIVIAÇÃO**

Para a realização dos ensaios de coluna de lixiviação foi elaborada uma metodologia baseada nos procedimentos descritos na norma D5744 (ASTM, 2007) e nos ensaios realizados por Guevara (2007).

A seguir são descritas as atividades realizadas para cada uma das três etapas: lavagem inicial, ciclo úmido, ciclo seco.

#### **a) Lavagem Inicial**

Nessa etapa, a água entra nas colunas no sentido ascendente para saturação das amostras, é realizada somente no primeiro dia do ensaio e corresponde a amostra inicial de lixiviado coletado, nomeado de Semana 0. A Figura 3-11 apresenta a montagem dos ensaios de coluna de lixiviação relativa a essa etapa.

- As colunas foram preenchidas com as amostras e foram pesadas;
- Os recipientes para a alimentação de água no sistema foram cheios com 1,0 l de água destilada;
- As mangueiras de saída desses recipientes foram conectadas às mangueiras de entrada na base inferior das colunas de lixiviação;
- Os registros localizados na base das colunas foram abertos lentamente para que a água entrasse sem perturbar as amostras;
- Após verificar uma lâmina de água de aproximadamente 3,0 cm acima das amostras, bateu-se suavemente nas colunas para eliminar pequenas bolhas de ar que se formaram nos vazios dos solos;
- As colunas permaneceram saturadas durante 2 h;
- Após esse período, as colunas foram drenadas por 3 h e coletadas amostras para determinação do pH e condutividade elétrica (CE);

- As colunas continuaram sendo drenadas por 24 h;
- Foram coletadas amostras do lixiviado para realização dos ensaios para determinação da concentração de sulfato, alcalinidade total, acidez total e concentração de metais;
- Após a drenagem, as colunas foram pesadas.



Figura 3-11 – Colunas de Lixiviação – Lavagem inicial – Colunas C1 a C10

As Figuras 3-12 e 3-13 mostram a entrada de água nas colunas C1 e C3, preenchidas com amostras de rejeito e estéril, respectivamente. Nota-se que a água entra sem causar grande perturbação nas amostras, e percebe-se a liberação de bolhas de ar.



Figura 3-12 – Lavagem inicial – Coluna C1 (amostra de rejeito)



Figura 3-13 – Lavagem inicial – Coluna C3 (amostra de estéril)

## b) Ciclo seco

Nessa etapa, o ar comprimido é inserido nas colunas no sentido descendente para a secagem das amostras durante 6 dias, conforme apresentado na Figura 3-14.

- Após o ciclo de lavagem inicial, iniciou-se o ciclo seco que constitui em alimentar as colunas só com ar comprimido durante 6 dias;
- As aberturas superiores das colunas foram fechadas e as mangueiras conectadas à linha de ar comprimido do laboratório;
- Os registros localizados na saída das colunas ficaram abertos;
- A pressão de ar na saída da tubulação do ar comprimido foi medida com auxílio de um manômetro, sendo inferior a  $0,1 \text{ kgf/cm}^2$  durante todo o ensaio;
- Ao final do ensaio as colunas foram pesadas.



Figura 3-14 – Colunas de Lixiviação – Ciclo seco – Colunas C1 a C10

A Figura 3-15 mostra as colunas C1, C4 e C6 preenchidas com amostras de rejeito, estéril e Cobertura 2, respectivamente, após o final do ciclo seco. Nota-se que a entrada de ar na coluna C1 perturbou a superfície da amostra.

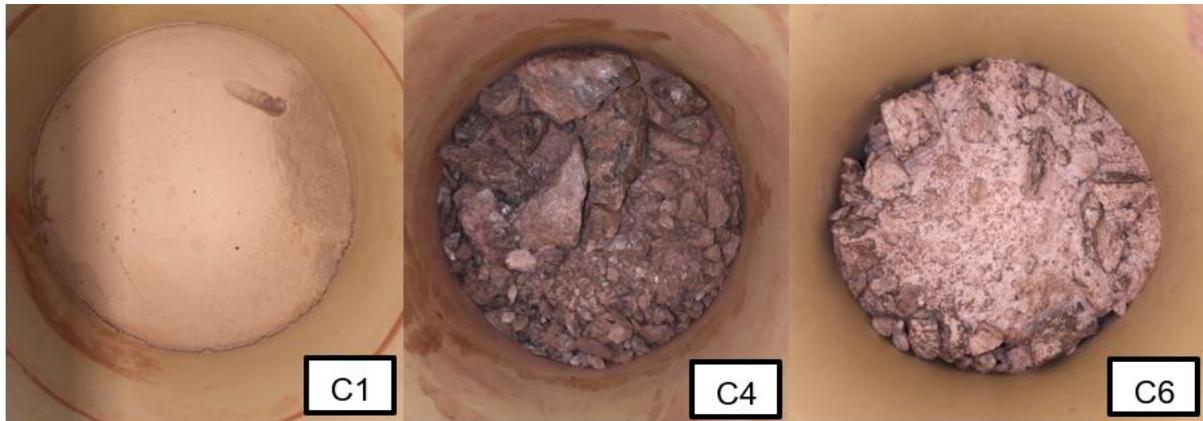


Figura 3-15 – Ciclo seco – Colunas C1, C4 e C6

### c) Ciclo úmido

Essa etapa foi executada após o ciclo seco, com duração de um dia, sendo a água inserida nas colunas no sentido descendente para obtenção das amostras lixiviadas, conforme apresentado na Figura 3-16.

- Os recipientes para a alimentação de água no sistema foram cheios com 1,0 l de água destilada;
- Os registros localizados na base das colunas foram fechados;
- As mangueiras de saída dos recipientes de alimentação foram conectadas às colunas de lixiviação;
- As colunas ficaram com os registros fechados por um período de 40 min;
- Após esse período, as colunas foram drenadas por 3 h e coletadas amostras para determinação do pH e condutividade elétrica (CE);
- As colunas continuaram sendo drenadas por 24 h;
- Foram coletadas amostras do lixiviado para realização dos ensaios de concentração de sulfato, alcalinidade total, acidez total e concentração de metais;
- As colunas foram pesadas e os volumes de água percolada nas colunas foram anotados.

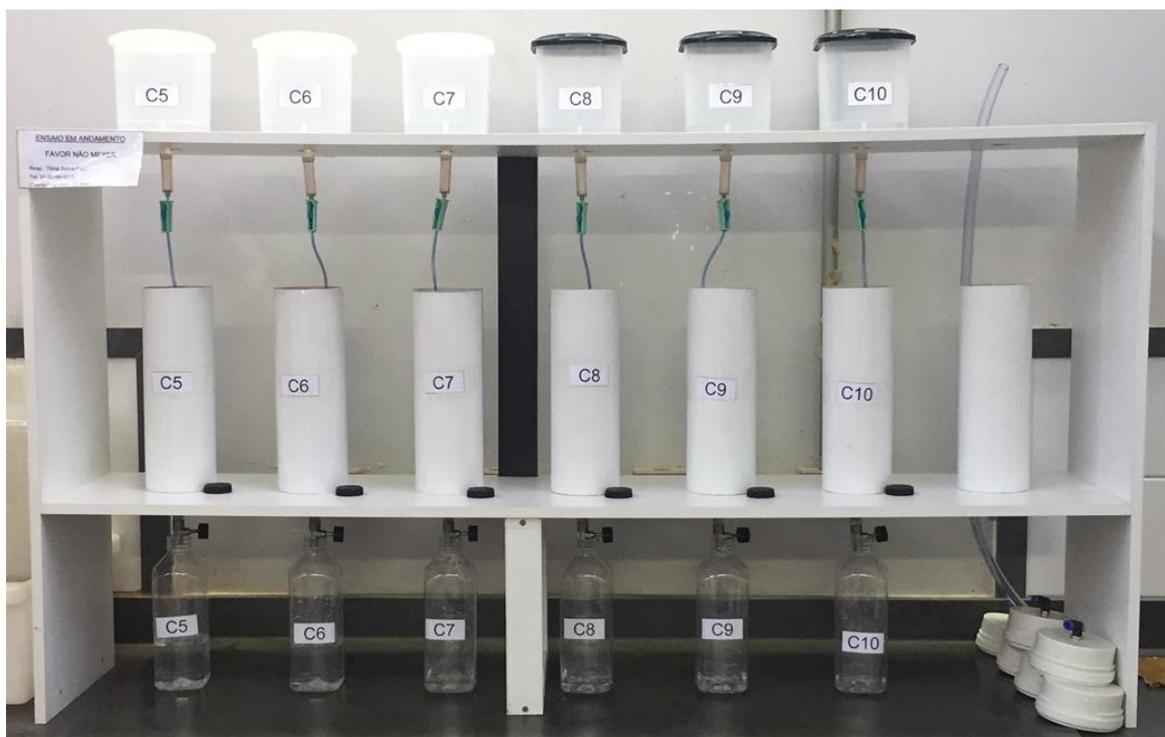


Figura 3-16 – Colunas de Lixiviação – Ciclo úmido Colunas – C5 a C10

A Figura 3-17 mostra as colunas C1 e C3 preenchidas com amostras de rejeito e estéril, respectivamente, durante o tempo de 40 min para saturação das amostras. Nota-se a saída de bolhas de ar e na coluna C1 uma dispersão do material mais fino.

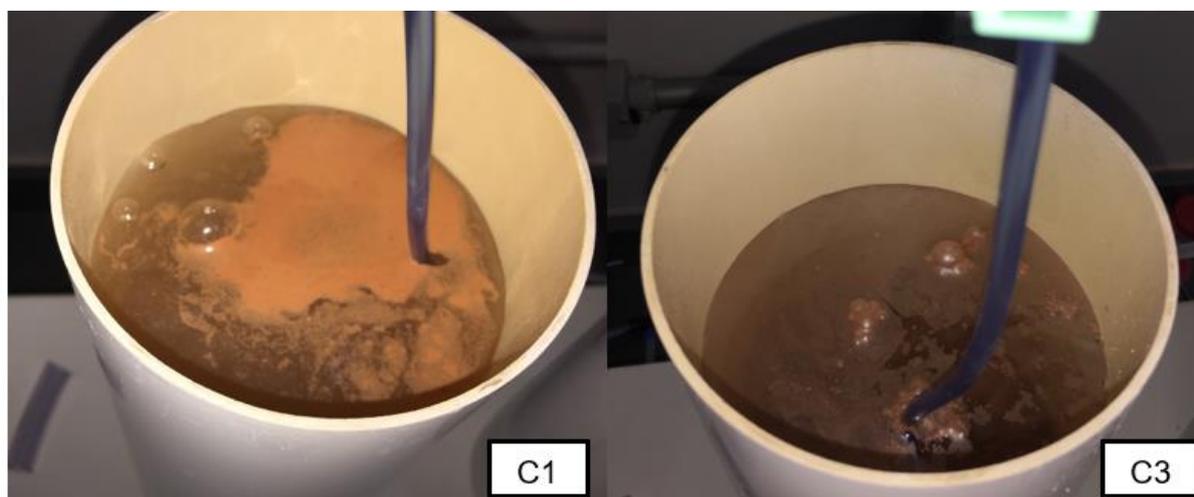


Figura 3-17 – Ciclo úmido – Colunas C1 e C3

A Figura 3-18 mostra a coluna C10, preenchida com 60% de rejeito e 40% de cobertura 2, durante o primeiro e último ciclo úmido. É possível observar como a cal presente na cobertura 2 ao decorrer dos ciclos úmidos produz uma ação cimentante modificando as propriedades físicas do estéril.

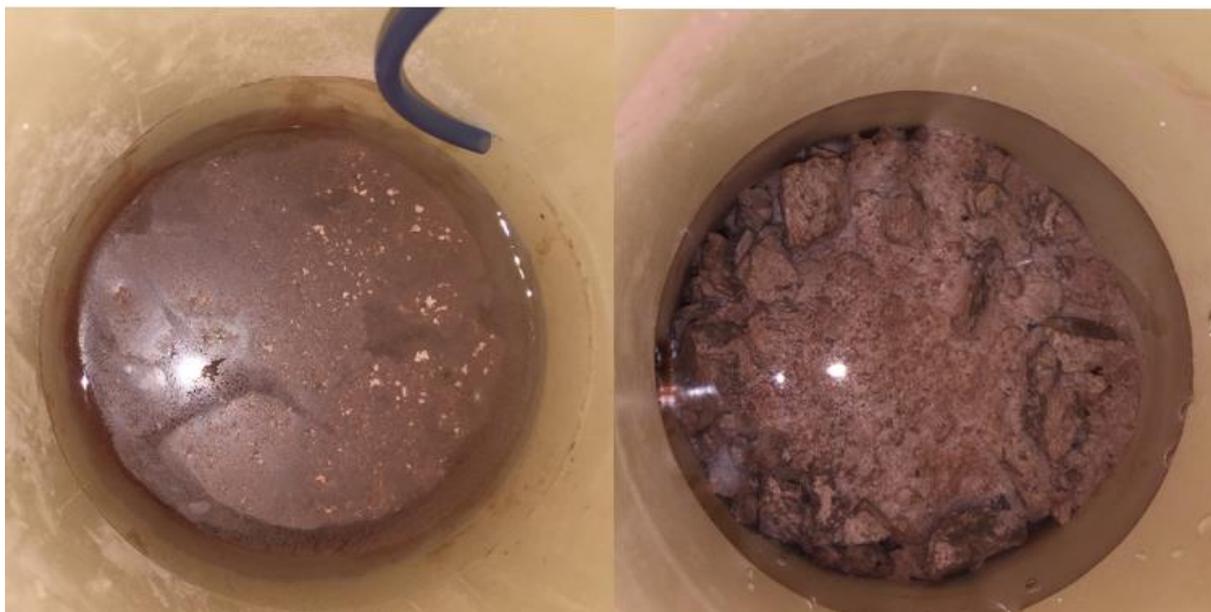


Figura 3-18 – Ciclo úmido – Coluna C10

Após o término do ciclo úmido reiniciou-se o ciclo seco, essa rotina de ensaios foi executada ao longo de 7 semanas, ou seja, a cada semana foi realizado um dia de ciclo úmido e seis dias de ciclo seco.

### **3.8 ANÁLISES DA SOLUÇÃO LIXIVIADA**

#### **3.8.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS**

Os parâmetros físico-químicos foram obtidos a partir das medidas de pH, condutividade elétrica (CE), concentração de sulfato, alcalinidade total e acidez total nas amostras do lixiviado coletadas semanalmente das 10 colunas de lixiviação.

##### **a) pH e Condutividade Elétrica**

As leituras de pH foram realizadas com a utilização de um medidor de pH de bolso marca Hanna modelo HI98107 pHep+. A calibração foi efetuada com soluções tamponadas de pH 4,01 e pH 7,01.

As leituras de condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) foram obtidas com a utilização do equipamento marca Hanna modelo HI98303. A calibração foi realizada com solução de calibração de  $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

## **b) Concentração de Sulfato, Alcalinidade Total e Acidez Total**

A determinação da concentração de sulfato, alcalinidade total e acidez nas amostras de lixiviado foram realizadas quinzenalmente no laboratório Limnos Hidrobiologia e Limnologia LDTA, localizado em Vespasiano – Minas Gerais. As análises foram determinadas de acordo com Standard Methods 4110 B, 2320 B e 2310 (Standard Methods, 2012), respectivamente.

