

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E MATERIAIS – PPGE3M**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA
SECA APLICADOS A DEPÓSITOS DE REJEITOS DE CARVÃO.**

MARCIA RAQUEL RONCONI DE SOUZA

Mestrado Acadêmico em Engenharia
Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Porto Alegre, março de 2012.

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALURGICA E MATERIAIS – PPGE3M.**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES TIPOS DE
COBERTURA SECA APLICADOS A DEPÓSITOS DE REJEITOS DE CARVÃO.**

**MÁRCIA RAQUEL RONCONI DE SOUZA
Engenheira Ambiental**

Esta dissertação foi realizada no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia
Extrativa.

Porto Alegre, março de 2012.

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral/Metalurgia Extrativa, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Carlo Salomé dos Santos de Menezes - UNOESC

Prof. Dr. Vicente Paulo de Souza – CETEM

Prof. Dr. Antonio Sílvio Jornada Krebs- CTCL - SATC

**Prof. Dr. Telmo Strohaecker
Coordenador do PPGE3M**

A Deus, que me motiva e encoraja todos os dias nesta bela caminhada que é a vida e me faz acreditar que tudo é possível.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS**, pela coragem e pela fé necessárias à superação de todos os desafios.

À minha filha **Isabele**, meu maior tesouro.

Ao meu marido, **Raimundo**, pelo incentivo, apoio, paciência e amor dedicados todos os dias.

À minha família, pelos valores transmitidos, os quais sempre orientarão a minha vida.

Ao **Professor Ivo André Homrich Schneider**, pela orientação, apoio e compreensão, neste trabalho.

Ao Amigo e Professor **Dr. Antonio Silvio Jornada Krebs**, pela generosidade e vasto conhecimento acrescentado, sempre que solicitado, a esta dissertação.

Ao **Dr. Jean Carlo Salomé dos Santos de Menezes**, pela colaboração muito valiosa prestada por ocasião da participação na banca.

Ao **Dr. Vicente Paulo de Souza (CETEM)**, pela contribuição através do envio de tantos trabalhos e pelo apoio prestado durante todo o tempo da elaboração desta dissertação.

Aos colegas de pesquisa, **Dr. Mario Valente Possa, Dr. Paulo Sérgio Moreira Soares e Dr. Anderson Borghetti Soares (CETEM)**, pelos valiosos esclarecimentos sobre os temas aqui abordados.

À amiga **Alzira Pereira Krebs**, pelo apoio e colaboração na revisão ortográfica e gramatical realizada neste trabalho.

Aos amigos **Eduardo Amaral** e **Marcos Imério Leão**, por sua sensibilidade, competência e lealdade.

À colega **Luciane**, pela ajuda na formatação dessa dissertação.

À **Carbonífera Criciúma S.A.**, em especial **Alfredo Flávio Gazzolla**, pela oportunidade concedida e pela confiança depositada no meu trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1 OBJETIVOS	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM).....	9
2.2 MEDIDAS MITIGADORAS.....	12
2.3 COBERTURAS SECAS	14
2.4 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	17
2.5 BALANÇO HÍDRICO	18
3. ÁREA DE ESTUDO.....	21
3.1 Complexo da Unidade Mineira II – Verdinho	21
3.2 Estação Experimental.....	23
3.2.1 Unidade piloto.....	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME, TEMPERATURA E ANÁLISES DA LIXÍVIA DO EFLUENTE	36
4.1.1 Medição do Volume de Drenagem Ácida.....	36
4.1.2 Temperatura	36
4.1.3 Amostragens para as Análises Laboratoriais	37
4.3 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICO-QUÍMICAS DOS LIXIVIADOS.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42

5.1	ANÁLISE DO VOLUME DE EFLUENTE PERCOLADO.....	42
5.2	TEMPERATURA	45
5.3	PARÂMETROS QUÍMICOS E FÍSICO-QUÍMICOS DOS EFLUENTES PERCOLADOS.....	46
5.3.1	pH.....	46
5.3.2	Potencial Redox – Eh	48
5.3.3	Condutividade Elétrica.....	49
5.3.4	Acidez	50
5.3.5	Sulfatos.....	52
5.3.6	Ferro Total	53
5.3.7	Outros metais (Al, Mn, Cu e Zn)	54
5.4	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS COBERTURAS	59
5.4.1	Célula 1	59
5.4.2	Célula 2.....	60
5.4.3	Célula 3.....	61
5.4.4	Célula 4.....	62
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
7.	CONCLUSÕES.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67

LISTA DE ABREVIações

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CANMET – Canada Centre for Mineral and Energy Technology
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
CCSA – Carbonífera Criciúma S.A.
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPPE – Coordenação dos programas de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente
DAM – Drenagem Ácida de Mina
EEJPB – Estação Experimental Juliano Perez Barbosa
EPA – Environmental Protection Agency
EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina.
Eh – Potencial redox
FATMA – Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPAT - Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas
IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ISO – International Organization for Standardization
LEAmet – Laboratório de Estudos Ambientais para a Metalurgia
R. Grosso – Rejeito Grosso
R. Misturado – Rejeito Misturado
SIECESC – Sindicato da Indústria Extrativa do Carvão do Estado de Santa Catarina
TAC – Termo de Ajustamento de Conduta
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UM II – Unidade Mineira II - Verدينho

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da oxidação bacteriana dos sulfetos.	11
Figura 2 - Esquema de uma barreira capilar simples.	16
Figura 3 - Esquema de uma barreira capilar dupla.	16
Figura 4 - Vista geral da Unidade Mineira II - Verdinho.....	22
Figura 5 - Localização da Estação Experimental na UM II – Verdinho.....	24
Figura 6 – Vista geral da Estação Experimental com os elementos que a compõem.	25
Figura 7 – Planta baixa das células experimentais, incluindo-se Laboratório de Monitoramento.	26
Figura 8 – Célula mostrando o revestimento com geomanta, a instalação do lisímetro e o cano de drenagem.	27
Figura 9 – Corte ilustrativo do perfil das células experimentais.....	27
Figura 10 – Calhas utilizadas para captação do escoamento superficial.	28
Figura 11 – Diferentes sistemas de coberturas estudados nas 4 células.....	29
Figura 12 – Aspecto do rejeito grosso utilizado.....	31
Figura 13 – Corte esquemático da drenagem da água percolada até o poço central.	37
Figura 14 – Detalhe do interior do poço central.....	38
Figura 15 – Amostras representativas dos efluentes dos lisímetros.	38
Figura 16 – Laboratório da Estação Experimental.	39
Figura 17 – Volumes acumulados de água nos quatro lisímetros.	43
Figura 18 – Precipitação mensal no ano de 2009.	44
Figura 19 – Precipitação mensal no ano de 2010.	44
Figura 20 – Temperaturas observadas no rejeito grosso, a 1m de profundidade nas quatro células.	45
Figura 21 – Aspecto visual das amostras representativas dos efluentes nos quatro lisímetros.	46
Figura 22 – Valores de pH dos efluentes percolados nas quatro células.	47
Figura 23 – Valores de Eh dos efluentes percolados nas quatro células.	48
Figura 24 – Diagrama Eh x pH - Fe - H ₂ O.....	49

Figura 25 – Valores de condutividade elétrica nos efluentes percolados nas quatro células.	50
Figura 26 – Valores de acidez nos efluentes percolados nas quatro células.	51
Figura 27 – Valores de acidez nos efluentes percolados nas células 3 e 4.	51
Figura 28 – Valores de sulfatos nos efluentes percolados nas quatro células.	52
Figura 29 – Valores de Fe total nos efluentes percolados nas quatro células.	53
Figura 30 – Valores de Al nos efluentes percolados nas quatro células.	54
Figura 31 – Valores de Al nos efluentes percolados nas células 3 e 4.	55
Figura 32 – Valores de Mn nos efluentes percolados nas quatro células.	56
Figura 33 – Valores de Mn nos efluentes percolados nas células 3 e 4.	56
Figura 34 – Valores de Cu nos efluentes percolados nas quatro células.	57
Figura 35 – Valores de Cu nos efluentes percolados nas células 3 e 4.	57
Figura 36 – Valores de Zn nos efluentes percolados nas quatro células.	58
Figura 37 – Valores de Zn nos efluentes percolados nas células 3 e 4.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos tipos de cobertura seca segundo o papel que exercem para efeito de inibição da DAM.	14
Tabela 2 - Componentes possíveis em um sistema de cobertura.....	15
Tabela 3 - Componentes de um sistema de cobertura do tipo barreira capilar dupla.	17
Tabela 4- Composição química dos rejeitos e materiais de cobertura das células experimentais.(SOUZA <i>et al.</i> ,2011).....	32
Tabela 5 - Resultados da análise granulométrica.	33
Tabela 6 - Coeficientes de condutividade hidráulica saturada da cinza grossa e argila	33
Tabela 7 - Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. ...	34
Tabela 8- Quantidade e posição dos sensores em cada célula.	35
Tabela 9 - Períodos de tempo em que a coleta de amostras foi realizada. Em destaque os períodos correspondentes aos efluentes coletados para análise.	40
Tabela 10 - Métodos analíticos, equipamentos e limites de detecção dos parâmetros considerados.....	41
Tabela 11 - Volumes acumulados da água percolada nos quatro lisímetros.	42

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes tipos de coberturas secas utilizadas em células experimentais preenchidas com rejeitos piritosos de carvão mineral. Quatro células de igual dimensão foram preenchidas com rejeitos piritosos, provenientes do beneficiamento de carvão mineral da Unidade Mineira II – Verdinho, pertencente à Carbonífera Criciúma S.A., situada no município de Forquilha, Estado de Santa Catarina. Em relação à composição das células, a primeira foi construída sem cobertura; a segunda, com somente pré-cobertura, constituída de mistura de rejeitos; a terceira, com cobertura de argila compactada; e a quarta elaborada com sistema de barreira capilar dupla. Todas foram expostas às mesmas condições meteorológicas. Para avaliação do desempenho das coberturas analisou-se o volume e características químicas e físico-químicas da água de percolação no período compreendido entre 2009 e 2010. Os parâmetros físico-químicos considerados foram os seguintes: pH, Eh, acidez, alcalinidade e condutividade enquanto que os parâmetros químicos foram Fe, Al, Mn, Zn e sulfato. A partir dos resultados obtidos, fez-se uma análise técnica dos diferentes tipos de cobertura seca utilizados. De acordo com análise técnica constatou-se que o melhor desempenho no tocante ao volume e à qualidade da água percolada ocorreu na célula em que se utilizou cobertura com argila compactada e na célula em que se empregou cobertura do tipo barreira capilar dupla.