### **3.8.2 ANÁLISES QUÍMICAS**

Os parâmetros químicos foram obtidos a partir das determinações das concentrações de metais nas amostras do lixiviado coletadas nas Semanas 0, 1, 2 e 7. As determinações das concentrações de metais nas amostras de lixiviado foram realizadas no laboratório da SGS Geosol, localizado no município de Vespasiano/Minas Gerais. As concentrações de 40 elementos (dentre eles Al, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, U, e Zn), foram determinadas por meio de ICP-OES (espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A difração de raios X pelos cristais resulta de um processo em que os raios X são espalhados pelos elétrons dos átomos do cristal, sem mudanças de comprimento de onda. O resultado deste tipo de análise é apresentado sob a forma de um gráfico, o difratograma, cujas variáveis são o ângulo de incidência ( $2\theta$ ) versus a intensidade dos picos difratados (eixo vertical).

Nas Figura 4-1 a 4-3 são apresentados os difratogramas de raios X das amostras de rejeito e estéril. O resultado da amostra de rejeito indica que ela é constituída por 99,6% de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e 0,4% de goethita ( $\text{FeO(OH)}$ ), já a amostra de estéril é constituída por 99,4% de quartzo e 0,4% hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e 0,3% de biotita. Resultado semelhante ao obtido por Galo (2017) em amostras de rejeito *underflow* coletadas na mesma barragem.

Não foi observada na amostra de rejeito a presença de minerais sulfetados, pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e a arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), minerais que fazem parte da composição do minério de ouro sulfetado que originou esse rejeito. Portanto, conclui-se que o processo de beneficiamento acarretou a oxidação completa desses minerais.

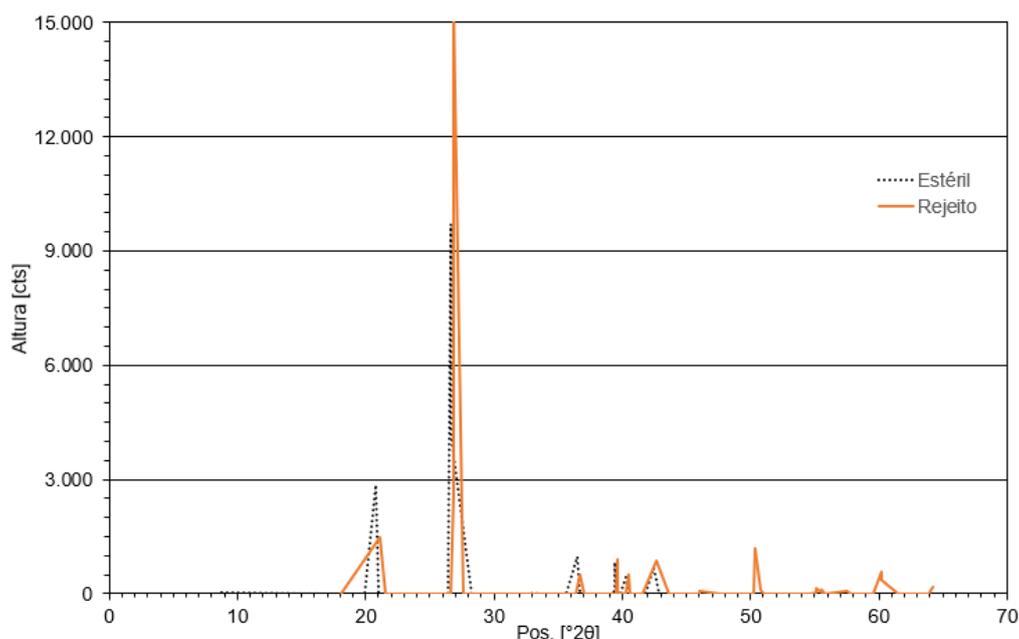


Figura 4-1 – Difratograma de raios X das amostras de rejeito e estéril

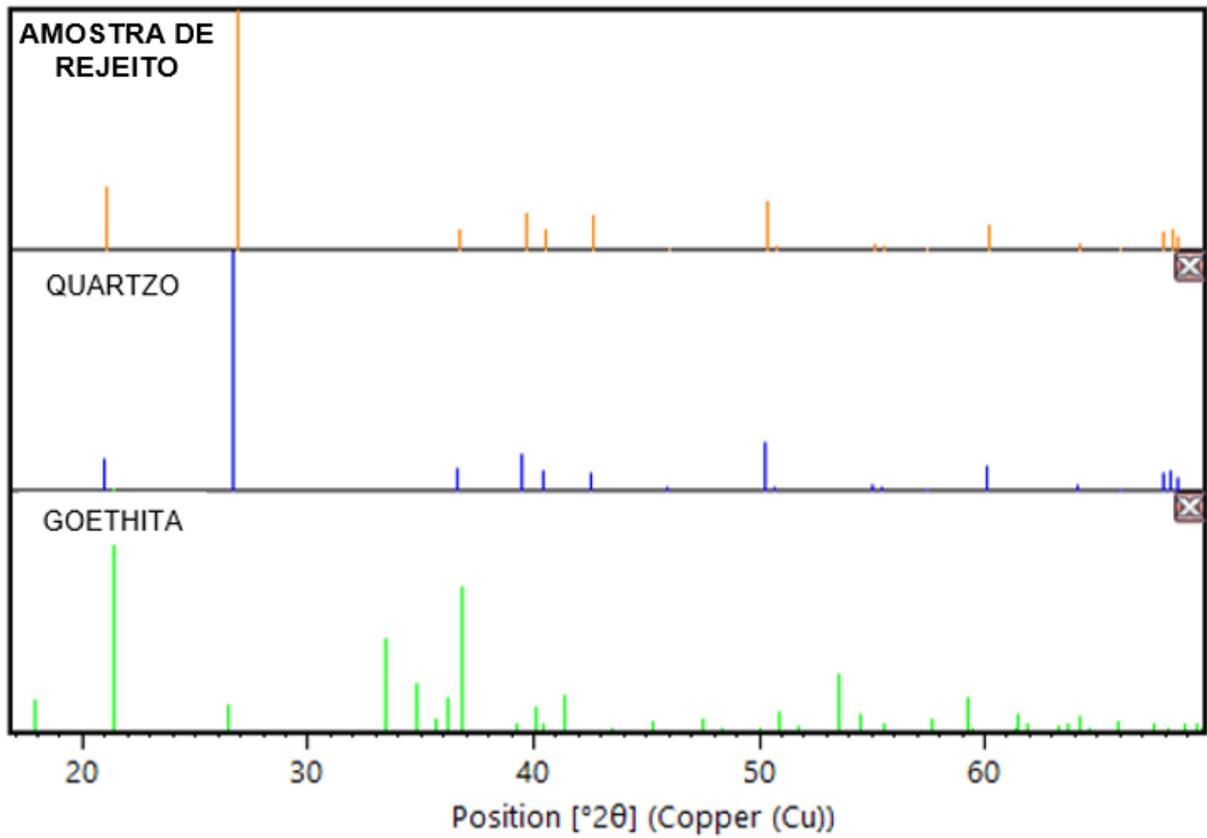


Figura 4-2 – Difratoograma de raios X da amostra de rejeito

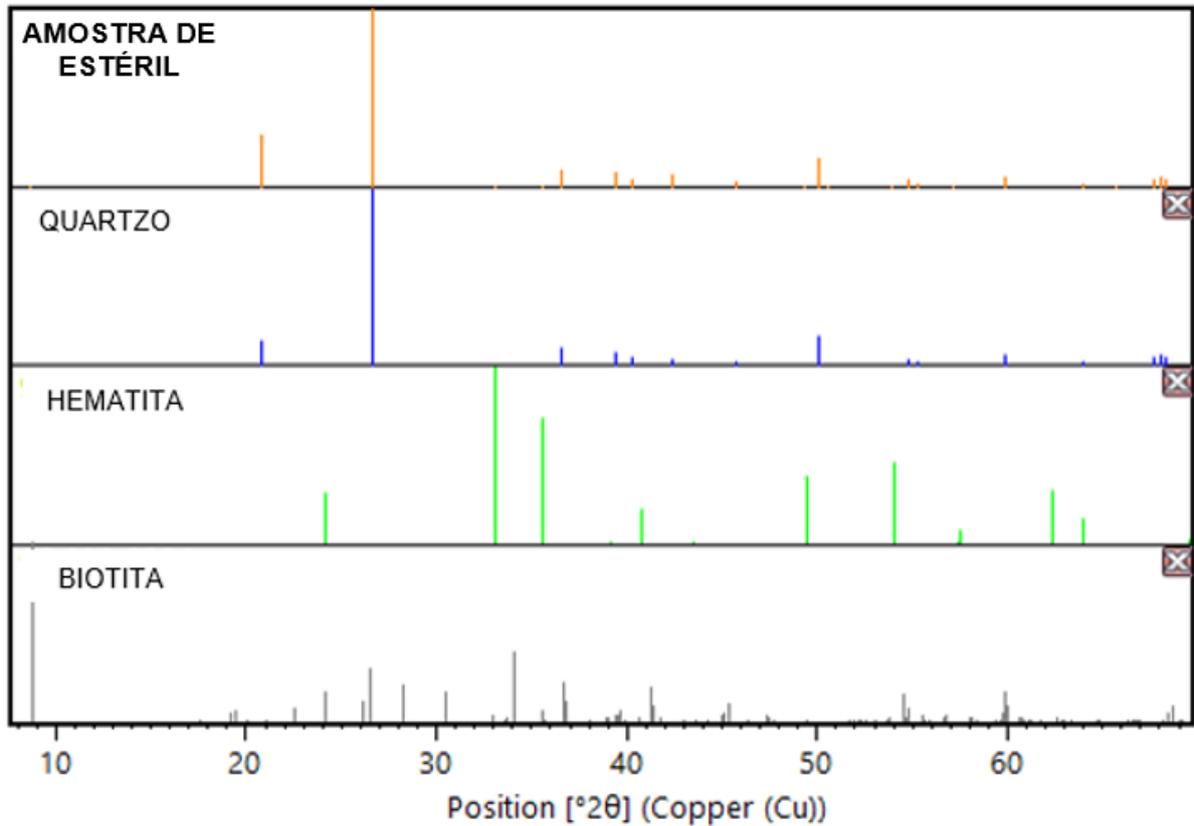


Figura 4-3 – Difratoograma de raios X da amostra de estéril

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

### a) Teor de Umidade

Os valores obtidos para as duas amostras foi de 0,2% de umidade média.

### b) Massa Específica dos Grãos

Para as amostras de rejeito e estéril, a massa específica dos grãos obtida nos ensaios foi de 2,65 g/cm<sup>3</sup> e 2,63 g/cm<sup>3</sup>. Valores condizentes com o peso específico do quartzo que é o principal mineral das amostras ensaiadas que é de 2,65 g/cm<sup>3</sup> conforme observado nos ensaios de análise química e mineralógica.

### c) Análise Granulométrica

Foram realizados dois ensaios para as amostras de rejeito e estéril, para a definição das curvas granulométricas e sua classificação. As amostras de rejeito foram classificadas como areia siltosa com vestígios de argila, e as amostras de estéril como pedregulho arenoso com porcentagem de finos menor que 5%. Não foi possível a realização de ensaios de limites de consistência, sendo as amostras classificadas como não plásticas. Conforme apresentado na Figura 4-4 e Tabela 4-1.

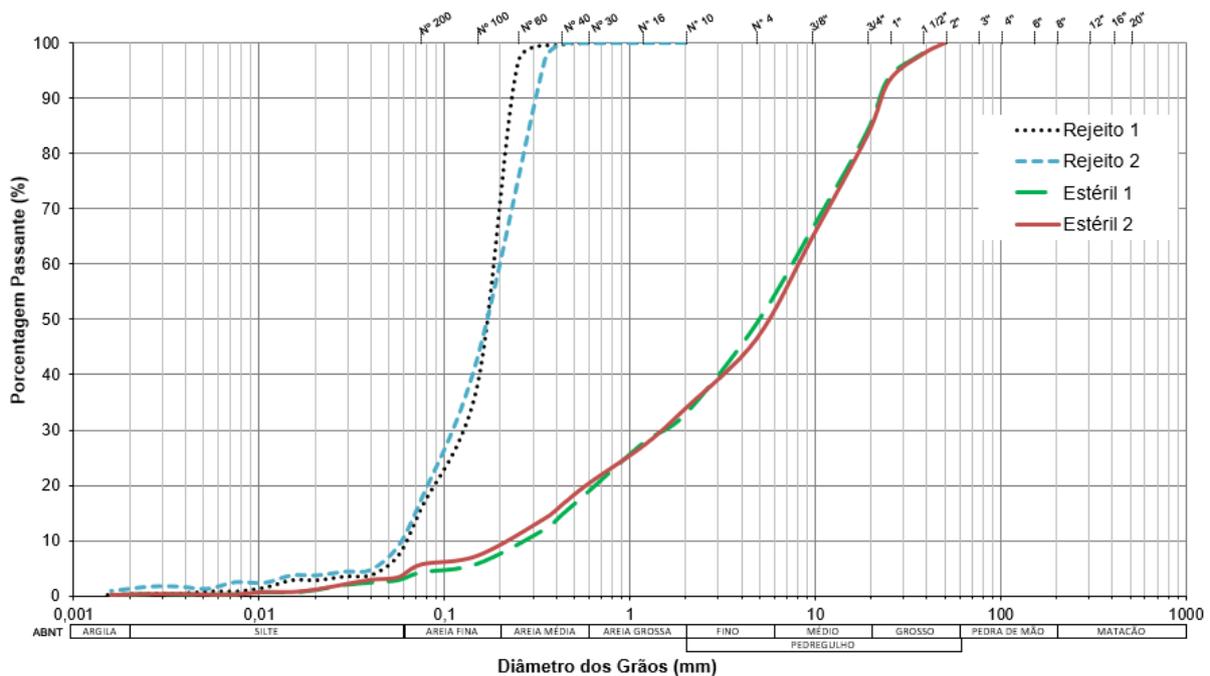


Figura 4-4 – Curva Granulométrica das amostras de rejeito e estéril

Tabela 4-1 – Classificação granulométrica do rejeito e estéril conforme ABNT (NBR 7.181/2016)

AMOSTRA		Rejeito 1	Rejeito 2	Estéril 1	Estéril 2
Argila (d < 0,002mm)		0,4	1,5	0,3	0,2
Silte (0,002 mm < d < 0,06mm)		8,9	9,5	3,7	4,3
Areia	Fina (0,06 mm < d < 0,2mm)	64,0	49,0	3,0	4,5
	Média (0,2 mm < d < 0,6mm)	27,0	40,0	11,9	11,4
	Grossa (0,6 mm < d < 2,0mm)	0	0	14,0	13,6
Pedregulho	Fino (2,0 mm < d < 6,0mm)	0	0	21,1	18,0
	Médio (6,0 mm < d < 20mm)	0	0	30,0	31,5
	Grosso (20 mm < d < 40mm)	0	0	16,0	16,5

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

#### 4.3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Na Tabela 4-2 constam os resultados das análises químicas das amostras de rejeito e estéril com suas respectivas concentrações.

Tabela 4-2 – Caracterização química das amostras de rejeito e estéril

Amostra	Rejeito	Estéril
Elemento	Concentração (%)	Concentração (%)
Alumínio	0,43	0,55
Cálcio	0,05	0,02
Ferro	0,93	0,89
Magnésio	0,07	0,03
Manganês	<0,01	<0,01
Sódio	0,04	0,04
Enxofre	0,06	<0,01
Titânio	0,02	0,010
Potássio	0,14	0,21
Prata	<0,0003	<0,0003
Arsênio	0,0004	<0,0001
Bário	0,0018	0,0013
Cromo	0,0036	0,0025
Cobre	0,0009	0,0005

Amostra	Rejeito	Estéril
Elemento	Concentração (%)	Concentração (%)
Níquel	0,0005	0,0007
Chumbo	<0,0008	<0,0008
Urânio	<0,002	<0,002
Zinco	0,0006	0,0009
CO <sub>2</sub>	0,07	0,06
SO <sub>2</sub>	0,07	0,01

As amostras de rejeito e estéril possuem porcentagem maior de alumínio, 0,43 e 0,55%, ferro, 0,93 e 0,89%, e potássio, 0,14 e 0,21%, respectivamente. Nota-se que a porcentagem de metais pesados como o arsênio, chumbo e zinco são muito baixas.

#### 4.3.2 DETERMINAÇÃO DO MÉTODO ESTÁTICO

Os resultados preliminares do pH da pasta para as amostras de rejeito e estéril, apresentaram valores de pH de 4,8 e 6,7, respectivamente. Com o valor de pH obtido para a amostra de rejeito, pode-se concluir que a amostra apresenta tendência para gerar ácido, ou esse valor baixo de pH é proveniente da presença de algum ácido anteriormente formado. O valor de pH obtido para a amostra de estéril indica que não há tendência para gerar ácido.

Segundo o teste de Fizz, as amostras de rejeito e estéril apresentaram o resultado 0 ou nenhuma efervescência, indicando o volume adequado de ácido (HCl 1,0 N) para o ensaio MABA.

Os resultados obtidos no ensaio MABA foram avaliados segundo o critério de Lawrence e Wang (1997) e são apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Resultado do balanço ácido base modificado (MABA)

Amostra	Enxofre total %	% C	Potencial de Neutralização (NP)	Potencial de Acidificação (AP)	Potencial de Neutralização Líquido	NPR =NP/AP
			(kg CaCO <sub>3</sub> /ton)	(kg CaCO <sub>3</sub> /ton)	(Net NP)	
Rejeito	0,07	0,07	0,0	2,2	-2,2	0,0
Estéril	0,01	0,05	0,27	0,31	-0,40	0,9

Nota-se que as amostras de estéril e rejeito ensaiadas tem pouca capacidade de neutralização, já que os valores de NP foram menores a 0,27 kg CaCO<sub>3</sub>/ton, e o teor de enxofre total é inferior a 0,01% e 0,07%. Observa-se também que a amostra de rejeito apresenta valor de Net NP igual a -2,2 kg CaCO<sub>3</sub>/ton, o que indica que a amostra se situa na zona de incerteza com relação ao potencial de geração de acidez, por outro lado, a amostra apresenta um valor de NPR (razão do potencial de neutralização) igual a zero e um teor de enxofre total igual a 0,07%, podendo assim classificar a amostra como potencialmente não geradora de acidez.

O mesmo é observado para a amostra de estéril, que apresenta valor de Net NP igual a -0,40 kg CaCO<sub>3</sub>/ton, NPR de 0,9 e enxofre total de 0,01%, sendo classificada como potencialmente não geradora de acidez.

#### **4.4 COLUNA DE LIXIVIAÇÃO – ANÁLISE DO LIXIVIADO**

Os parâmetros físico-químicos determinados nas amostras de lixiviado das colunas foram: pH, condutividade elétrica, alcalinidade total, acidez total e concentração de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

Com os valores obtidos nas análises semanais dos efluentes das colunas de lixiviação foram construídos gráficos mostrando o comportamento dos parâmetros analisados em função do tempo (semana) os quais serão discutidos nas figuras e tabelas a seguir.

A água destilada utilizada nos ensaios possui pH variando entre 6,70 e 7,80, condutividade elétrica variando de 1 a 4 µS/cm, alcalinidade total de 10,6 a 11,3 mg/l, acidez total de 5,0 a 5,6 mg/l e concentração de sulfato de 1,0 mg/l a 3,26 mg/l.

As Tabelas 4-4 e 4-5 apresentam as principais características das colunas de lixiviação que foram utilizadas nos ensaios.

A duração total dos ensaios de lixiviação foi de 8 semanas (56 dias), a cada semana foi percolado em cada coluna 1,0 l de água destilada. Em todas as colunas foi colocado aproximadamente 1,0 kg de massa seca total, para que ficasse a relação 1:1 de massa seca total e volume de água percolado em cada coluna.

Tabela 4-4 – Características das colunas de lixiviação – Massa de materiais nas colunas

Coluna	Massa seca de rejeito (g)	Massa seca de estéril (g)	Massa seca de cal (g)	Massa seca total (g)	Tipo de cobertura (proporção em massa seca)
C1	1.002,29	-	-	1.002,29	-
C2	1.000,91	-	-	1.000,91	-
C3	-	1.002,82	-	1.002,82	-
C4	-	1.001,82	-	1.001,82	-
C5	-	1.002,2	20,13	1.022,33	estéril (98%) + cal (2%)
C6	-	1.000,12	40,02	1.040,14	estéril (96%) + cal (4%)
C7	800,33	200,08	4,07	1.004,48	estéril (98%) + cal (2%)
C8	600,24	400,12	8,02	1.008,38	estéril (98%) + cal (2%)
C9	800,14	200,51	8,03	1.008,68	estéril (96%) + cal (4%)
C10	600,08	400,24	16,06	1.016,38	estéril (96%) + cal (4%)

Tabela 4-5 – Características das colunas de lixiviação – Altura de materiais, volume total percolado e massa específica

Coluna	Altura inicial (cm)				Volume total percolado (L)	Massa específica total (g/cm <sup>3</sup> )
	Camada de rejeito	Camada de estéril	Camada de cobertura	Total inicial		
C1	9,2	-	-	9,2	8,0	1,39
C2	9,3	-	-	9,3	8,0	1,37
C3	-	7,6	-	7,6	8,0	1,68
C4	-	7,7	-	7,7	8,0	1,66
C5	-	-	7,0	7,0	8,0	1,86
C6	-	-	8,0	8,0	8,0	1,66
C7	7,5		1,1	8,6	8,0	1,49
C8	5,6		2,2	7,8	8,0	1,65
C9	7,9		1,5	9,4	8,0	1,37
C10	5,1		3,6	8,7	8,0	1,49

Durante a execução dos ensaios não foi observada a colmatação do geotêxtil utilizado como filtro, nem vazamentos de água e carreamento de material nas interfaces do filtro com os tubos de PVC das colunas. Nas colunas C4, C7 e C9 foi observada a perda de material fino no lixiviado obtido em todas as semanas de ensaios, essa perda total de material foi quantificada e foi de aproximadamente 10 g.

A seguir serão apresentados os resultados das análises físico-químicas do lixiviado, primeiramente serão discutidos os resultados obtidos com os ensaios das colunas C1, C2, C3 e C4, que serviram como referência para análise das outras colunas. Em seguida serão apresentados os resultados das demais colunas.

Os resultados da concentração de alguns metais no lixiviado, também serão apresentados e discutidos, dentre eles os considerados importantes no processo de verificação da DAM (Al, Fe, Mn e Zn) e o Ca devido a sua capacidade em neutralizar ácidos, e alguns metais pesados e/ou potencialmente tóxicos (As, Ba, Cd, Co, Pb e U). A influência da utilização da cal virgem associada ao estéril na camada de cobertura foi analisada como mitigação para a geração da DAM.

Todos os resultados obtidos para os lixiviados foram verificados de acordo com os padrões estabelecidos para o lançamento de efluentes da Resolução CONAMA 430/2011 para avaliar a qualidade das alternativas propostas para os sistemas de cobertura.

#### **4.4.1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO LIXIVIADO**

##### **a) pH (Potencial Hidrogeniônico)**

O pH (potencial hidrogeniônico) representa a concentração de íons hidrogênio numa amostra, e fornece uma indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade do meio (von Sperling, 2008).

O pH controla a precipitação dos metais por sua capacidade (concentração de H<sup>+</sup> nas águas) para atacar os minerais das rochas, solos e sedimentos, induzindo e/ou solubilizando seus constituintes.

A Figura 4-5 apresenta os resultados de pH obtidos durante as semanas de realização dos ensaios para o lixiviado das colunas C1, C2, C3 e C4.

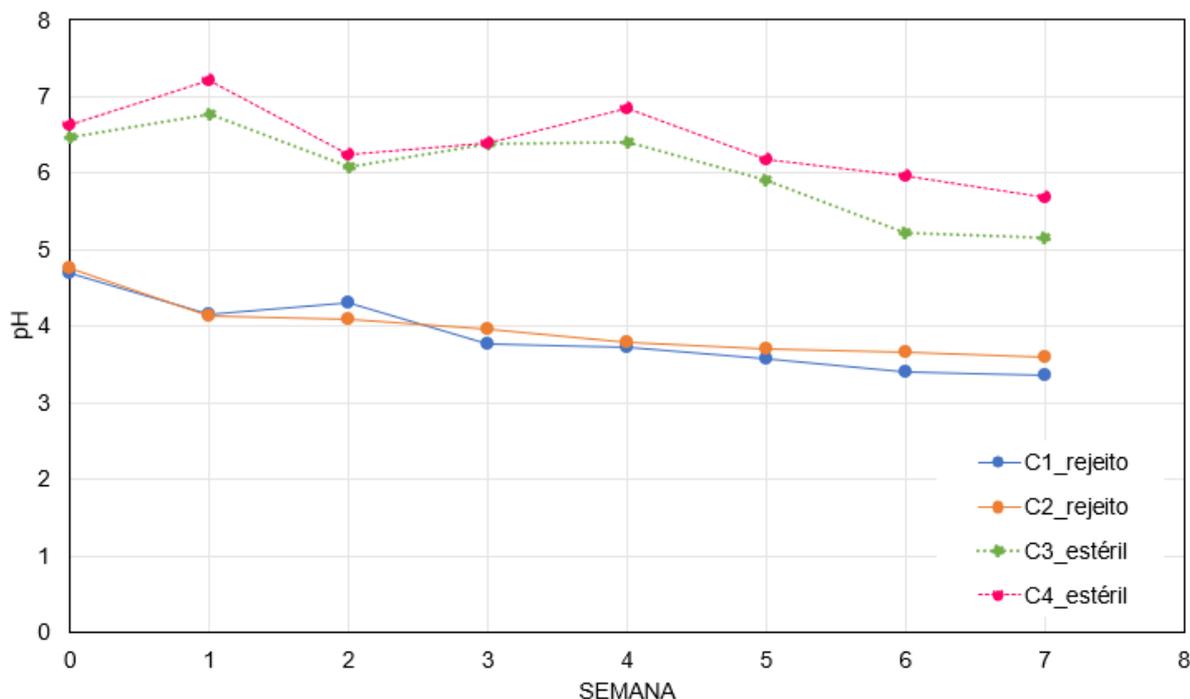


Figura 4-5 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C1, C2, C3 e C4

Os resultados obtidos no lixiviado das colunas C1 e C2, preenchidas com amostra de rejeito, apresentaram praticamente o mesmo resultado, indicando a homogeneidade das amostras ensaiadas. Os valores de pH indicam que as amostras em contato com a água destilada possuem comportamento ácido ( $\text{pH} < 7$ ), com pH de aproximadamente 4,7, e ao longo dos ensaios apresentaram resultados descendentes chegando à aproximadamente 3,4. Esse caráter ácido pode ser devido à hidrólise e precipitação de ferro presente na goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) identificada na análise mineralógica do rejeito.

Os resultados obtidos no lixiviado das colunas C3 e C4, preenchidas com amostra de estéril, apresentaram a mesma tendência de leituras, mas não leituras coincidentes como ocorreu com as leituras das colunas C1 e C2. Os valores de pH apresentam comportamento oscilante, no início do ensaio apresentaram valores próximos de 6,5, praticamente com caráter neutro, na segunda semana de ensaio as leituras mais elevadas de pH de 7,2 e 6,8. Isso pode ser devido a um material presente nas amostras de estéril que não foi identificado no ensaio de mineralogia que em contato com a água aumentou o pH do meio.

A Figura 4-6 apresenta a comparação dos resultados de pH obtidos para as amostras de estéril (colunas C3 e C4) e para as amostras de Cobertura 1 (C5) e Cobertura 2 (C6).

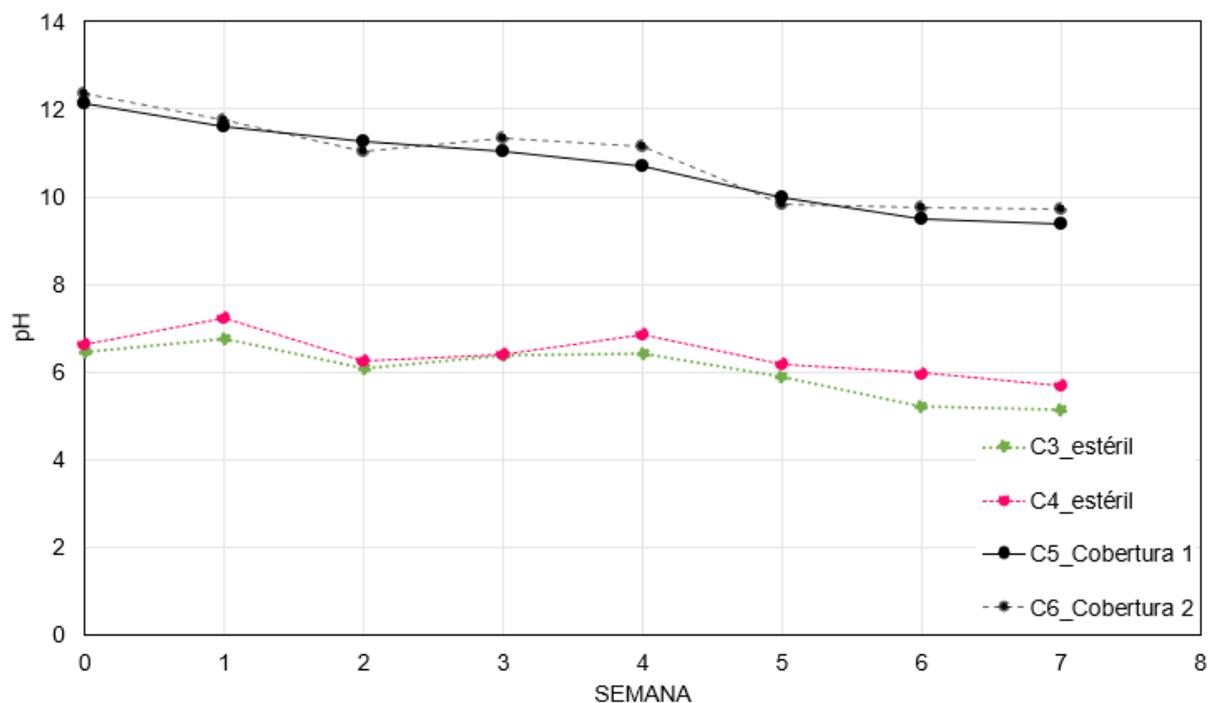


Figura 4-6 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C3, C4, C5 e C6

As colunas C5 e C6 preenchidas, respectivamente, com Cobertura 1 (98% estéril + 2% de cal) e Cobertura 2 (96% estéril + 4% de cal), nota-se uma expressiva elevação do pH, de aproximadamente 50%, em relação as amostras das colunas C3 e C4, preenchidas com estéril. A cal foi utilizada por ser um composto com baixo custo operacional, reagir rapidamente no sistema empregado, ser solúvel e por ser utilizada de maneira eficiente em tratamentos de drenagem ácida (Mello *et. al*, 2014).