Palavras-Chave: Cobertura Seca, Carvão Mineral, Drenagem Ácida de Minas (DAM).

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the performance of different types of dry cover employed in experimental cells filled with pyritic waste of mineral coal. Four cells with the same dimension were filled with coal tailings from the coal preparation plant of Unidade Mineira II –Verdinho, which belongs to Carbonífera Criciúma SA, located in Forquilha, Santa Catarina State. The first cell was constructed without any kind of cover, the second one was built with a cover composed by a mixture of coal wastes, the third one was built with a layer of compacted clay, and the fourth one was constructed with a system composed by a dual-capillary barrier. All were exposed to the same meteorological conditions. To evaluate the performances of dry covers we analyzed the volume and the chemical and physicochemical characteristics of seepage between 2009 and 2010. The water was analyzed in terms of pH, Eh, acidity, alkalinity, conductivity and the concentration of Fe, Al, Mn, Zn, and sulfate. The experimental results showed that the best performance concerning the volume and the quality of the percolated water was obtained in the cell that received a cover of compacted clay and in the one that received a cover composed by dual-capillary barrier.

Key-words: Dry Cover, Coal, Acid Mine Drainage (AMD)

1. INTRODUÇÃO

A disposição inadequada de rejeitos e estéreis de mineração de carvão é responsável por um dos mais graves impactos negativos causados ao meio ambiente na medida em que o potencial de acidez desses estéreis leva à geração de drenagem ácida de mina. A minimização deste problema tem sido insistentemente buscada pela indústria da mineração. Nos últimos anos, realizaram-se vários estudos e projetos visando à solução ou pelo menos à minimização dos danos causados ao meio ambiente.

A drenagem ácida de mina (DAM) tem sua origem nos resíduos de mina (estéreis ou rejeitos provenientes do beneficiamento), ricos em sulfetos metálicos, que se oxidam quando expostos à água e ao oxigênio. A DAM contamina águas superficiais e subterrâneas, inviabilizando seu uso para fins recreativos, agrícolas e de consumo. A drenagem ácida pode ocorrer em minas que exploram comercialmente mineral como cobre, níquel, urânio, carvão, ouro, dentre outros. Os rios afetados pela DAM caracterizam-se pela elevada acidez e pela alta concentração de sulfatos, ferro e outros metais pesados. O controle da DAM exige um conjunto de ações que se pode resumir em três categorias: preventivas, de controle da migração e de remediação (KONTOPOULOS, 1998).

Na região sul do Brasil, um dos maiores problemas de geração de acidez ocorre na mineração de carvão, localizada nos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Na Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina cadastraram-se cerca de 786 km de rios atingidos pela DAM, os quais compreendem as bacias dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga. A contaminação dos recursos hídricos se deve à mineração a céu aberto em 134 áreas que perfazem 2.924 ha; 115 áreas com depósitos de rejeito exposto, num total de 2.734 ha; 77 lagoas ácidas, que totalizam 58 ha; e centenas de minas subterrâneas (ALEXANDRE e KREBS, 1995). Esse fato causou a degradação dos recursos hídricos da região sul de Santa Catarina, enquadrada pelo Decreto Federal nº 86.206, de 1980, como 14ª Área Crítica para efeitos do “Plano Nacional para Controle da Poluição Ambiental”.

Em 2000, os mineradores de carvão de Santa Catarina foram condenados pela Justiça Federal a promover, no prazo de três anos, a recuperação ambiental de toda a região afetada pela mineração de carvão. Com o objetivo de atender à sentença, no ano de 2001, desenvolveu-se o Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Catarinense, elaborado pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), *Canada Centre for Mineral and Energy Technology* (CANMET) e Sindicato da Indústria de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC). Desde então, as empresas do setor carbonífero desenvolvem diversos trabalhos de recuperação ambiental, dos quais muitos não atendem plenamente às exigências dos órgãos ambientais.

Tendo em vista que uma das metas do Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Catarinense era gestão de resíduos (abatimento da DAM), em 2003 foi assinado o convênio nº 01.02.0167 “Otimização do processo de geração de energia elétrica a partir do carvão e recuperação ambiental das áreas degradadas pela mineração – PROGERA, tendo como participantes o CETEM, Carbonífera Criciúma S.A. e FINEP.

Dentre as cinco metas propostas no referido, a meta física 3 – gestão de resíduos (abatimento de DAM) se deu através da implantação de uma unidade piloto que permitisse a avaliação de diferentes tipos de cobertura seca de forma a se apontar a mais adequada aos projetos de recuperação ambiental. Assim, no ano de 2007, com recursos disponibilizados pela FINEP e pela Carbonífera Criciúma S.A., a Estação Experimental Juliano Perez Barbosa na Unidade Mineira II – Verdinho, no município de Forquilha, SC, (Brasil) começou a operar.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é a avaliação do desempenho de diferentes tipos de cobertura seca utilizados em células experimentais preenchidas com rejeito piritoso de carvão mineral na minimização da geração de drenagem ácida de mina.

Para se alcançar o objetivo geral proposto, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- Análise do volume de efluente percolado;
- Análise de parâmetros químicos e físico-químicos do efluente percolado;
- Análise técnica dos diferentes tipos de cobertura seca utilizados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM)

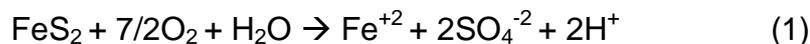
O principal responsável pela geração de drenagem ácida a partir de rejeitos de mineração é a oxidação de minerais sulfetados presentes no mineral-minério ou mesmo disseminados na rocha encaixante. Esses minerais são estáveis em condições de subsuperfície, mas, expostos ao ar, à umidade e aos agentes biológicos existentes, oxidam-se, podendo gerar acidez. (FRANKLIN, 2007).

Na bacia Carbonífera de Santa Catarina a pirita (FeS_2) é o sulfeto mais comum encontrado nos rejeitos de carvão mineral tornando-se o principal responsável pela geração de drenagem ácida nesta região.

A drenagem ácida de mina (DAM) pode ser gerada na atividade de mineração como nas frentes de lavra a céu aberto e de subsolo, nas pilhas de rejeito e nas lagoas de decantação em função da mineralogia das rochas presentes e da disponibilidade de água e de oxigênio no sistema (KIM, *et. al.*, 1982).

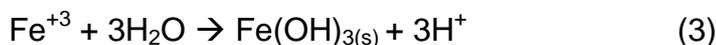
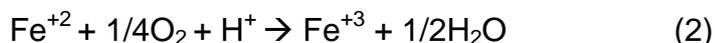
As reações químicas responsáveis pela oxidação da pirita, pesquisadas por diversos autores (e.g., SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003) e atualmente bastante conhecidas, podem ser:

- Oxidação direta da pirita - A oxidação direta da pirita pelo oxigênio ocorre abioticamente e/ou por ação oxidante direta das bactérias (1).

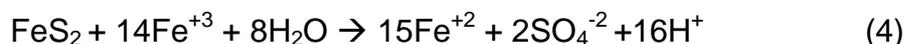


- Oxidação e hidrólise do Fe - A velocidade de oxidação de íon ferroso (Fe^{+2}) em condições abióticas é extremamente dependente do pH, diminuindo bruscamente à medida que o pH diminui. Em $\text{pH} \geq 4,5$ a oxidação é praticamente independente da ação das bactérias. Entretanto, em $2,5 \leq \text{pH} \leq 4,5$ a reação ocorre a uma velocidade determinada pela atividade das bactérias do gênero *Acidithiobacillus ferrooxidans*, as quais podem acelerar a oxidação do Fe em até 10^6

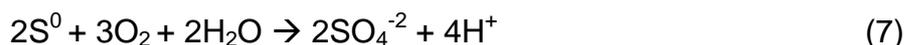
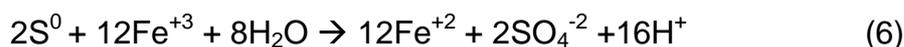
vezes. Além da oxidação, em $\text{pH} > 3,0$, inicia-se também a hidrólise e a precipitação de íon férrico (Fe^{+3}). As reações de oxidação (2) e de hidrólise (3) são apresentadas abaixo:



- Oxidação indireta da pirita e de metais sulfetados - Em $\text{pH} \leq 4,5$ o íon férrico formado pode oxidar diretamente a pirita e outros metais associados ao carvão, sendo rapidamente convertido ao Fe^{+2} e gerando mais acidez e sulfato solúvel, como mostram as equações (4) e (5).