Observa-se também que para as colunas C5 e C6, os valores de pH obtidos são muito próximos ao longo de todo o ensaio, indicando que o acréscimo de 2% ou 4% de cal no estéril não influenciaram no valor do pH. Os valores obtidos na primeira semana de ensaio foram em torno de 12,2, apresentando tendência decrescente ao longo do tempo, atingindo pH de aproximadamente 9,5 na última semana de ensaio.

A Figura 4-7 apresenta a comparação dos resultados de pH obtidos para as amostras de rejeito (C1), de estéril (C3), Cobertura 1 (C5) e para as colunas compostas por rejeito e Cobertura 1 (C7 e C8).

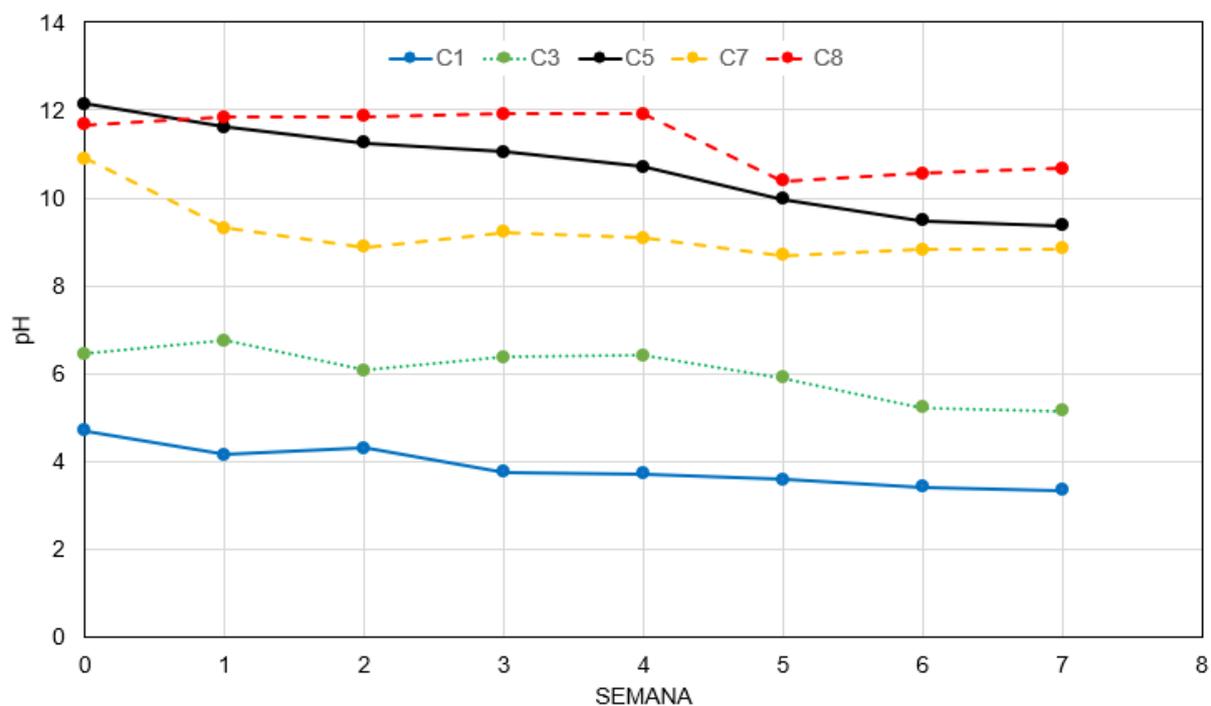


Figura 4-7 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C5, C7 e C8

Nota-se que a coluna C7 que foi preenchida com 80% de rejeito e 20% de Cobertura 1 (estéril + 2% de cal) apresenta valores de pH de 10,9 (início) e 8,85 (fim) durante as 8 semanas de ensaios. Em comparação aos valores obtidos para a C1 (somente com rejeito) na Semana 0 de ensaio, aumentaram em torno de 2,3 vezes, e para a C3 (somente com estéril) aumentaram em torno de 1,7 vezes. E na coluna C8 preenchida com 60% de rejeito e 40% de Cobertura 1, em comparação a C1 esse valor aumentou em torno de 2,5 vezes e a C3 de 1,8 vezes.

Para os ensaios na coluna C7, observa-se que os valores de pH decresceram na Semana 1 de ensaio, nas semanas seguintes as leituras permanecem constantes com valores próximos de pH = 9,0.

Para os ensaios na coluna C8, na Semana 0 de ensaio o valor obtido de 11,7 é menor que o obtido para a coluna C5 (somente com Cobertura 1), mas a partir da Semana 1 o pH aumenta para cerca de 11,9 até a Semana 4. A partir da Semana 5, o pH diminui para 10,4, em seguida apresenta comportamento levemente ascendente com leitura final de 10,7.

A Figura 4-8 apresenta a comparação dos resultados de pH obtidos para as amostras de rejeito (C1), de estéril (C3), Cobertura 2 (C6) e para as colunas compostas por rejeito e Cobertura 2 (C9 e C10).

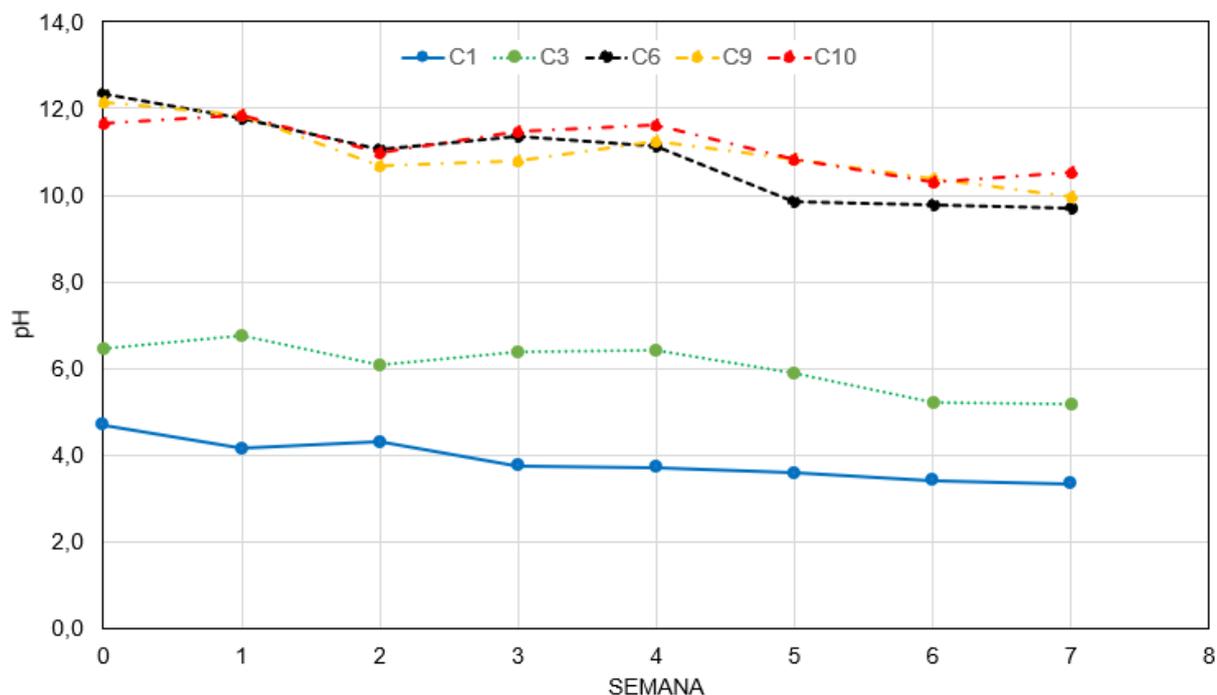


Figura 4-8 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C6, C9 e C10

Nota-se que a coluna C9 que foi preenchida com 80% de rejeito e 20% de Cobertura 2 (estéril + 4% de cal) apresenta valores de pH de 12,1 (início) e 10,0 (fim) durante as 8 semanas de ensaios. Em comparação aos valores obtidos para a C1 na Semana 0 de ensaio, aumentaram em torno de 2,6 vezes, e para a C3 aumentaram em torno de 1,9 vezes.

Para a coluna C10, preenchida com 60% de rejeito e 40% de Cobertura 2, os valores obtidos nas primeiras semanas foram mais baixos que os obtidos para a C9, e a partir da terceira semana de ensaio (Semana 2) os valores diminuem menos do que o observado para a C9, possuindo um comportamento ascendente até atingir 11,6 na semana 4. Depois apresentou comportamento descendente até finalizar com pH igual a 10,4.

Observa-se que as leituras realizadas nas amostras de lixiviado obtidas nas colunas C9 e C10 foram muito próximas, diferente do observado para as colunas C7 e C8 (Figura 4-7).

Ao comparar os gráficos das Figuras 5-6, 5-7 e 5-8, pode-se afirmar que a proporção entre a camada da cobertura e a camada de rejeito tem influência maior nas leituras de pH do que a porcentagem de cal na camada de cobertura.

A Figura 4-8 apresenta a comparação dos resultados de pH obtidos para o lixiviado das colunas preenchidas por rejeito e Cobertura 1 (C7 e C8), e rejeito e Cobertura 2 (C9 e C10).

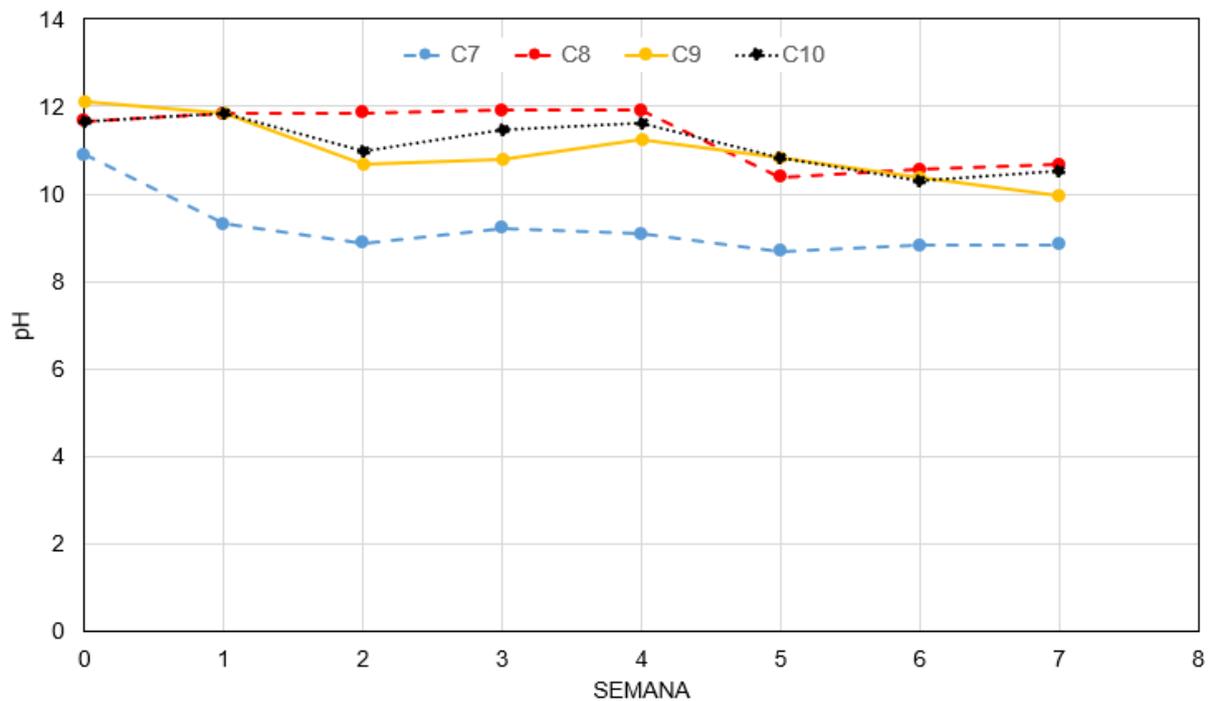


Figura 4-9 – Leituras de pH das soluções lixiviadas das colunas C7, C8, C9 e C10

## b) CE (Condutividade Elétrica)

A Figura 4-10 apresenta a variação da condutividade elétrica (CE) para as colunas C1, C2, C3 e C4 ao longo das 8 semanas de ensaios. Como a condutividade elétrica é diretamente proporcional aos íons dissolvidos em solução, e os valores obtidos para o lixiviado das amostras de rejeito e estéril são baixos, abaixo de  $1.600 \mu\text{S}/\text{cm}$ , pode-se dizer que há poucos íons dissolvidos nessas soluções. Para se ter como base, a água destilada utilizada para a lixiviação das colunas possui  $1$  a  $4 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

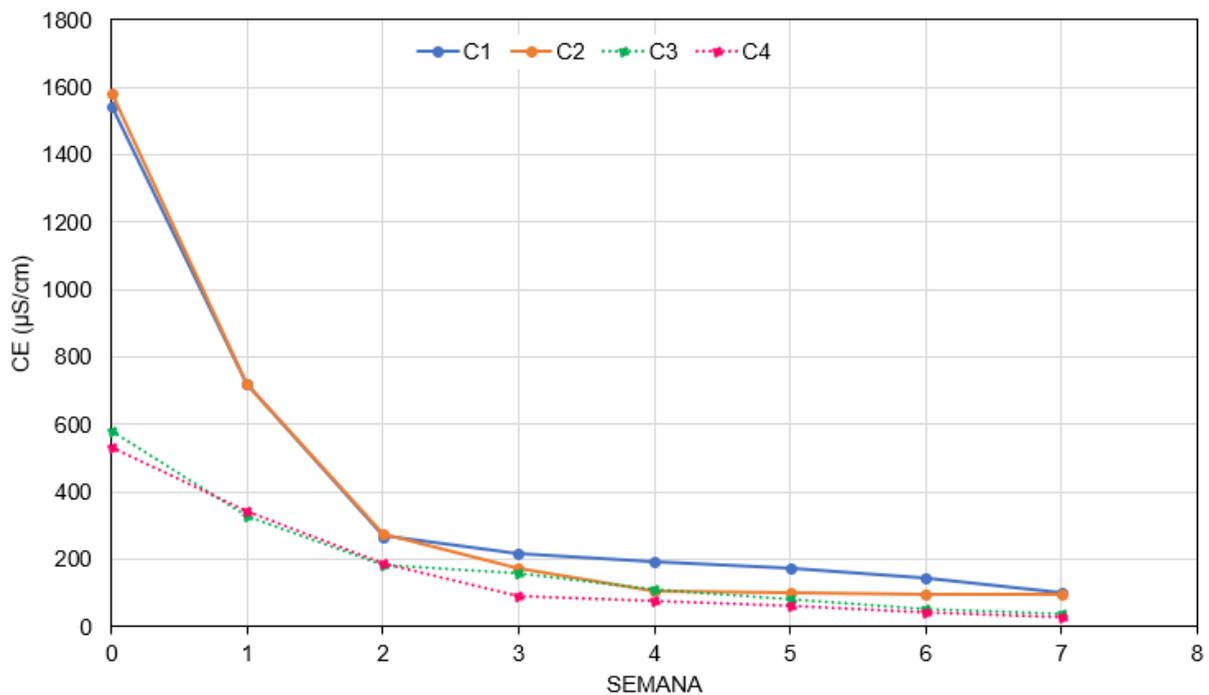


Figura 4-10 – Leituras de CE das soluções lixiviadas das colunas C1, C2, C3 e C4

Nota-se que a condutividade elétrica do lixiviado das colunas C1 e C2, com amostras de rejeito, decresce acentuadamente, de 1.560 para 270  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , nas duas primeiras semanas de ensaio, com liberação maior de íons para as soluções. A partir da Semana 3 apresentaram decréscimo pequeno dos valores das leituras e logo atingiu a estabilização com valores de 102 e 95  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ao final do ensaio.

As colunas C3 e C4 apresentaram valores baixos para as leituras iniciais, sendo iguais a 581 e 533  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente, com decaimento maior observado nas três primeiras semanas de ensaios, atingindo valores de 109 e 77  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Após a quarta semana de ensaio houve pouca variação nas leituras de CE estabilizando a 36 e 29  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na última semana de ensaio.

A Figura 4-11 apresenta a variação da condutividade elétrica (CE) para as colunas C3, C4, C5 e C6 ao longo das 8 semanas de ensaios. Nota-se que com o acréscimo de cal nas amostras de rejeito das colunas C5 e C6 as leituras de CE aumentam significativamente, a valores acima de 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (valor limite de leitura do aparelho), esse aumento de liberação de íons na solução está relacionada à liberação de íons  $\text{Ca}^+$  na solução. Até a quarta semana de ensaio nota-se uma queda brusca dos valores de CE, isso se deve à redução da concentração de íons  $\text{Ca}^+$  nas soluções, apresentando leituras de 160 e 191  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

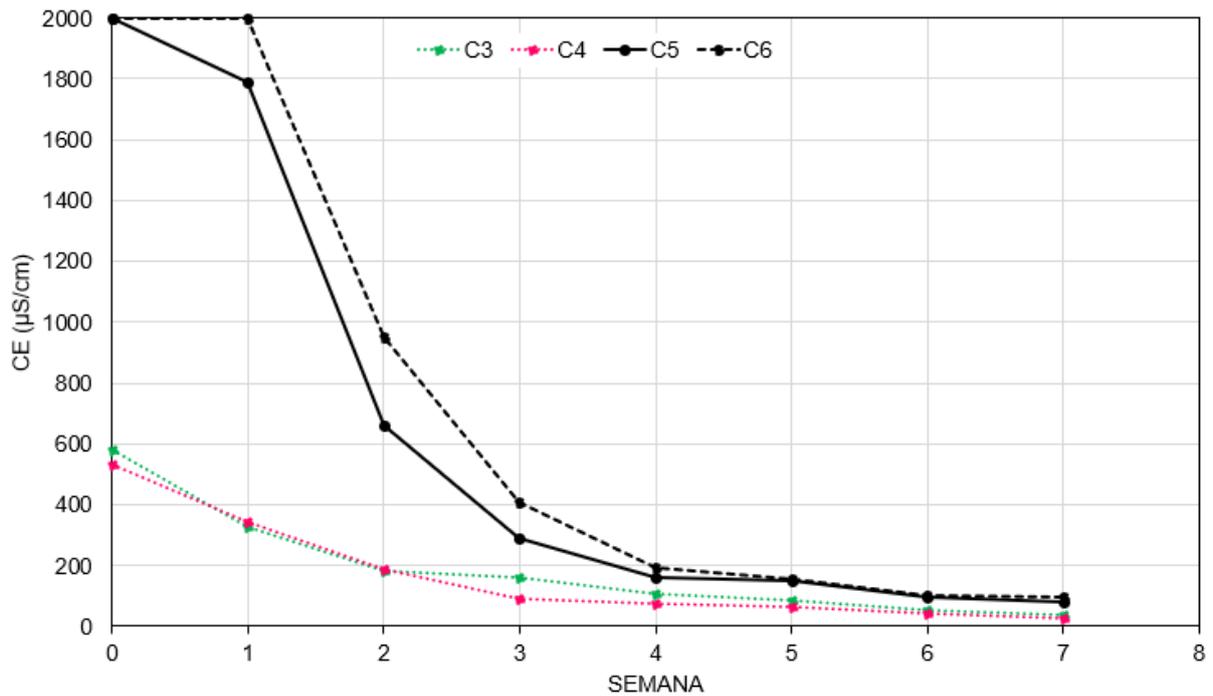


Figura 4-11 – Leituras de CE das soluções lixiviadas das colunas C3, C4, C5 e C6

A Figura 4-12 apresenta a variação da condutividade elétrica (CE) para as colunas C1, C3, C5, C7 e C8 ao longo das 8 semanas de ensaios.

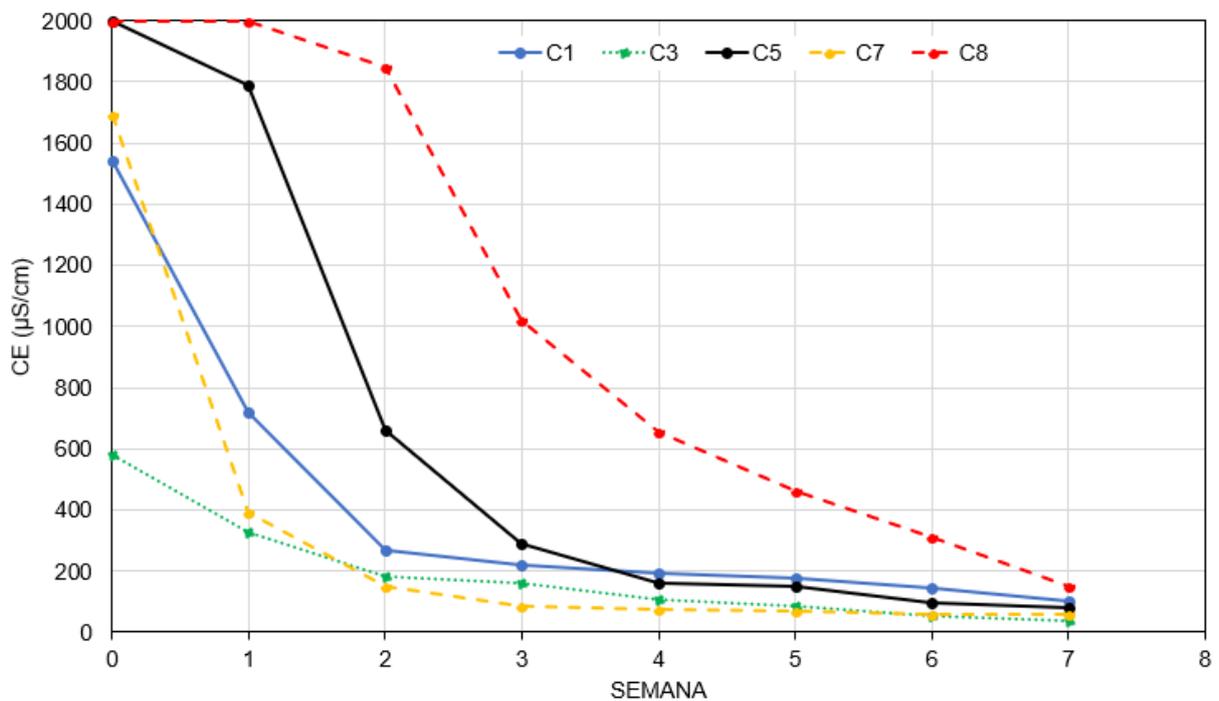


Figura 4-12 – Leituras de CE das soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C5, C7 e C8

Observando os resultados da coluna C8 nota-se que as leituras durante todo o ensaio foram mais elevadas que as leituras do lixiviado da coluna C5, preenchida com 100% de Cobertura 1, apresentando um comportamento diferente do esperado, já que essa amostra é composta somente por 40% de Cobertura 1.

As leituras de CE da coluna C7 também apresentaram comportamento não esperado, uma vez que apresentou valores menores que as leituras do lixiviado da coluna C3 (estéril), esperava-se resultados mais elevados devido à presença de cal na camada de Cobertura 1 amostrada na coluna C7.

A Figura 4-13 apresenta a variação da condutividade elétrica (CE) para as colunas C1, C3, C6, C9 e C10 ao longo das 8 semanas de ensaios.

Nota-se para esses ensaios que o comportamento das leituras de lixiviado das colunas C9 e C10 apresentou o comportamento esperado. Nas duas primeiras leituras efetuadas do ensaio apresentaram valores superiores a 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , em seguida há uma queda brusca das leituras até aproximadamente 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Observa-se que a liberação de íons no lixiviado da coluna C10 ocorreu de forma mais lenta que o observado para o lixiviado das colunas C6 e C9, o que sugere que se o ensaio for estendido por mais semanas ele atinja o mesmo valor observado para essas colunas.

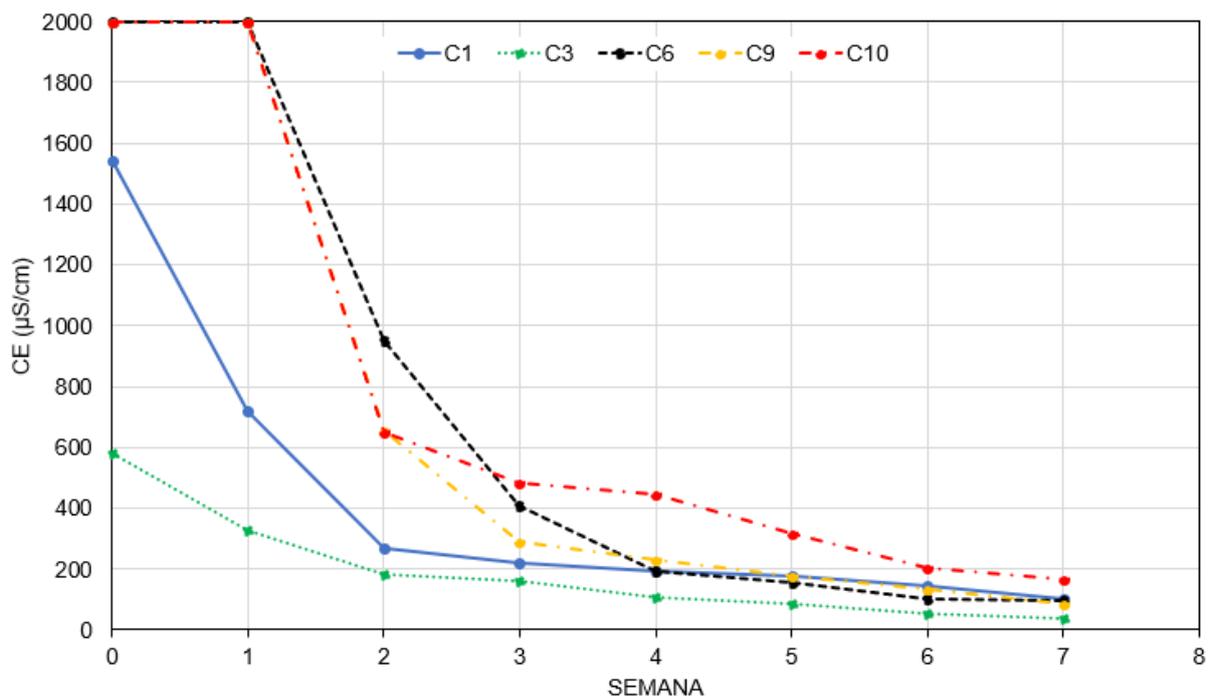


Figura 4-13 – Leituras de CE das soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C6, C9 e C10

#### 4.4.2 PARÂMETROS QUÍMICOS DO LIXIVIADO

##### a) Concentração de Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

A Figura 4-14 apresenta a variação da concentração de sulfato no lixiviado das colunas C1, C3 e C4 ao longo das 8 semanas de ensaios.

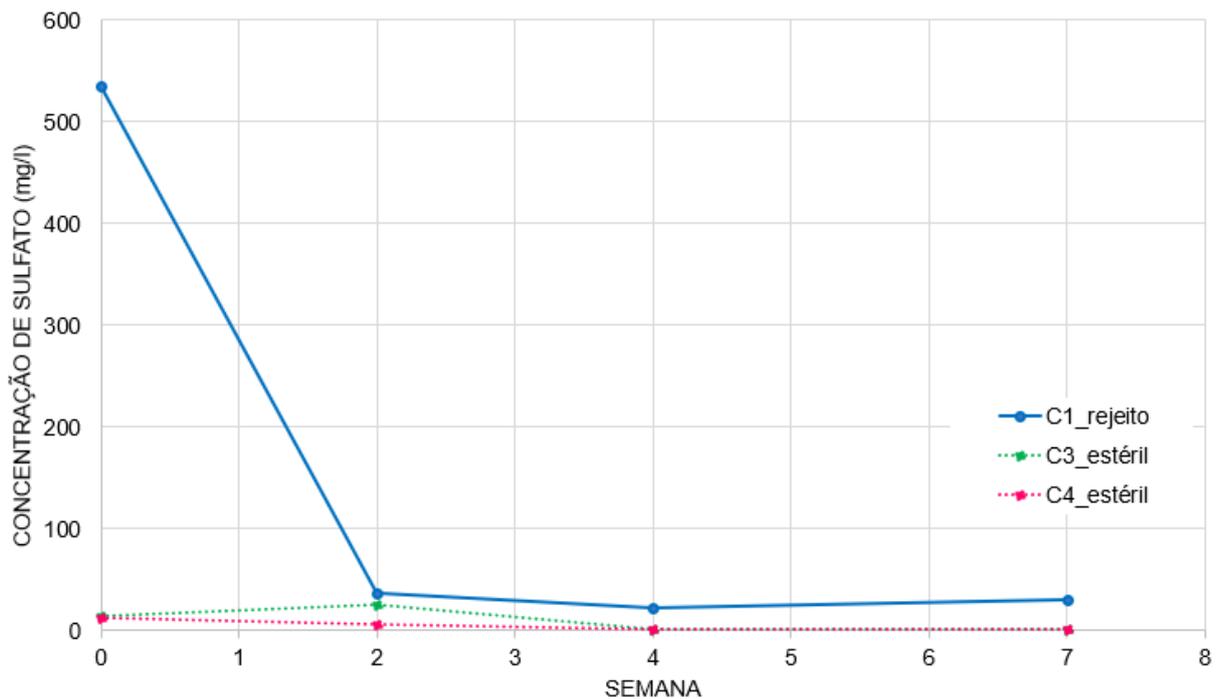


Figura 4-14 – Evolução da concentração de sulfato para as colunas C1, C3 e C4

Nos resultados obtidos para a coluna C1, houve uma queda na leitura inicial para a leitura efetuada na segunda semana de ensaio, passando de 534,92 mg/l para 37,29 mg/l. Nas leituras efetuadas na quarta e sétima semana nota-se que as leituras apresentou comportamento constante. Os valores baixos de concentração de sulfato na amostra de rejeito lixiviada indica que esse material não apresenta característica para geração de drenagem ácida.