- O enxofre elementar (S) produzido é oxidado pelo íon férrico e/ou pelo O_2 , sendo convertido rapidamente para sulfato. A reação é acelerada na presença de bactérias oxidantes, principalmente a espécie *Thiobacillus thiooxidans*, como mostram as equações (6) e (7).



Pelas reações apresentadas nas equações (1) a (7) é possível concluir-se que a DAM é fortemente contaminada com ferro e com o íon sulfato.

O ciclo permanece até que toda a pirita acessível aos agentes de reação tenha sido consumida através de reações que resultam no caráter ácido do meio, que provoca também a solubilização de outros metais existentes no material como o alumínio, o cobre, o chumbo, o cromo, o manganês, o mercúrio, o níquel e o zinco. A oxidação da pirita é processo complexo, do qual participam diversos tipos de reação como oxi-redução, hidrólise e formação de íons complexos, controles de solubilidade e efeitos cinéticos. Os mecanismos de oxidação envolvidos são o biológico e o químico. Porém, sob condições ótimas de pH e de temperatura, a velocidade das

reações assistidas pela presença da bactéria são várias vezes superiores àquela promovida pelo mecanismo químico (SOUZA, 1996).

Embora a oxidação de um mineral sulfetado possa ser abiótica, a taxa de reação na presença de bactérias é aumentada em várias ordens de grandeza. Baker (1970) investigou a oxidação do íon ferroso pelas bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* em condições ácidas e constatou que a oxidação biológica aumenta a taxa de oxidação em várias ordens de magnitude (10^5 a 10^8 vezes) se comparada às taxas de oxidação química. Desta forma, tais bactérias catalisam a oxidação do íon ferroso a férrico que, por sua vez, oxida a pirita, gerando drenagem ácida (SOUZA, 2010). A Figura 1 ilustra a oxidação através da atuação de atividade bacteriana.

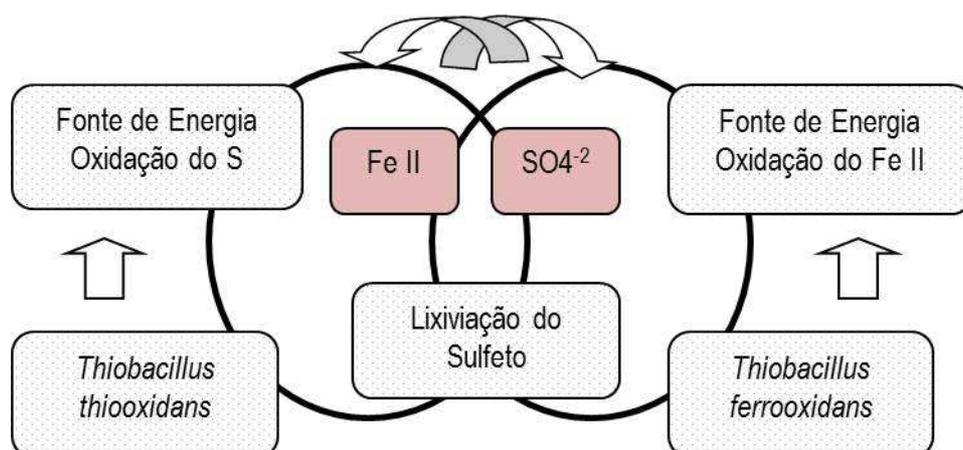


Figura 1 - Representação esquemática da oxidação bacteriana dos sulfetos.
Fonte: Modificado de SOUZA (1996).

As espécies de *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Thiobacillus thiooxidans* são bactérias quimiolitotróficas e autotróficas, pois utilizam o CO_2 como fonte única de carbono. São gram-negativas, em forma de bastão, se locomovem mediante o uso de flagelos e medem de 0,3 a 0,5 μm de diâmetro e 1,0 a 1,7 μm de comprimento (ESTEBAN; DOMIC, 2001). O que diferencia essas espécies é a faixa de pH, a temperatura e a obtenção de energia. O *Acithiobacillus ferrooxidans* tem como pH ótimo valor entre 1,0 e 2,0; a temperatura para seu crescimento é da ordem de 30°C;

e a fonte de energia dá-se a partir da oxidação do íon ferroso e de compostos sulfurados. A bactéria *Thiobacillus thiooxidans* possui grande tolerância a elevadas concentrações de ácido sulfúrico, sendo capaz de crescer em meios ácidos com valores de pH na faixa de 0,5 a 6,0. O crescimento dessas bactérias ocorre em uma faixa de temperatura de 28 a 35°C e a principal fonte de energia é o S. (SÉRVULO, 1991).

2.2 MEDIDAS MITIGADORAS

A drenagem ácida de mina (DAM) pode ser gerada a partir da variedade de minerais sulfetados, passíveis de serem encontrados na extração de substâncias minerais como carvão, cobre, ouro, zinco e urânio, entre outras, o que a torna um dos maiores problemas da indústria minero-metalúrgica em várias partes do mundo (SOARES; TRINDADE, 2003).

De acordo com o relatório do CETEM (2001), dois aspectos são importantes quando do estudo da geração de drenagem ácida. O primeiro é o fato de que a lixívia não se restringe à área minerada, podendo contaminar os cursos d'água superficiais e subterrâneos bem como as áreas circunvizinhas ao empreendimento. O segundo aspecto é o de que a reação química envolvida no processo de geração da lixívia é lenta, podendo o fenômeno persistir durante anos, mesmo depois de esgotado o depósito mineral. Nesse sentido, quatro enfoques de tratamento podem ser empregados para se evitar ou minimizar a geração de DAM:

- i. Tratamento ativo da DAM. Esse procedimento implica a geração de grandes quantidades de lama e/ou lodo, o que causa novos impactos negativos;
- ii. Adição de aditivos alcalinos ao resíduo sulfetado, neutralizando a acidez gerada pelo resíduo e mantendo o produto da neutralização restrito à área onde se produz a drenagem ácida;
- iii. Isolamento dos resíduos geradores de acidez como ar e água, o que reduz o potencial de geração de acidez.

- iv. Submersão ou inundação dos resíduos. Essa medida reduz o contato com o oxigênio devido à baixa concentração desse gás na água e ao baixo coeficiente de difusão do oxigênio sob essas condições.

A recuperação das áreas impactadas pela drenagem ácida envolve, em geral, aplicação de um conjunto dessas técnicas ou uma combinação delas. Com base nisso, apresentam-se algumas alternativas empregadas para se prevenir e se recuperar áreas degradadas pela drenagem ácida de mina:

- Resolução na origem do problema
 - Instalação de sistema de drenagem e de contenção na frente de lavra;
 - Selagem de minas subterrâneas;
 - Inundação de antigas cavas a céu aberto.

- Controle do depósito de rejeitos e das lagoas de decantação
 - Instalação de sistema de drenagem e de contenção;
 - Mistura de material alcalino ao resíduo gerador de acidez;
 - Disposição aquosa dos resíduos;
 - Cobertura úmida (*wet cover*);
 - Cobertura seca (*dry cover*).

- Tratamento da drenagem ácida;
 - Tratamento ativo;
 - Tratamento passivo biótico e abiótico.

Em virtude do escopo do trabalho, terá ênfase o método de cobertura seca.

2.3 COBERTURAS SECAS

Cobertura seca é a técnica de prevenção e controle da drenagem ácida de mina que visa a minimizar a infiltração da água e o fluxo do oxigênio no rejeito. A cobertura pode ser simples ou complexa, variando de uma única a várias camadas, com diferentes materiais, incluindo-se solos, rejeitos não reativos, geossintéticos e materiais para o consumo de oxigênio (MEND, 2001).

Sistemas de cobertura compostos por várias camadas de solo e/ou materiais alternativos são necessários quando o objetivo principal é o controle da drenagem ácida de mina. Sua adoção é considerada método de controle de DAM “na fonte”, pois minimiza a entrada dos principais agentes responsáveis pela oxidação, ou seja, do oxigênio e da água (SOUZA *et al.*, 2003).

Embora a cobertura seca se constitua geralmente de camadas de solos de diferentes propriedades, essas camadas podem ser substituídas por materiais alternativos, como geossintéticos ou resíduos provenientes de outras atividades, desde que esses materiais apresentem as propriedades necessárias para essa substituição. A Tabela 1 mostra a classificação dos diversos tipos de cobertura seca de acordo com o papel que elas exercem na prevenção da DAM.

Tabela 1 - Classificação dos tipos de cobertura seca, de acordo com o papel que exercem para efeito de inibição da DAM.

Classificação	Papel principal na inibição da DAM
Barreira ao transporte de oxigênio	Reter a umidade e fornecer uma barreira com baixo coeficiente de difusão do oxigênio.
Barreira hidráulica	Impedir, por meio de uma camada de material de baixa permeabilidade, o fluxo de água para o resíduo.
Barreira capilar	Impedir simultaneamente o transporte de água e oxigênio para o resíduo por meio da superposição de camadas de materiais com diferentes propriedades hidráulicas.
Barreira de consumo de oxigênio	Fonte de consumo de oxigênio de forma a fornecer baixa concentração de oxigênio na interface cobertura/resíduo.
Barreira de inibição da reação	Inibir reações através da neutralização do pH.

Fonte: Modificado de Borma *et al.* (2002) e Ubaldo (2005).

O tipo de cobertura seca atualmente sugerido para climas úmidos é aquele que utiliza o princípio de barreira capilar, que impede a passagem de oxigênio e de água para o rejeito de mineração, sendo, ao mesmo tempo, capaz de manter elevado grau de saturação no seu interior mesmo durante o período seco.

De maneira geral, os sistemas de cobertura se compõem de várias camadas, cada qual com função definida como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Componentes possíveis em um sistema de cobertura.

Camadas	Função	Considerações
Superficial	-Controlar a erosão hidráulica e/ou eólica; -Reduzir temperatura e aporte de água para as camadas inferiores; -Promover crescimento de vegetação e evapotranspiração.	Camada indispensável ao sistema de cobertura.
Proteção	-Armazenar água; -Proteger as camadas inferiores contra o ressecamento, penetração de animais e raízes.	Pode ser substituída por camada superficial mais espessa.
Drenagem/ Capilar	-Remover a água acumulada nas camadas superiores, reduzindo, assim, o gradiente hidráulico na camada barreira.	Utilizada quando excessivas quantidades de água passam pela camada superficial e de drenagem ou quando forças de percolação são excessivas.
Barreira	-Reduzir a infiltração de água e/ou oxigênio para o interior do rejeito. -Inibir as reações de oxidação e elevar o pH da água que se infiltra.	É a camada mais importante do sistema de cobertura. Outros materiais também utilizados: resíduo da indústria de celulose, madeira e asfalto.

Fonte: Modificado de DANIEL; KOERNER (1993).

A configuração da barreira capilar tira proveito do funcionamento hidrológico das camadas do solo com contraste de condutividade hidráulica não saturada para aumentar a retenção de água na cobertura, minimizando a passagem de oxigênio e diminuindo a infiltração da água para a pilha de resíduos, o que reduz a ação dos principais agentes do processo de geração de DAM.

As Figuras 2 e 3 ilustram esquematicamente a barreira capilar simples e a barreira capilar dupla, respectivamente. A barreira capilar simples consiste de camada de material fino disposta sobre camada de material granular, formando uma barreira capilar. Ambos os materiais devem estar na condição não saturada (Figura 2).

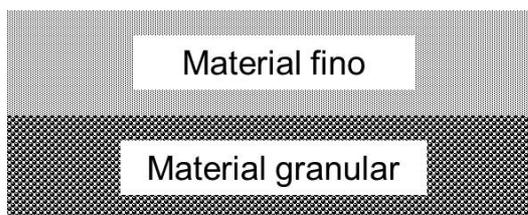


Figura 2 - Esquema de uma barreira capilar simples.

Na condição não saturada, a camada de material fino tende a reter a água no seu interior devido ao efeito de sucção. A camada granular, por sua vez, apresenta baixa permeabilidade na condição não saturada devido à presença de ar nos poros do material granular que reduz a interligação dos vazios preenchidos pela água. Dessa forma, a água fica impedida de percolar da camada argilosa para a arenosa em direção ao rejeito. No entanto, na parte superior da camada argilosa pode haver perda de água por evaporação.

Para evitar esse inconveniente, construiu-se uma barreira capilar dupla (Figura 3). Neste caso, a camada arenosa superior impede que a água migre por ascensão e se perca na atmosfera por evaporação.

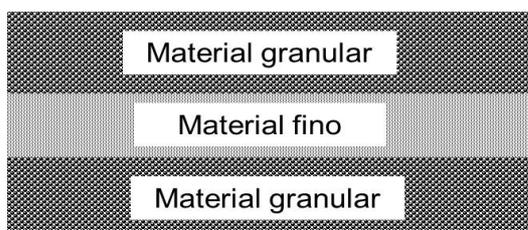


Figura 3 - Esquema de barreira capilar dupla.

Nesse tipo de barreira, a camada de material granular superior exerce duas funções importantes: em períodos de seca ela impede que a água armazenada na camada de material fino migre por capilaridade para as camadas de topo, minimizando assim o efeito de perda de umidade por secagem e evaporação; em períodos chuvosos, essa camada funciona como dreno, conduzindo lateralmente a água que se infiltra na cobertura e prevenindo, dessa forma, a saturação da camada

de material fino. Esse efeito pode ser maximizado por meio da inclinação da superfície, o que favorece o escoamento lateral. Isso é bastante importante considerando-se que o clima da maioria das regiões brasileiras apresenta períodos bem definidos de seca no inverno e elevadas precipitações pluviométricas no verão.

Na barreira capilar dupla é usual a adição de camadas cuja finalidade é proteger a barreira capilar, dar suporte à vegetação e controlar o balanço hídrico (BORMA *et al.*, 2002). A Tabela 3 apresenta os componentes de um sistema de cobertura do tipo barreira capilar dupla.

Tabela 3 - Componentes de um sistema de cobertura do tipo barreira capilar dupla.

Camadas	Função	Considerações
Camada superficial	-Prevenir erosão; -Promover evapotranspiração; -Promover o crescimento da vegetação.	Camada indispensável ao sistema de cobertura.
Camada de proteção	-Armazenar água; -Proteger as camadas inferiores contra o ressecamento e a penetração de animais e raízes.	Pode ser substituída por camada superficial mais espessa.
Camada de material granular	-Promover a drenagem da água acumulada nas camadas superiores, reduzindo o gradiente hidráulico na camada argilosa; -Impedir que a camada argilosa perca água por capilaridade.	Utilizada quando excessivas quantidades de água passam pela camada superficial e de proteção ou quando as forças de percolação são excessivas.
Camada de material argiloso	-Reduzir a infiltração de água e de oxigênio para o interior do rejeito.	Camada mais importante do sistema de cobertura.
Camada de material granular	-Impedir a migração de água para dentro do resíduo e manter grau elevado de saturação da camada acima.	Camada necessária quando se pretende construir barreira capilar.

Fonte: Modificado de SOUZA *et al.* (2003).

2.4 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

A grande importância das condições climáticas reside no fato de que a quantidade de drenagem ácida gerada em uma pilha de rejeitos é resultante, em grande parte, da água da chuva que se infiltra no resíduo.

A adoção de sistemas de cobertura em climas úmidos é o método de controle “na fonte”, pois influencia o processo de geração de acidez através do

controle do oxigênio e da água no resíduo reativo. A cobertura do solo pode também ser utilizada em climas secos. Nesse caso, ela atua principalmente como barreira à infiltração de água, não tendo por objetivo minimizar a entrada de oxigênio. Em ambas as condições, a capacidade de a cobertura de solo atuar de acordo com as premissas estabelecidas no projeto é função das propriedades físico-químicas do solo utilizado na cobertura e do resíduo, além da resposta às condições atmosféricas atuantes (BORMA *et al.*, 2002).

No entanto, O'Kane (2002) observa que muitas das regiões do Brasil são consideradas como de clima úmido e exibem prolongados períodos de seca, podendo a evaporação exceder a infiltração. Nessa situação, a cobertura dimensionada para atuar em clima úmido pode não ser completamente eficiente devido à dificuldade de manutenção do grau de saturação da camada argilosa.

2.5 BALANÇO HÍDRICO

O conceito de balanço hídrico, utilizado para se quantificar e estudar o fator hidrológico de uma região foi introduzido em 1948 por Thornthwaite. Define-se como o somatório das quantidades de água que entram e saem de um dado volume de solo, em um dado intervalo de tempo. Dessa forma, o balanço entre o volume de água que entrou e o que saiu num determinado volume representa a variação do armazenamento da água nesse volume.

Através do ciclo hidrológico é possível se compreender a dinâmica dos processos hidrológicos e assim entender a circulação contínua da água, suas transformações de estado e sua relação com o meio ambiente.

De acordo com Reichardt (1990), o ciclo hidrológico pode se dividir em duas fases principais: atmosférica e terrestre. A fase atmosférica consiste na formação das precipitações e a terrestre, no armazenamento temporário da água, seus movimentos e transformações.