Observa-se que para os lixiviados das colunas C3 e C4, a concentração de sulfato obtida foi muito baixa com valores máximos de 26,38 e 12,53 mg/l.

A Figura 4-15 apresenta a variação da concentração de sulfato no lixiviado das colunas C3, C4, C5 e C6 ao longo das 8 semanas de ensaios.

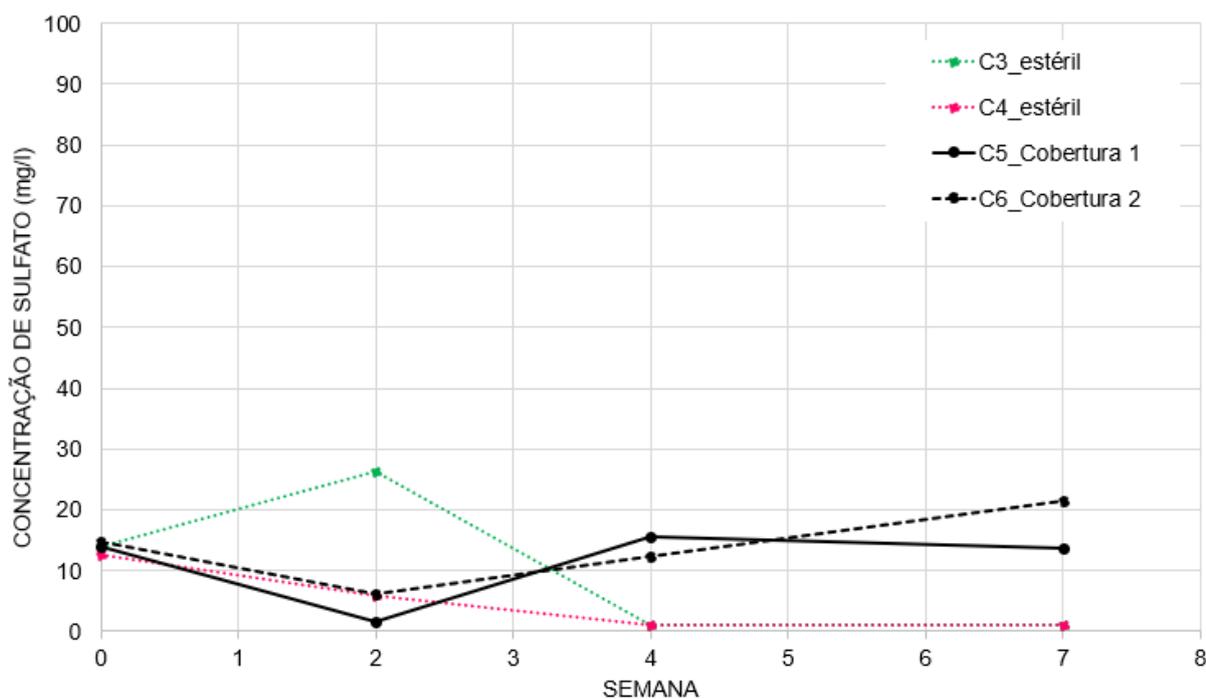


Figura 4-15 – Evolução da concentração de sulfato para as colunas C3, C4, C5 e C6

Nota-se que a presença de cal nas amostras das colunas C5 e C6 modificaram o comportamento das leituras de concentração de sulfato apresentando uma leve tendência de aumento após a segunda semana de ensaio. Porém as leituras permaneceram baixas, com picos de 15,44 mg/l para C5 e 21,56 mg/l para C6.

A Figura 4-15 apresenta a comparação da concentração de sulfato no lixiviado das colunas C1, C4, C5, C7 e C8, e a Figura 4-17 para as colunas C1, C4, C6, C9 e C10.

Nota-se que a porcentagem em massa de rejeito presente nas colunas C7 e C8 condicionam a concentração de sulfato nas amostras de lixiviado, uma vez que na coluna C7 tem 80% de rejeito, e na coluna C8 tem 60% de rejeito. Por isso observa-se que as curvas obtidas para C1, C7 e C8 apresentam a mesma tendência.

Já a amostra de rejeito que foi inserida na coluna C9 pode ser composta por um material com maior concentração de sulfetos do que a amostra ensaiada na C1, por isso foram observadas leituras mais elevadas no início do ensaio. No entanto, ensaios adicionais devem ser realizados para confirmar esta hipótese.

Observa-se que a porcentagem de cal nas amostras das colunas C7, C8, C9 e C10, não influencia na concentração de sulfato nos lixiviados obtidos.

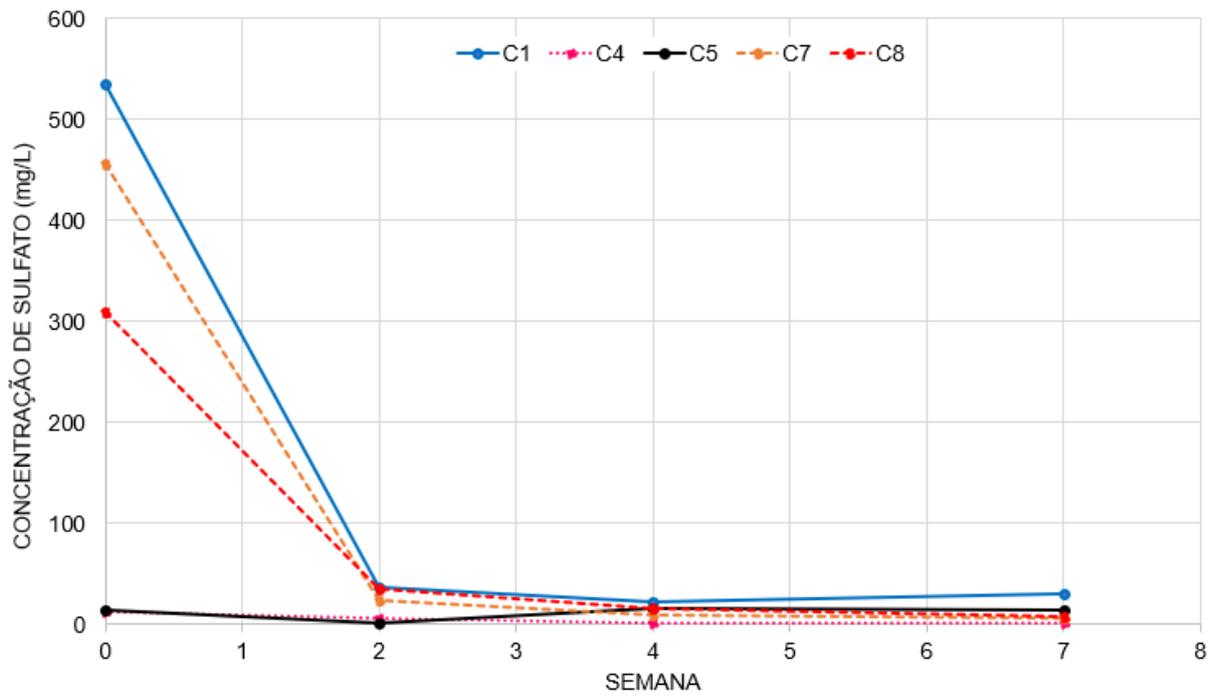


Figura 4-16 – Evolução da concentração de sulfato para as colunas C1, C4, C5, C7 e C8

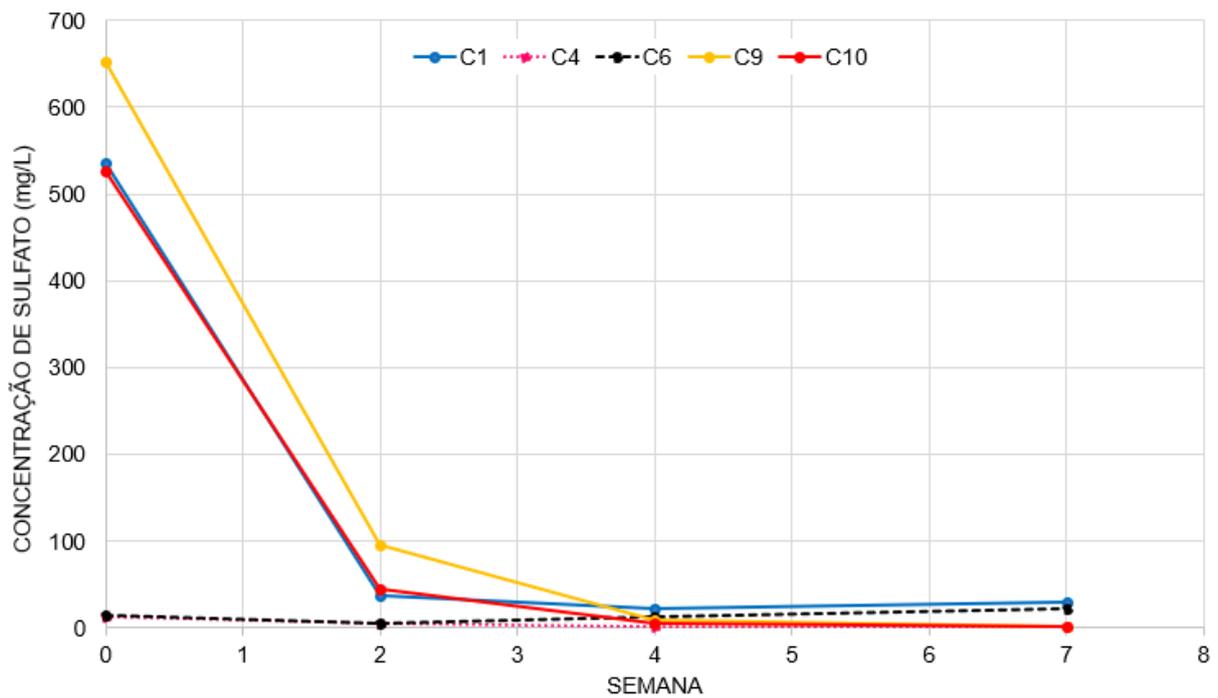
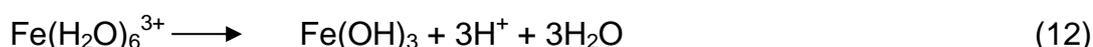
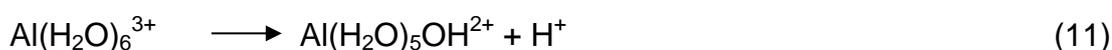


Figura 4-17 – Evolução da concentração de sulfato para as colunas C1, C4, C6, C9 e C10

## b) Acidez e Alcalinidade Total

A acidez pode ser definida como a capacidade da água para neutralizar íons  $\text{OH}^-$ , sendo que os contribuintes de maior importância para a acidez, do ponto de vista da poluição, são os ácidos forte. A drenagem ácida de mina é um exemplo de contaminação de corpos d'água por ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) livre em decorrência dos minerais sulfetados. Porém, o caráter ácido de alguns íons metálicos hidratados presentes nas amostras de rejeito e estéril, também pode contribuir para a acidez como mostram as equações a seguir (Manaham, 1994):



A Figura 4-18 apresenta o resultados dos ensaios realizados de acidez total das amostras de lixiviado de todas as colunas ensaiadas.

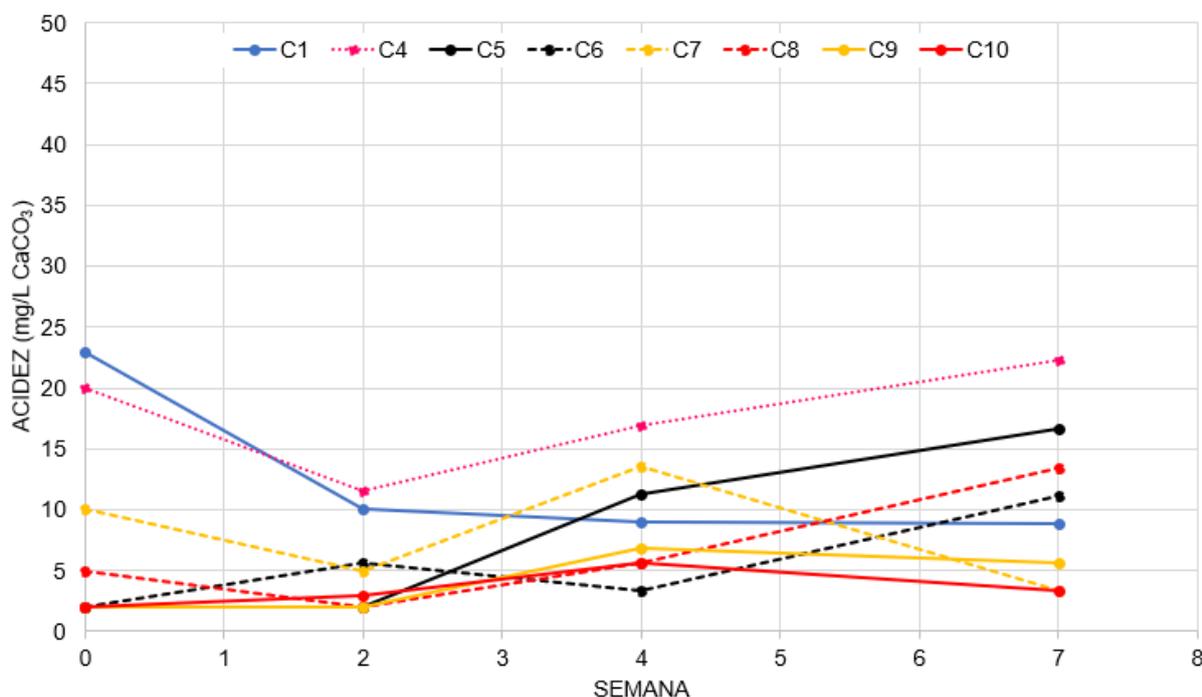


Figura 4-18 – Leituras da acidez dos lixiviados das colunas

Observa-se que as leituras realizadas para o lixiviado da coluna C1, contendo amostra do rejeito, exibiu um comportamento de queda ao longo do ensaio, com leitura máxima de 23,0 mg/l  $\text{CaCO}_3$  e mínima de 8,9 mg/l  $\text{CaCO}_3$ .

As leituras de acidez total obtida para todos os lixiviados ensaiados não apresentaram comportamento ácido, sendo assim, os materiais ensaiados nas colunas de lixiviação não possuem potencial para geração de drenagem ácida.

Segundo Guimarães (2005), a alcalinidade pode ser definida como a capacidade da água em neutralizar ácidos, sendo uma consequência direta da presença ou ausência dos íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). A alcalinidade também pode ser influenciada pela presença de boratos ( $\text{BO}_4^{2-}$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4^{2-}$ ) e silicatos ( $\text{SiO}_4^{2-}$ ). Portanto, minerais carbonatados podem atuar como tampões, elevando o valor do pH das soluções lixiviadas.