O ciclo hidrológico compreende, em geral, os seguintes fenômenos:

- Precipitação (P): água proveniente do vapor d'água da atmosfera, depositada na superfície terrestre de diversas formas, como chuva, granizo, orvalho, neblina, neve e geada. No entanto, em se tratando do Brasil, leva-se em consideração a precipitação sob a forma de chuva por ser a mais abundante.
- Interceptação: parcela da precipitação interceptada antes de atingir a superfície do solo. Essa interceptação pode ocorrer devido à presença de vegetação e/ou de outros obstáculos.
- Retenção superficial ou armazenamento (Arm): parte do volume precipitado que atinge a superfície do solo, retida nas pequenas e numerosas depressões do terreno, das quais só escapa por evaporação e/ou infiltração.
- Infiltração (I): passagem da água do meio atmosférico para o interior do solo através da interface ar-solo. A capacidade de infiltração de determinado perfil de solo depende de fatores como teor inicial de umidade do solo, textura e estrutura do solo (especialmente na camada superficial), assim como do tipo, da intensidade e da duração da precipitação. Quando a intensidade da chuva for menor que a capacidade de infiltração do solo, a água penetrará tão rapidamente quanto está sendo aplicada, ou seja, a intensidade da chuva determinará a taxa de infiltração. Quando a taxa de chuva for superior à capacidade de infiltração, a capacidade de infiltração determinará o fluxo, começando, portanto, o processo a ser controlado pelo solo. De forma geral, a capacidade de infiltração é relativamente alta no início do processo e decresce gradualmente com o tempo.
- Escoamento superficial – run off (ES): água precipitada não interceptada, não retida e também não infiltrada, que passa a escoar sobre a superfície do solo. Esse fenômeno acontece quando este se torna saturado ou quando a intensidade da chuva é superior à velocidade de infiltração. Desta maneira, o escoamento superficial depende das condições climáticas e fisiográficas da região.

- Evapotranspiração (Evp): processo pelo qual a água passa do estado líquido para o gasoso através do processo de evaporação e de transpiração das plantas. Esse fenômeno inclui a evaporação da água contida no solo, no orvalho e na parcela da precipitação interceptada e retida. Esse processo depende da energia disponível para a mudança do estado físico da água, sendo, portanto, a radiação solar o fator isolado mais importante. Outros fatores, como vento, através da turbulência, e umidade relativa do ar, através do potencial do vapor d'água, também afetam o processo.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada dentro da Unidade Mineira II – Verdinho. Ao abordar-se a área de estudo, descrever-se-á a posição geográfica, suas características climáticas, geomorfológicas e geológicas, bem como as principais características do processo de lavra e de beneficiamento do carvão da Unidade Mineira II – Verdinho e abordar-se-á também a instalação, o funcionamento e as características da Estação Experimental do projeto Unidade Piloto Instrumentada para Controle e Abatimento da DAM com o uso de cobertura seca implantado na Unidade Mineira II – Verdinho (UM II), local onde foi realizado este estudo.

3.1 COMPLEXO DA UNIDADE MINEIRA II – VERDINHO

A Unidade Mineira II – Verdinho (UM II), pertencente à Carbonífera Criciúma S.A., localiza-se no município de Forquilha, sul do Estado de Santa Catarina, e sua área tem aproximadamente 120 ha. Ela se estende desde as localidades de Verdinho e São Miguel, município de Forquilha, onde se situam as unidades operacionais de superfície e de subsolo, até o município de Maracajá, mais ao sul. O acesso, a partir do município de Criciúma, dá-se pela Rodovia Jorge Lacerda, passando pelo bairro Sangão, derivando à direita, em direção ao município de Forquilha, através da Rodovia Gabriel Arns, percorrendo-se 4 km pela rua Nereu Belolli, que levam, então, aos portões de acesso à empresa.

As divisas em áreas contíguas da unidade mineira são: ao norte, área de pastagem, vegetação e rio Mãe Luzia; ao sul as áreas de vegetação, agricultura e acesso à BR-101; a leste, áreas de vegetação, agricultáveis e rio Sangão; e a oeste, áreas agricultáveis (Figura 4).



Figura 4 - Vista geral da Unidade Mineira II - Verdinho.

Em funcionamento desde 1982, a UM II caracteriza-se por relevo suave, associado às planícies aluviais, drenado pelas microbacias dos rios Mãe Luzia e Sangão, tributários da Bacia Hidrográfica do rio Araranguá.

De acordo com dados obtidos na estação meteorológica do município de Orleans, o tipo climático dessa área é úmido-mesotérmico. O índice pluviométrico médio anual da região é de 1.480mm, com as maiores médias mensais durante os meses de setembro a março e os menores índices nos meses de abril a agosto (BACK, 1997; EPAGRI, 1999). As temperaturas médias variam entre 23,5°C, nos meses de janeiro e fevereiro, e 14°C, no mês de julho.

Os dados de evapotranspiração total, obtidos na estação meteorológica do município de Torres, indicam valor médio de 742,1mm, que corresponde à média dos totais anuais entre 1961 e 1990. Os dados da estação meteorológica do município de Florianópolis indicaram, para o mesmo período, valor médio de 1.084,5mm, de acordo com o Departamento Nacional de Meteorologia.

Do ponto de vista geológico, na área da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, onde a UM II está inserida, afloram rochas sedimentares e vulcânicas de composição básicas a intermediária, que constituem a sequência da borda leste da Bacia do Paraná. Na região costeira, há diversidade de depósitos de cascalhos,

areias, siltes e argilas, relacionados a processos marinhos e continentais. O embasamento cristalino regional se compõe de granitóides tardi a pós-tectônicos, não aflorantes na área da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (KREBS, 2004; KREBS *et al.*, 2007).

A unidade Mineira II – Verdinho explora a camada de carvão Barro Branco, que apresenta pacote tabular, de grande extensão lateral, posicionado entre 100m e 250m de profundidade. A área do complexo industrial é de cerca de 1.200.000m², incluindo-se a usina de beneficiamento, os pátios de estocagem, os módulos de estéreis, os prédios de apoio, os poços e o plano inclinado. Os rejeitos sólidos são dispostos em locais de relevo suave e de baixa declividade, delimitados por sistema de canais de captação periférica que possuem distâncias mínimas de 230 m do rio Mãe Luzia e de 326 m do rio Sangão.

O processo de beneficiamento do carvão na usina de beneficiamento origina dois tipos de rejeito: grosso, com granulometria da ordem de 37mm a 25mm, e fino, com granulometria inferior a 1mm. Esses rejeitos são dispostos separadamente e de modo distinto. Em um primeiro momento, o rejeito fino é depositado em bacias de decantação (Módulo A), sendo posteriormente retirado e colocado em depósito juntamente com o rejeito grosso (Módulo B). O rejeito grosso produzido na empresa tem variações de acordo com a produção, no ano de 2009 a produção mensal média foi de 67,98 toneladas e no ano de 2010 com produção mensal média na ordem de 49,31 toneladas.

3.2 ESTAÇÃO EXPERIMENTAL

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) iniciou a operação da Estação Experimental Juliano Perez Barbosa (EEJPB), em outubro de 2007. A função da estação era estudar a influência das diferentes configurações de camadas de cobertura na minimização da DAM. A Figura 5 ilustra o posicionamento da estação experimental dentro da Unidade Mineira II – Verdinho.



Figura 5 - Localização da Estação Experimental na UM II – Verdinho.

3.2.1 Unidade piloto

A Unidade piloto se compõe de três elementos principais:

- Aterro que abriga 4 (quatro) cavidades preenchidas com volume aproximado de 110m^3 de rejeito grosso, gerado na usina de beneficiamento de carvão mineral da UM II – Verdinho;
- Estação meteorológica para obtenção de dados de temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e precipitação. O conjunto “cavidade com rejeito + cobertura” é aqui denominado célula;
- Laboratório para a realização de análises físico-químicas expeditas dos efluentes coletados, para a obtenção dos valores de pH, condutividade elétrica (CE) e potencial redox (Eh). A Figura 6 ilustra os três elementos da unidade piloto.



Figura 6 – Vista geral da Estação Experimental com os elementos que a compõem.

O aterro construído na unidade possui 3 m de altura acima da cota da superfície devido à presença de lençol freático superficial, localizado cerca de 2m abaixo do nível do terreno.

Nesse aterro, prepararam-se quatro cavas com a mesma dimensão, na forma de troncos de pirâmides invertidas, com 16m² na cota de fundo (4x4 m) e 56,27 m² na cota de superfície (7,5 x 7,5 m), projetadas de acordo com as simulações numéricas realizadas por Borghetti- Soares; Ubaldo; Barbosa (2009) e Souza *et al.* (2009).

No interior de cada cava, instalou-se um lisímetro para coletar a parcela do efluente que percola através do rejeito grosso. Os lisímetros são cilindros de polipropileno com 2 m de altura e 2 m de diâmetro, com lateral e fundo impermeável e parte superior aberta. A posição do lisímetro dentro de cada cava foi determinada pela modelagem numérica do fluxo de água (SOUZA *et al.*, 2009), através do programa SEEP (GEOSLOPE, 1998). Com esta modelagem verificou-se que os lisímetros instalados nessa posição, ou seja, no fundo e no centro das cavas, não alteram o fluxo de água dentro do rejeito (BORGHETTI SOARES; UBALDO;

BARBOSA, 2009; SOUZA *et al.*,2009). A Figura 7 ilustra a planta baixa das células experimentais.

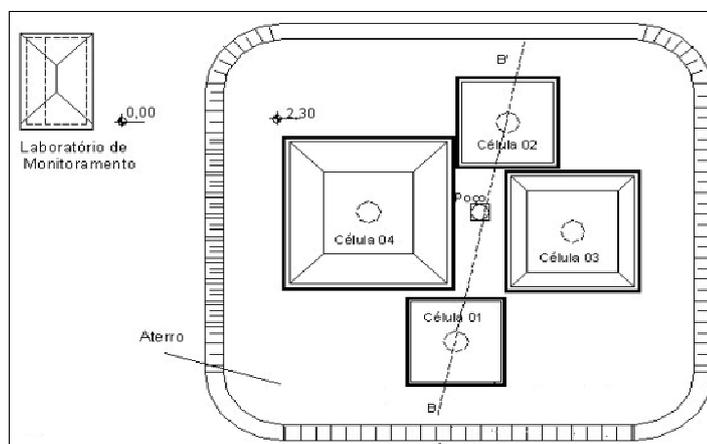


Figura 7 – Planta baixa das células experimentais, incluindo-se Laboratório de Monitoramento.

Na superfície do fundo das cavas das quatro células, instalou-se uma manta impermeável, do tipo geomembrana de PVC - VINIMANTA com geotêxtil de poliéster, visando a impedir a contaminação do aterro pelo efluente percolado no rejeito e a permitir a realização do balanço hídrico em cada célula instalada.

A Figura 8 ilustra a cavidade de uma das células, mostrando o revestimento com geomanta, a instalação do lisímetro e o cano de drenagem.



Figura 8 – Célula mostrando o revestimento com geomanta, a instalação do lisímetro e o cano de drenagem.

No fundo de cada cava há uma saída que conduz o efluente do lisímetro para um poço de coleta (drenagem interna), localizado na parte central do aterro. O poço possui 4 m de profundidade em relação à cota superior do aterro e 1 m abaixo da cota de fundo da cava. Existe também outra saída que conduz o efluente do restante de cada cava (parte externa ao lisímetro) para uma rede de saída cujo objetivo é a medição do volume. A Figura 9 ilustra corte esquemático em perfil de duas células no qual se pode observar a tubulação que conduz a drenagem percolada no lisímetro ao poço de coleta.

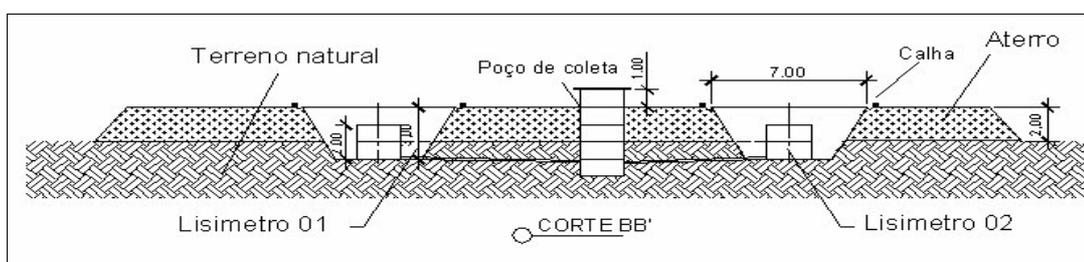


Figura 9 – Corte ilustrativo do perfil das células experimentais.

O escoamento superficial (*run-off*) é medido em reservatórios (caixas d'água de 3000 L) individuais, instalados em cada célula. A água que não infiltra é conduzida por calhas, construídas ao longo do perímetro das células, até os reservatórios onde se medem os volumes, como mostra a Figura 10.



Figura 10 – Calhas utilizadas para captação do escoamento superficial.

3.2.1.1 Células experimentais

Para a avaliação dos diferentes tipos de cobertura, três células foram cobertas com diferentes arranjos de material (Figura 11).

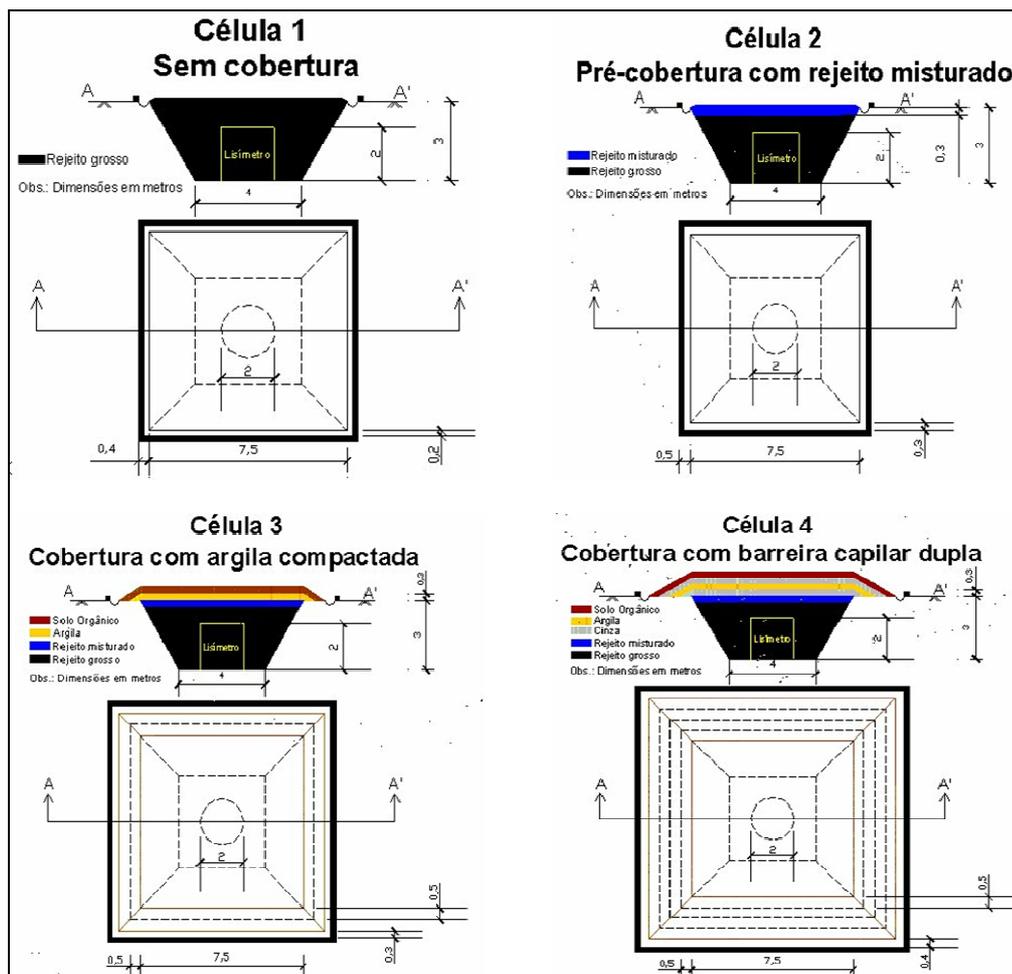


Figura 11 – Diferentes sistemas de coberturas estudados nas quatro células.

A célula 1 não recebeu qualquer cobertura.

Na célula 2, colocou-se cobertura de 30cm, constituída de mistura de rejeito grosso e rejeito fino, na proporção de 2:1, a qual foi a seguir compactada.

Na célula 3, colocou-se cobertura de 30cm de argila, proveniente de jazida de propriedade da empresa, disposta sobre a cobertura da mistura de rejeito grosso e de rejeito fino. Todas as camadas foram compactadas. Para a proteção dessa cobertura colocou-se camada de solo de aproximadamente 30 cm, sem compactação.

Na célula 4, sobre a cobertura da mistura compactada de rejeito grosso e de rejeito fino colocou-se cobertura de 30cm de cinza grossa, proveniente das cinzas de fundo do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, também compactada. Sobre esta última, também se adicionou nova camada de 30 cm de argila compactada e

outra camada, também de 30 cm de espessura, de cinza grossa compactada. Para a proteção dessa cobertura colocou-se uma camada de solo de aproximadamente 30 cm de espessura, sem compactação.

Descrição dos Materiais Utilizados no Preenchimento e nas Coberturas das Células Experimentais

O material utilizado no preenchimento das células experimentais constitui-se de rejeito de carvão, composto por mistura dos três tipos de rejeito gerados na Usina de Beneficiamento da CCSA (CETEM, 2001): R₁ (rejeito piritoso); R₂ (rejeito xistoso); o R₃ (rejeito argiloso). São materiais com *top size* entre 37 e 25 mm.

O rejeito grosso disposto nas células possui a seguinte composição percentual em massa: R₁ = 50%; R₂ = 44% e R₃ = 6%. O rejeito misturado é composto pelo rejeito grosso e fino (*top size* 1mm) e resulta um material composto cuja condutividade hidráulica é inferior à do rejeito grosso, pois os poros entre as partículas desse rejeito misturado são preenchidos com partículas de rejeito fino.

Segundo Mendonça (2007), com base em ensaio de balanço ácido-base, o rejeito gerado na UM – II Verdinho apresenta elevado potencial de geração de acidez e baixo potencial de neutralização, pois possui pequena quantidade de minerais alcalinos. A autora também mediu a massa específica aparente seca do material em 1,44 g/cm³ e realizou ensaios de infiltração no depósito de rejeitos, mensurando valores da ordem de 4x10⁻¹ cm/s.

Devido ao processo de beneficiamento, os rejeitos gerados apresentam variabilidade quanto à distribuição granulométrica e a maioria dos materiais possuem características não plásticas. O rejeito grosso pode ser classificado como pedregulho graduado com finos. O teor de matéria orgânica é alto, em torno de 30%, e o teor de enxofre total é de 7%.