A Figura 4-19 apresenta os resultados de alcalinidade total das amostras do lixiviado das colunas. Nota-se que os valores elevados de alcalinidade no primeiro ensaio das amostras das colunas C5, C6, C9 e C10 são devidos à presença de cal nas amostras ensaiadas. Esses valores decaem bruscamente no segundo ensaio realizado nas amostras coletadas na segunda semana de ensaio.

Já para o primeiro ensaio das colunas C7 e C8, não foi observado valores elevados de alcalinidade total. Portanto a cal presente nessas amostras não influenciou esse resultado, o comportamento difere do que se esperava para essas amostras, uma vez que esperava-se resultados próximos aos obtidos para as colunas C9 e C10.

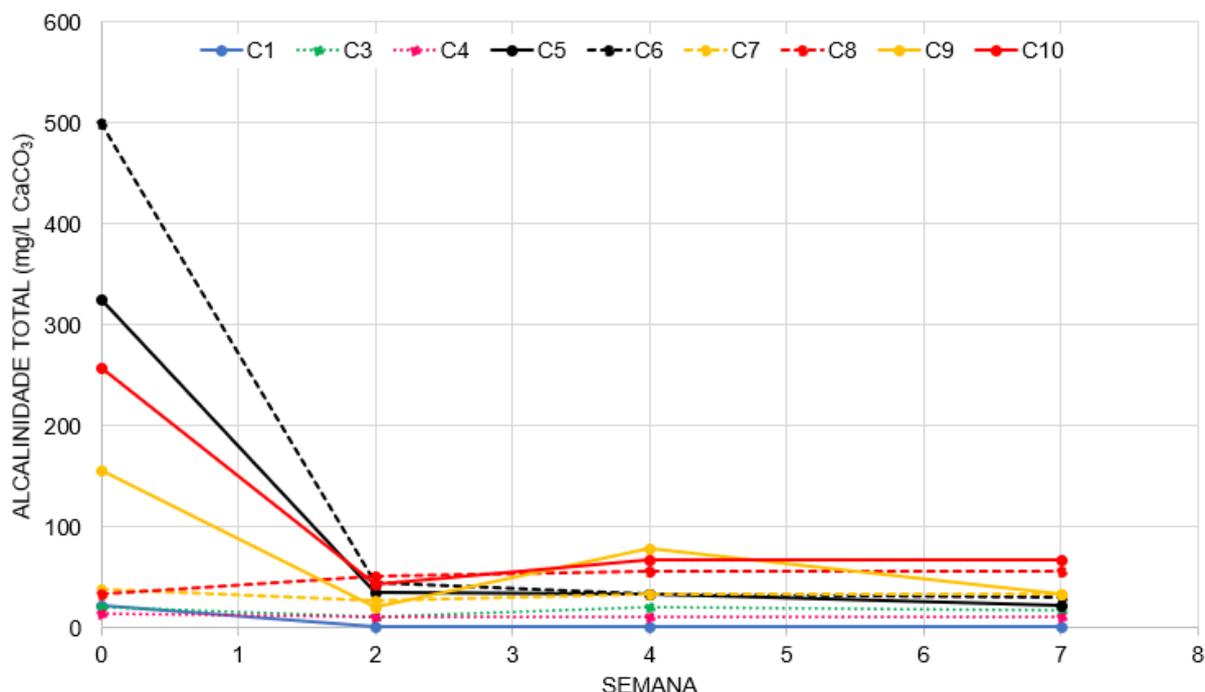


Figura 4-19 – Leituras da alcalinidade total dos lixiviados das colunas

#### 4.4.3 CONCENTRAÇÃO DE METAIS

As amostras de lixiviado coletadas nos ensaios foram analisadas no ICP-OES, no qual foram determinadas as concentrações de 40 elementos químicos: Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Se, Si, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr.

Para determinar a qualidade do lixiviado das colunas, foi utilizado o Padrão de Qualidade de Lançamento de Efluentes mencionado na Resolução CONAMA 430 do (CONAMA, 2013). A Tabela 4-6 apresenta os padrões para lançamento de efluentes para os seguintes metais: As, Ba, Cd, Pb, Fe, Mn e Zn.

Tabela 4-6 – Padrão de Qualidade do Lixiviado

Lançamento de Efluentes	CONAMA 430/2011	ENSAIO
Parâmetros Inorgânicos	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo obtido (mg/l)
Arsênio total	0,5	1,3 (estéril)*
Bário total	5,0	< 5,0
Cádmio total	0,2	0,12 (estéril)
Chumbo	0,5	< 0,08
Ferro dissolvido	15,0	8,9
Manganês dissolvido	1,0	4,1 (rejeito)**
Zinco total	5,0	0,48 (rejeito)

\* A partir da Semana 2, valores < 0,1 mg/L

\*\* A partir da Semana 1, valores < 0,16 mg/L

As concentrações de Al, Fe, Mn e Zn obtidas para o lixiviado obtido ao longo do ensaio para todas as colunas ensaiadas foram relativamente baixos com valores abaixo dos limites de detecção do equipamento utilizado nos ensaios, sendo para o Al e Fe abaixo de 0,5 mg/l, para o Mn abaixo de 0,01 mg/l e para o Zn abaixo de 0,05 mg/l.

Os demais metais apresentaram limite de detecção abaixo da capacidade do equipamento e encontram-se dentro dos padrões definidos na Resolução 430 do CONAMA.

A Figura 4-20 apresenta as variações das concentrações de cálcio para as soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9 e C10.

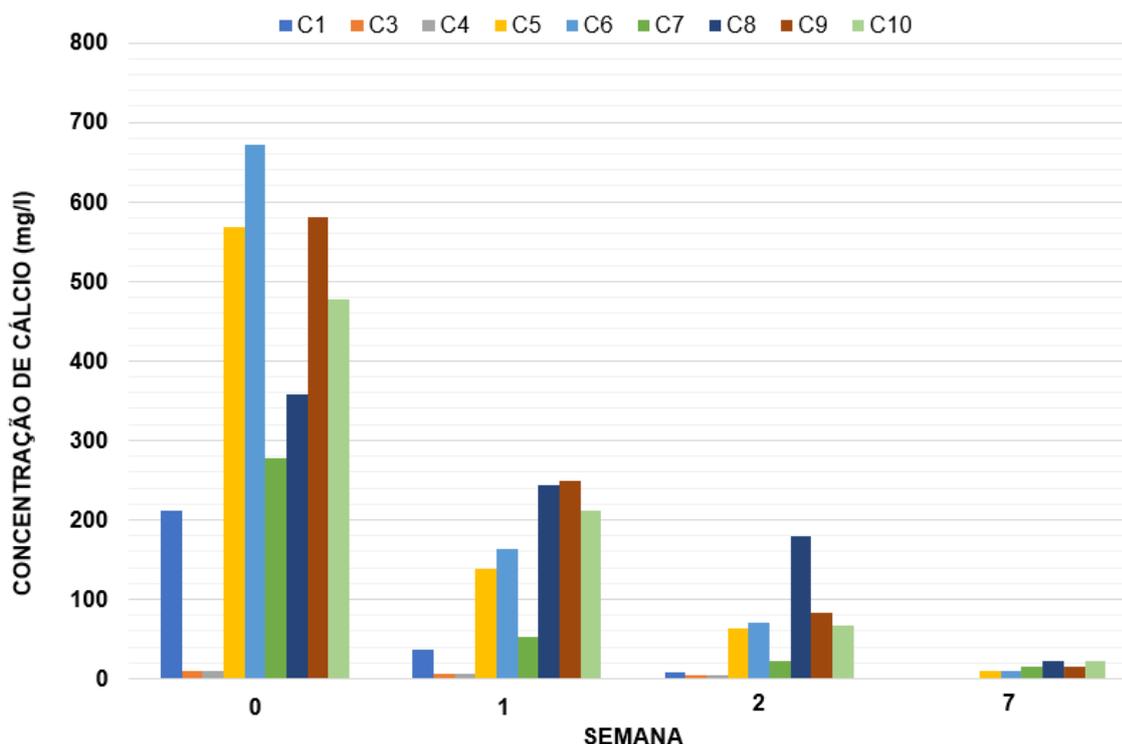


Figura 4-20 – Variação das concentrações de cálcio nas colunas

Percebe-se que as colunas que apresentaram maior concentração de cálcio são as colunas que contem cal virgem nas amostras ensaiadas, sendo que a coluna C6 apresentou as maiores concentrações de lixiviação de cálcio, sendo de 672,26 mg/l. Era esperado esse comportamento, devido a presença de cal em maior proporção nessa amostra do que nas outras colunas.

Para a coluna C8, a lixiviação de cálcio ocorreu de forma mais suave do que para as outras colunas, necessitando de um número maior de lixiviações para reduzir a concentração de cálcio no mesmo patamar das outras amostras.

A Figura 4-21 apresenta as variações das concentrações de enxofre para as soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9 e C10.

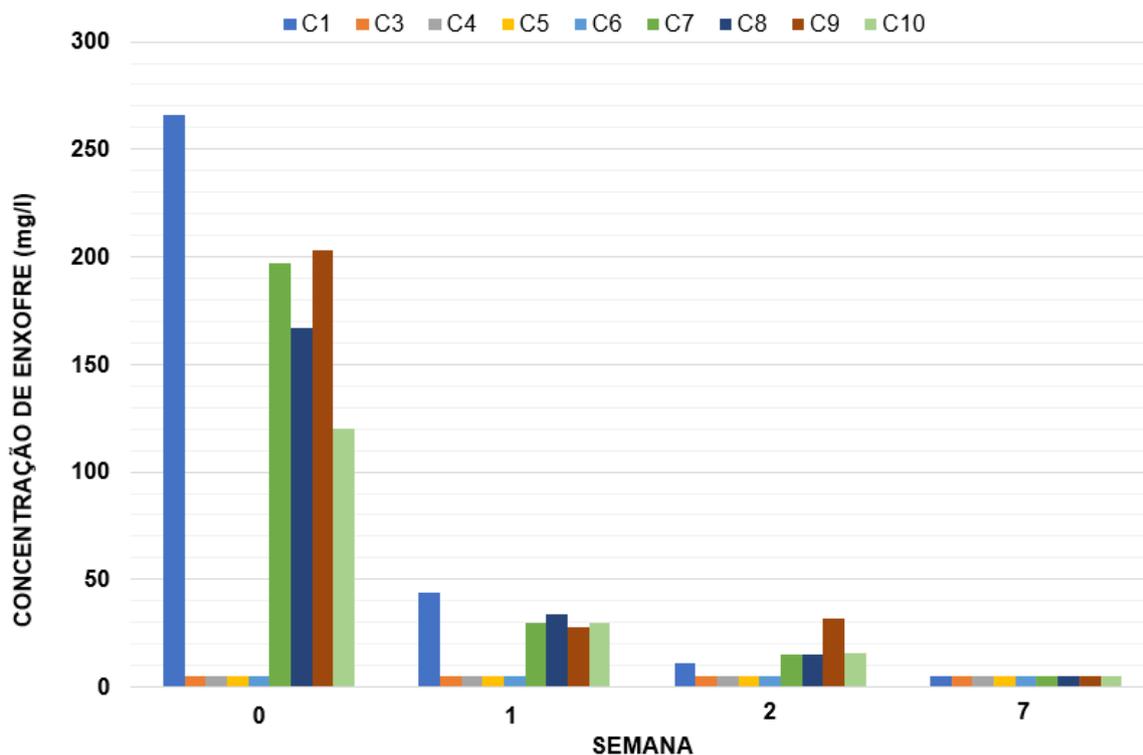


Figura 4-21 – Variação das concentrações de enxofre nas colunas

Nota-se que as colunas que apresentou maior concentração de enxofre são as colunas que contem rejeito, colunas C1, C7, C8, C9 e C10. Sendo a maior concentração observada na coluna C1, igual a 266 mg/l, na Semana 0. Na Semana 1 o valor decresce para 44 mg/l, na Semana 2 para 11 mg/l e na Semana 7 apresentou valores abaixo de 5 mg/l, limite da capacidade de leitura do equipamento.

As amostras das colunas C7 e C9 apresentaram concentração de enxofre maior que as colunas C8 e C10, por conterem 20% a mais de rejeito nas amostras ensaiadas. Na Semana 2 apresentam leituras próximas, cerca de 15 mg/l, exceto a coluna C9 que apresentou leitura de 32 mg/l.

A Figura 4-22 apresenta as variações das concentrações de ferro para as soluções lixiviadas das colunas C1, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9 e C10.

Na Semana 0, a concentração de ferro nas amostras coletadas nas colunas C1 e C3 foram da 6,7 e 8,9 mg/l, respectivamente, enquanto para as demais colunas foi menor que 0,5 mg/l. Na Semana 1, a concentração na coluna C1 cai para 0,5 mg/l, e na coluna C3 permanece com 8,6 mg/l, nota-se leituras mais elevadas nas colunas C4 de 2,6 mg/l e na C9 de 1,7 mg/l. Na Semana 2, o comportamento foi atípico

apresentando leituras mais elevadas para as colunas C1, C5, C7, C8, C9 e C10, e mais baixa para a coluna C4. Na Semana 7, apresenta leitura somente para a amostra da coluna C4, igual a 1,8 mg/l.

Verifica-se que as leituras obtidas oscilam a cada semana de ensaio, essa variação pode ser decorrente de caminhos preferenciais na percolação das amostras, sendo que em cada lixiviação, a água destilada inserida nas colunas não percola por toda a amostra.

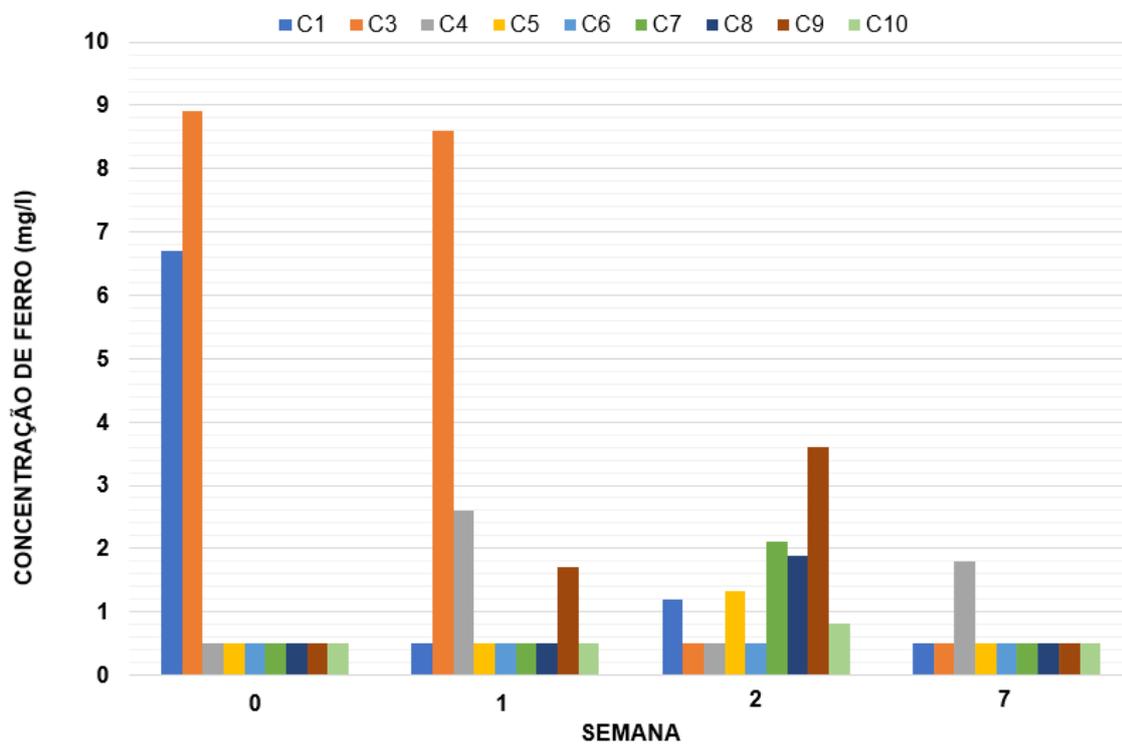


Figura 4-22 – Variação das concentrações de ferro nas colunas

## 5. CONCLUSÃO

Frente à informação de que ocorria a geração de drenagem ácida na mina e de que era um problema para a mineradora, procurou-se estudar nesse trabalho uma alternativa de sistema de cobertura seca alcalina para mitigar a geração de drenagem ácida.