De acordo com Schneider (2006), esse rejeito grosso pode ser classificado como Resíduo Classe II - A (Não Inerte), conforme a norma NBR 10004/2004. A Figura 12 ilustra o aspecto do rejeito grosso.

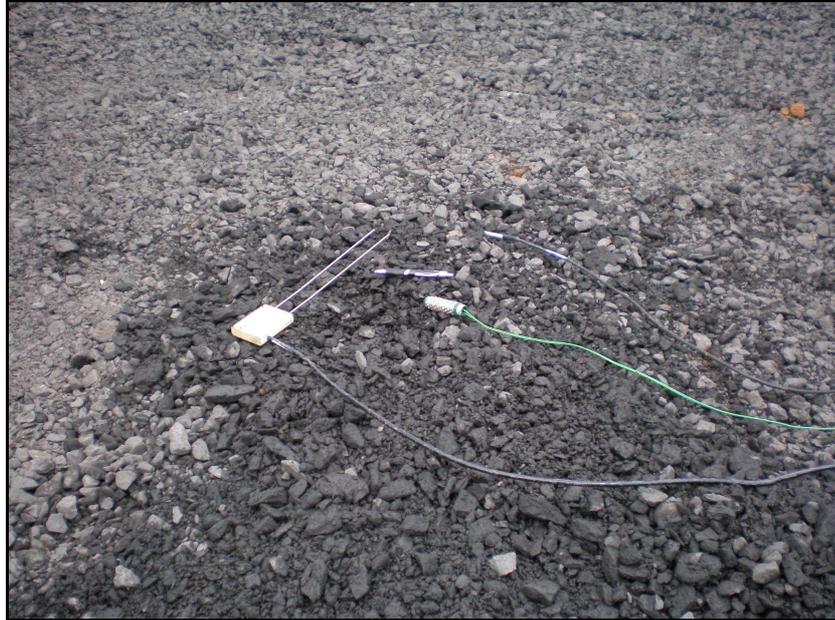


Figura 12 – Aspecto de rejeito grosso utilizado.

A cinza utilizada na barreira capilar dupla provém da queima do carvão mineral no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda SC. Sua caracterização geotécnica, química e mineralógica foi dada por Ubaldo (2005). A cinza utilizada na estação experimental tem composição similar à da cinza caracterizada por Ubaldo (2005). De acordo com os resultados obtidos, considerando-se a definição de resíduo não inerte (Norma NBR 10.004/2004), a cinza de fundo, ou pesada, se classifica como Resíduo Classe II A – Não Inerte, com teores de Al acima do permitido pela NBR 10.004.

A argila e o solo vegetal são provenientes de áreas de material de empréstimo de propriedade da Carbonífera Criciúma S.A., localizadas no município de Forquilha, SC.

A composição química dos rejeitos e dos materiais de cobertura é exibida na Tabela 4.

Tabela 4- Composição química dos rejeitos e materiais de cobertura das células experimentais.(SOUZA *et al.*,2011)

Parâmetros (%)	Rejeito Grosso	Rejeito Misturado	Argila	Cinzas Grossa	Solo Vegetal
Enxofre total	6,02	6,44	0,07	0,15	0,03
Enxofre pirítico	5,81	6,34	0,02	0,14	0,02
Enxofre sulfático	0,21	0,10	0,05	0,01	0,01
Enxofre orgânico	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sílica (SiO ₂)	48,67	42,06	81,12	56,60	72,32
Alumínio (Al ₂ O ₃)	18,48	19,73	5,25	23,13	11,15
Sódio (Na ₂ O)	0,73	0,79	0,40	0,86	0,38
Magnésio (MgO)	0,07	0,10	0,03	0,13	0,07
Ferro (Fe ₂ O ₃)	8,25	8,69	3,95	6,48	4,83
Cálcio (CaO)	0,48	0,95	0,10	0,87	0,07
Manganês (MnO ₂)	0,03	0,03	0,02	0,05	0,03
Zinco (ZnO)	0,03	0,03	0,003	0,01	0,005
Potássio (K ₂ O)	1,73	1,52	0,17	2,23	0,17
Titânio (TiO ₂)	0,87	0,88	1,89	1,21	1,60
Zircônio (ZrO ₂)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cromo total (Cr)	0,02	0,01	0,002	0,01	0,003
Cobre (Cu)	0,009	0,009	0,007	0,009	0,008
Cloretos (Cl)	0,03	0,009	0,01	0,15	0,15
Perda ao Fogo	16,72	20,30	4,31	5,85	7,21

n.d. = não detectado

Ensaio Geotécnicos dos Materiais

Os ensaios geotécnicos realizados para caracterizar os materiais de cobertura e o rejeito serviram para projetar as células experimentais da estação. Procedeu-se0 1ensaio de caracterização geotécnica (análise granulométrica, limites de consistência e densidade real dos grãos), condutividade hidráulica saturada, ensaio de compactação, ensaio de curva característica. Estes ensaios contribuíram para a definição dos parâmetros a serem adotados nas coberturas tais como espessura das camadas, arranjo das camadas, densidade dos materiais, entre outros.

Tendo em vista a importância da caracterização geotécnica dos materiais de cobertura, para o presente trabalho, apresentar-se-á, a seguir, a síntese dos resultados dos ensaios geotécnicos realizados por Mendonça (2004). Pelo mesmo motivo também se apresentará a síntese dos ensaios geotécnicos realizados na cinza por Ubaldo (2005).

Os resultados da análise granulométrica dos materiais obtidos para cinza grossa e argila encontram-se na Tabela 5. Constata-se que o material argiloso analisado possui teor médio de 18% de areia, o que sugere ser esse material argiloso não muito plástico, portanto não passível de apresentar muitas trincas devido à saturação e ao ressecamento do material.

Tabela 5 - Resultados da análise granulométrica.

Material	Argila (%)	Silte(%)	Areia(%)			Pedregulho
			Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)	
Cinza grossa	4	36	5	2	1	2
Argila	27	35	9	8	1	-

Os ensaios para determinação dos limites de Atterberg constataram que a cinza grossa é considerada material não plástico. Os valores referentes à amostra de argila foram: limite de liquidez de 24,8%, limite de plasticidade de 12,5% e índice de plasticidade de 12,3%.

A determinação da densidade real dos grãos e os resultados obtidos foram de **2,043** para a cinza grossa e de **2,667** para a argila.

A Tabela 6 ilustra os valores de condutividade hidráulica saturada da cinza grossa e da argila.

Tabela 6 - Coeficientes de condutividade hidráulica saturada da cinza grossa e argila

Material	(cm/s)
Cinza grossa	$2,45 \times 10^{-4}$
Argila	$3,25 \times 10^{-6}$

A Tabela 7 apresenta o resumo dos valores de umidade ótima ($W_{ót}$) e de peso específico aparente seca máximo ($\bar{\alpha}_{dmáx}$) em ensaios de compactação, obtidos para cinza grossa e argila, respectivamente.

Tabela 7 - Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Material	$W_{ót}$ (%)	$\bar{\alpha}_{dmáx}$ (g/cm³)
Cinza grossa	40	0,99
Argila	14,20	1,810

Considerando-se a realização de ensaios geotécnicos nas quatro células, com determinação da umidade, densidade real, granulometria, limites de Atterberg, compactação, permeabilidade saturada e de adensamento, constatou-se maior eficiência da cobertura empregada na célula 3. A aplicação desse tipo de cobertura, mantendo-se os mesmos procedimentos apresentados, pode ser utilizada em depósitos de rejeito para aplicação em escala industrial.

Sensores

Entre as camadas que compõem a cobertura seca das células, instalaram-se sensores de sucção, de temperatura e de umidade, totalizando quarenta e cinco instrumentos, todos conectados a um datalogger para obtenção dos dados. Todos os sensores se posicionaram no centro dos lisímetros e no meio de cada camada, à exceção dos instrumentos posicionados entre as camadas de rejeito grosso, instalados na cota imediatamente acima do topo dos lisímetros. A Tabela 8 mostra a posição e o número de sensores instalados.

Tabela 8- Quantidade e posição dos sensores em cada célula.

Célula	Camadas	Série de sensores*	Posição horizontal (planta)	Posição vertical (perfil)
Célula 1	R. Grosso	1	Centro da cava	Sobre o lisímetro
Célula 2	R. Grosso	1	Centro da cava	Sobre o lisímetro
	R. Misturado	1	Centro da cava	Meio da camada
Célula 3	R. Grosso	1	Centro da cava	Sobre o lisímetro
	R. Misturado	1	Centro da cava	Meio da camada
	Argila	2	Centro da cava	Meio da camada
	Solo Orgânico	1	Centro da cava	Meio da camada
Célula 4	R. Grosso	1	Centro da cava	Sobre o lisímetro
	R. Misturado	1	Centro da cava	Meio da camada
	Cinza	1	Centro da cava	Meio da camada
	Argila	2	Centro da cava	Meio da camada
	Cinza	1	Centro da cava	Meio da camada
	Solo Orgânico	1	Centro da cava	Meio da camada

*1 série de sensores, constituída por 1 sensor de umidade, 1 sensor de temperatura e 1 sensor de sucção.