Para isso foram coletadas amostras de rejeito no local onde era observado pH ácido e geração de drenagem ácida, e uma amostra do estéril que normalmente já é utilizado na mina como camada capilar no sistema de cobertura seca.

Foi construído um equipamento para realizar os ensaios de coluna de lixiviação com base em equipamentos desenvolvidos em pesquisas anteriores. O equipamento apresentou um bom custo benefício, pois foi construído com material de baixo custo e os resultados obtidos nos ensaios foram satisfatórios.

Vale ressaltar alguns problemas que foram verificados e não consegui solucionar, como a interferência do ar comprimido na camada de superfície das amostras de rejeito dentro das colunas de lixiviação. Não ter o controle da percolação de água pelo contato amostra/parede do tubo de PVC utilizado nas colunas. Não poder verificar a saturação da amostra dentro das colunas, mesmo pesando as amostras antes e após o ensaio, e coletando o volume percolado, não pode-se verificar se toda a amostra estava saturada ou se houve caminho preferencial de percolação pela amostra.

A caracterização mineralógica da amostra de rejeito ensaiada mostrou que é composto principalmente por quartzo e baixa porcentagem de goethita. Não foram observados minerais sulfetados, como pirita e arsenopirita, que são minerais comuns em amostras de rejeito de minério de ouro. A princípio, foi considerado que a amostra enviada para a realização dos ensaios não fosse representativa do rejeito *in loco*. No entanto, Galo (2017) coletou amostras em diferentes pontos da barragem e observou resultados semelhantes.

Foram realizados ensaios químicos nas amostras de rejeito, que indicaram baixa concentração de enxofre e carbono, e nos ensaios estáticos realizados utilizando o

método do balanço ácido base (MABA) comprovaram que a amostra de rejeito não possuía potencial para geração de drenagem ácida.

Tudo indica que durante o processo de beneficiamento do minério de ouro, os minerais sulfetados foram oxidados e por esse motivo eles não aparecem nas amostras de rejeito. O rejeito apresenta uma acidez pré-existente que pode ter origem nesse processo de beneficiamento. Isso pode ter causado uma falsa impressão de geração de drenagem ácida nesse material.

A caracterização química e mineralógica das amostras de estéril também indicam que este material não possui potencial para geração de drenagem ácida e nem potencial de neutralização, devido ao baixo teor de carbono e carbonato de cálcio.

Pelo ensaio de colunas de lixiviação, considerado um método cinético de previsão de geração de drenagem ácida, foi possível verificar que a amostra de rejeito e estéril não possuem potencial de geração de drenagem ácida.

Os valores de pH encontrados com os tratamentos propostos mostram que para as colunas ensaiadas somente com os sistemas de cobertura, Cobertura 1 (98% de estéril e 2% de cal em peso seco) e Cobertura 2 (96% de estéril e 4% de cal em peso seco), colunas C5 e C6, os valores são muito próximos ao longo de todo o ensaio, indicando que o acréscimo de 2% para 4% de cal afetam da mesma forma no valor do pH obtido. Nota-se também que para o acréscimo de 2% de cal, a espessura da camada de cobertura ensaiada influencia no resultado obtido, sendo que quanto menor mais baixo o pH. No entanto para o acréscimo de 4% de cal, não foi notada diferença nos valores de pH devido a diferença das espessuras das camadas.

Embora não foi possível avaliar a mitigação da geração de drenagem ácida com a utilização de coberturas secas alcalinas, verificou-se que a metodologia proposta mostrou ser eficiente uma vez que ao utilizar a cobertura os valores de pH dos lixiviados obtidos foram elevados em relação à amostra percolada no rejeito.

Os valores de condutividade elétrica (CE) do lixiviado das colunas compostas de coberturas secas, com a presença de cal, possuem leituras mais elevadas nas primeiras semanas de ensaio devido à solubilização de íons  $\text{Ca}^+$ .

Os resultados de concentração de sulfato para as colunas ensaiadas mostram que a quantidade de rejeito nas colunas é o que condiciona os resultados mais elevados. A

porcentagem de cal nas amostras das colunas C7, C8, C9 e C10, não influencia na concentração de sulfato nos lixiviados obtidos.

Os valores de concentração de acidez total obtidos para todas as colunas ensaiadas mostram que as amostras não apresentam acidez.

Os valores de concentração de alcalinidade total são diretamente proporcionais à quantidade de cal presente nas colunas de lixiviação, uma vez que os valores iniciais apresentaram na seguinte ordem  $C6 > C5 > C10 > C9$ .

A concentração de metais nas amostras de lixiviado obtidos foram baixas, somente o íon  $Ca^+$  apresentou leituras elevadas devido à presença de cal nas amostras ensaiadas.

Como sugestão para trabalhos futuros com os rejeitos provenientes dessa mina de mineração de ouro localizada na Bahia, que sejam feitas análises químicas no rejeito e no lixiviado em cada etapa do processo de beneficiamento para que identifique a origem da acidez pré-existente desse material depositado na barragem.

Aplicar a metodologia proposta nessa dissertação em outros ensaios de coluna de lixiviação com amostras de rejeito que gerem drenagem ácida para verificar sua eficácia.

E a realização de alguns ensaios complementares que faltaram ser realizados para completar as análises de caracterização das amostras e do lixiviado, como:

- Caracterização mineralógica das amostras de cal, Cobertura 1 e Cobertura 2;
- Microscopia eletrônica de varredura nas amostras de rejeito, estéril, Cobertura 1 e Cobertura 2 antes e após realização do ensaio de coluna de lixiviação;
- Concentração de metais nas amostras de lixiviado das Semanas 4 e 6.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- ABNT (2016) Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (método de ensaio) – NBR 6457/2016. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABNT (2016) Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água – NBR 6458/2016. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- ABNT (2016) Solo – Análise granulométrica – NBR 7181/2016. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.
- ABNT (1987) Preservação e técnicas de amostragem de afluentes líquidos e corpos receptores – Procedimento – NBR 9898/87. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 22 p.
- ABNT (2004) Amostragem de resíduos sólidos – NBR 10007/2004. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 21 p.
- ASTM (2018) Standard Test Method for Laboratory Weathering of Solid Materials Using a Humidity Cell - D5744/18. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Abreu, A.T. (2012). *Ensaio Cinéticos para Previsão e Prevenção de Drenagem Ácida: Estudo de Caso das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Caldas, MG*. Tese (Doutorado). Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 277 p.
- Amorim, N.R.; Azevedo, R.F.; Ferreira, O.; Ribeiro, A.G.C. (2008). Experimento para Determinação do Desempenho de Sistemas de Cobertura no Campo. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Búzios, Rio de Janeiro.
- Apello C.A.J. & Postma, D. (1994). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, Netherlands.
- Baird C. (2002). *Química Ambiental*. 2ª edição. Porto Alegre, RS. Bookman. 441-477p.
- Blowes, D.W., Ptacek J., Jambor J.L., Weisener C.G. (2003). *The Geochemistry of Acid Mine Drainage*. In: Holland H.D., Turekian K.K. (Ed.). *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier B.V., v.9, 149-204.
- Borma, L.S. (2006). *A Drenagem Ácida de Minas e o Uso de Barreiras Capilares na Interface Depósito de Resíduos-Atmosfera*, Anais do II Geojovem, Rio de Janeiro.
- Borma, L.S.; Soares, P.S.M. (2002). *Drenagem Ácida e Gestão de Resíduos Sólidos de Mineração*. In: *Extração de Ouro: Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente*, cap. 10, p. 243-266, Rio de Janeiro-RJ.
- Coastech Research INC. (1989). *Investigation of Prediction Techniques for Acid Mine Drainage*, MEND Project Report 1.16.1a, MEND, Ottawa, Ontario.
- Duarte, L.B.(2012). *Avaliação Numérica do Dimensionamento de Sistemas de Cobertura para Reservatórios de Disposição de Resíduos de Mineração*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da Universidade Federal de Minas Gerais. 143p, Belo Horizonte – MG.
- Evangelou, V.P. (1995). *Pyrite oxidation and its control: Solution Chemistry, Surface Chemistry, Acid Mine Drainage (AMD), Molecular Oxidation Mechanisms, Microbial Role, Kinetics, Control, Ameliorates and Limitations, Microencapsulation*. 293p.
- Evangelou, V.P.; Zhang, Y.L. (1995). *A Review: Pyrite Oxidation Mechanisms and Acid Mine Drainage Prevention*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v.25, p.141-199, New York (USA).
- Fagundes, J.R.T. (2005). *Balanço Hídrico do Bota Fora BF4 da Mina Osamu Utsumi, INB, como Subsídios para Remediação de Drenagem Ácida*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. 121p, Ouro Preto – MG
- Farfan, J.R.J.; Barbosa Filho, O.; Souza, V.P. (2004). *Avaliação do Potencial de Drenagem Ácida de Rejeitos da Indústria Mineral*. Série Tecnologia Mineral, CETEM/MCT, n.30, 58p., Rio de Janeiro-RJ.

- Galo, D.B. (2017). *Análise de Riscos em Barragens de Rejeitos com o Uso de Técnicas Semiprobabilísticas de Estabilidade de Taludes – Um Estudo de Caso*. Dissertação (Mestrado). Departamento Engenharia Ambiental Urbana da Universidade Federal da Bahia. 119p, Salvador – BA.
- Greenberg A.E., Clesceri L.S., Eaton A.D. (Ed). (1992). *Standart methods for the examination of water and wastewater*. 18 ed. Washington. Ed. American Public Health Association.
- Guevara, L.R.Z. (2007). *Predição do Potencial da Drenagem Ácida de Minas Utilizando o Método Cinético da Coluna de Lixiviação*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, 131.
- Hem J.D. (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. 3 ed. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2254, 263p.
- Hutchinson, I.P.G. & Ellison, R.D. (1992). *Mine Waste Management*, Lewis Publishers, Boca Raton, USA.
- INAP (2018). *The Internacional Network for Acid Prevention*. Chapter 7. Disponível em: <[http://www.gardguide.com/index.php/chapter\\_7](http://www.gardguide.com/index.php/chapter_7)> Acesso em 22 de março de 2018.
- Jarvis, A.P., Younger, P.L. (2000). Broadening the scope of mine water environmental impact assessment: a U.K. Perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, v.20, p85s-96s.
- Johnson, D.B. & Hallberg, K.B. (2005). Acid Mine Remediation Options: a Review. *Science of the Total Environment*, v.338, pp. 3-14.
- Lawrence, R. W., & Wang, Y. (1997). Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage. *Proceedings of 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, 449-464.
- Leite, A.L. (2010). *Testes estáticos e cinéticos para previsão e prevenção de drenagem ácida: estudo do caso das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Caldas MG, Relatório de Pesquisa*. Universidade Federal de Ouro Preto, 80p, Ouro Preto-MG.
- Machado L.A.; Schneider I.A.H. (2008). Ensaio estáticos e cinéticos para a prevenção da geração de drenagem ácida de minas da mineração de carvão com escória de aciaria. *Revista Escola de Minas*, 61 (3), 329-335p.
- Manahan, S.E. (1994). *Environmental Chemistry*. 6 ed. Lewis, Chelsea. 811p.
- Mello, J.W.V.; Duarte, H.A.; Ladeira, A.C.Q. (2014) *Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina*. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*. Nº 8, p.24-29.
- MEND/CANMET (1994). *Technical Report Evaluation of Alternate Dry Covers for the Inhibition of Acid Mine Drainage from Tailings*. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program, ed. By Canada Center for Mineral and Energy Technology – CANMET, Ottawa.
- Menezes, C.T.B.; Leal Fº, F.L.S.; Santo, E.L.; Rubio, J.; Da Rosa, J.J.; Galatto, S.L.; Izidoro, G. (2004). *Tratamento de Drenagem Ácida de Mina: Experiência da Carbonífera Metropolitana*. XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 9 p., Florianópolis, Santa Catarina.
- Moraes, N.C. (2010). *Abatimento de Drenagem Ácida de Mina com Cobertura de Entulho de Construção Civil: Uma Proposta de Reabilitação de uma Antiga Mina de Pirita*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 206 p.
- Murta, F.C.; Leite, A.L. e Lima, H.M. (2008) *Estudos cinéticos de sistemas de coberturas alcalinas em pilha de estéril para a prevenção de drenagem ácida de mina*. *Revista Brasileira de Geociências*, 38:228-236.
- O’Kane, M. & Barbour, S.L. (2003). *Predicting Field Performance of Lysimeters used to Evaluate Cover Systems for Waste*. 6<sup>th</sup> ICARD, Cairns, QLD, p. 327-339.
- Ritcey G.M. (1989). *Tailings management: problems and solutions in the mining industry*. Elsevier. Amsterdam, 970 p.

- Ritcey, A.I.M. (1994). Sulfide Oxidation Mechanisms: Controls and Rates of Oxygen Transport, MAC Short Course Handbook, Vol. 22, pp. 201-246. J.L Jambor; D.W. Blowes (eds.), Waterloo, Ontario, Canada.
- Roeser, P.A. (2006). Avaliação de um sistema passivo de remediação de drenagem ácida de estéril de urânio. Monografia de Graduação. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 78p, Ouro Preto – MG.
- Sobek, A.A.; Schuller, W.A.; Freeman, J.R.; Smith, R.M. (1978). Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. United States Environmental Protection Agency, 205p, Cincinnati, Ohio, United States
- Trindade, R.B.E.; Soares P.S.M.(2004). Tecnologia de Passivos para Tratamento de Drenagem Ácida de Minas. CETEM/MCT (Centro de Tecnologia Mineral). Série Tecnologia Mineral 30, 52p, Rio de Janeiro - RJ.
- U.S.EPA (1994). U. S. Environmental Protection Agency. Acid Mine Drainage Prediction, Technical Document, p. 1-32, EPA 530-R-94-036.
- White III W.W.; Lapakko, K.A.; Cox, R.L. (1999). Static-test methods most commonly used to predict acid mine drainage: practical guidelines for used and interpretation. In: The environmental geochemistry of mineral deposits, Part A: Theory and background. G.S. Plumlee and M.Logsdon (Editors). Society of Economic Geologists. Reviews in Economic Geology, v.7 , p.325-338.