O sistema de monitoramento dos sensores se compõe de um “*datalogger*”, modelo CR10X (*Campbell Scientific/EUA*); dois multiplexadores, modelo AM 16/32 (*Campbell Scientific/EUA*); um regulador de tensão, Modelo TC-80 (Unitron); uma bateria de 12VDC, modelo VR7-12 (Ajáx Baterias); duas barras de distribuição da alimentação do sistema; um sensor pluviométrico, modelo RG780 (Davis/EUA); quinze sensores de temperatura, modelo T108 (*Campbell Scientific/EUA*); quinze sensores de umidade do solo, modelo 253 (*Campbell Scientific/EUA*); quinze sensores de sucção (conteúdo de água no solo), modelo CS616 *Campbell Scientific/EUA*; um painel solar de 10W, modelo KS-10 (Kyocera); tubo de ferro galvanizado e pintado, de 2”, para fixação da caixa de acondicionamento; suporte de painel solar; e uma caixa ambientalmente selada, de acondicionamento, com cobertura de alumínio para proteger da incidência direta dos raios solares.

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME, TEMPERATURA E ANÁLISES DA LIXÍVIA DO EFLUENTE

4.1.1 Medição do Volume de Drenagem Ácida

Cada uma das quatro células da estação experimental representa um sistema isolado, cujo balanço hídrico pode ser determinado individualmente.

O volume de água percolada gerada nos lisímetros das células foi quantificado através do registro instalado no sistema de drenagem de fundo, acessado através do Poço Central. A quantificação regular desse volume (três a cinco vezes por semana) consistiu em abrir o respectivo registro dos lisímetros e medir o volume em balde graduado com capacidade para 20L, anotando-se os valores em planilha e transferindo-os posteriormente para o banco de dados.

4.1.2 Temperatura

Os dados de temperatura foram obtidos através de sensores instalados a um metro de profundidade no interior dos lisímetros. Para a medição de dados de temperatura (PT100) os sensores são conectados a um sistema de aquisição central (*datalogger*, modelo CR10X). Estes dados são adquiridos diariamente via internet, transferidos para uma planilha em Excel a cada 30 minutos. Para este trabalho foram feitos médias mensais dos valores de temperatura.

4.1.3 Amostragens para as Análises Laboratoriais

Para se avaliar a qualidade das águas percoladas, coletou-se amostra representativa do efluente de cada um dos quatro lisímetros, com periodicidade mensal e/ou quinzenal, no poço de coleta denominado poço central. A Figura 13 ilustra esquema da percolação da água da chuva para o interior do lisímetro e seu direcionamento para o poço central. A Figura 14 ilustra detalhe do interior do poço central, de onde se coletaram as amostras.

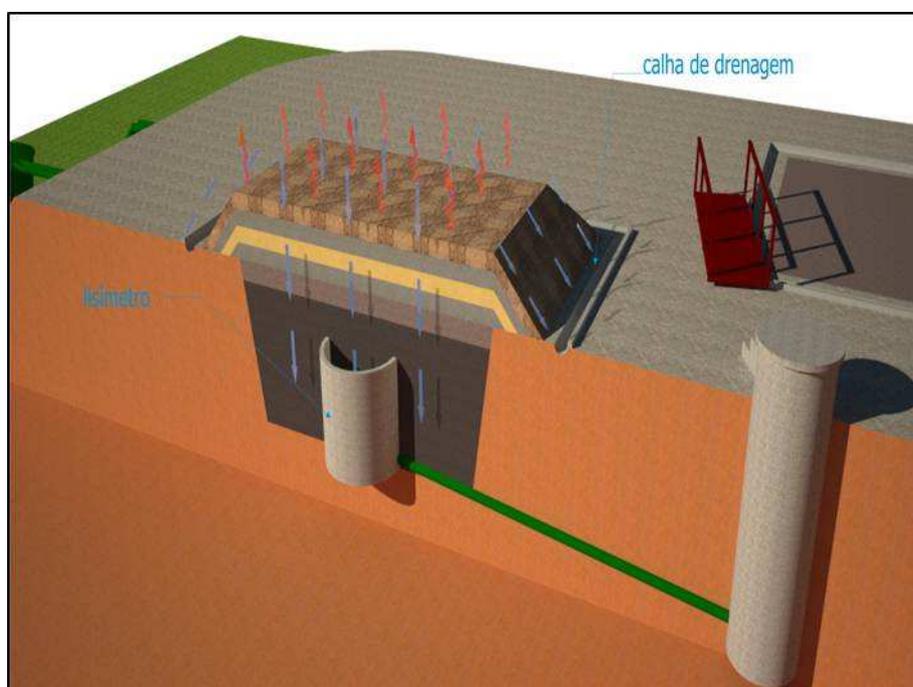


Figura 13 – Corte esquemático da drenagem da água percolada até o poço central.



Figura 14 – Detalhe do interior do poço central.

L1: Tubulação correspondente ao lisímetro 1; L2: Tubulação correspondente ao lisímetro 2; L3: Tubulação correspondente ao lisímetro 3; L4 Tubulação correspondente ao lisímetro 4.

As amostras obtidas para a realização das análises das espécies químicas dissolvidas, como Fe, Mn, sulfato e Al, foram armazenadas em frascos esterilizados, com capacidade para 1L (Figura 15), e enviadas para análises no Laboratório de Análises de Águas do Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológica (IPAT).



Figura 15 – Amostras representativas dos efluentes dos lisímetros.

As análises físico-químicas das amostras, como dos parâmetros pH, condutividade elétrica e potencial de oxi-redução, foram efetuadas no Laboratório da Estação Experimental (Figura 16).



Figura 16 – Laboratório da Estação Experimental.

A Tabela 9 apresenta os períodos de tempo em que se realizou a coleta de amostras (último dia do período) para as análises físico-químicas. Nesse trabalho, analisaram-se apenas os resultados dos efluentes coletados entre os anos de 2009 e 2010, correspondentes ao tempo compreendido entre o período de 15 a 42 (destacado em negrito).

Tabela 9 - Períodos de tempo em que a coleta de amostras foi realizada. Em destaque os períodos correspondentes aos efluentes coletados para análise.

Período		Período	
1	Início a 12/09/07	22	25/08/09 a 23/09/09
2	12/09/07 a 23/10/07	23	23/09/09 a 14/10/09
3	23/10/07 a 03/01/08	24	14/10/09 a 18/11/09
4	03/01/08 a 12/02/08	25	18/11/09 a 10/12/09
5	12/02/08 a 03/03/08	26	10/12/09 a 13/01/10
6	03/03/08 a 10/04/08	27	13/01/10 a 17/02/10
7	10/04/08 a 16/05/08	28	17/02/10 a 17/03/10
8	16/05/08 a 16/06/08	29	17/03/10 a 20/04/10
9	16/06/08 a 24/07/08	30	20/04/10 a 05/05/10
10	24/07/08 a 02/09/08	31	05/05/10 a 25/05/10
11	02/09/08 a 28/10/08	32	25/05/10 a 10/06/10
12	28/10/08 a 25/11/08	33	10/06/10 a 29/06/10
13	25/11/08 a 15/12/08	34	29/06/10 a 13/07/10
14	15/12/08 a 20/01/09	35	13/07/10 a 27/07/10
15	20/01/09 a 10/02/09	36	27/07/10 a 12/08/10
16	10/02/09 a 11/03/09	37	12/08/10 a 23/08/10
17	11/03/09 a 14/04/09	38	23/08/10 a 14/09/10
18	14/04/09 a 14/05/09	39	14/09/10 a 27/09/10
19	14/05/09 a 15/06/09	40	27/09/10 a 19/10/10
20	15/06/09 a 16/07/09	41	19/10/10 a 17/11/10
21	16/07/09 a 25/08/09	42	17/11/10 a 15/12/10

Em 2010, realizaram-se também campanhas de amostragem em períodos de tempo menores, havendo-se analisado os parâmetros pH, Eh e condutividade elétrica para se ter uma interpretação mais esclarecedora dos fenômenos que ocorrem no interior das células.

Paralelamente, a cada trinta minutos armazenaram-se em “*datalogger*” (modelo CR10X, Campbell Scientific) dados de temperatura colhidos com sensores, instalados nas camadas de rejeito e nos materiais de cobertura.

4.3 ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICO-QUÍMICAS DOS LIXIVIADOS

Os efluentes lixiviados dos lisímetros foram analisados quanto aos parâmetros de qualidade de água, como pH, potencial redox, acidez, alcalinidade total, Al, Fe, Mn, Zn, condutividade e sulfato. As análises seguiram os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Os equipamentos utilizados e seus limites de detecção apresentam-se simplificados na Tabela 10.

Tabela 10 - Métodos analíticos, equipamentos e limites de detecção dos parâmetros considerados.

Análise	Método	Equipamento	Limite
pH	Potenciométrico	phmetro Analion modelo PM 608	0,01
Acidez	Titulométrico à pH 8.3	Bureta manual/ pH digital Digimed da Instulab	0,5 mg/L CaCO ₃
Potencial redox	Potenciométrico	phmetro Analion modelo PM 608, eletrodo redox	0,1 mV
Alumínio	Espec. atômica/chama absorção	Varian AA1275	0,1 µg/ml
Ferro	Espec. atômica/chama absorção	Varian AA1275	0,02 µg/ml
Manganês	Espec. atômica/chama absorção	Varian AA1275	0,01 µg/ml
Zinco	Espec. atômica/chama absorção	Varian AA1275	0,01 µg/ml
Sulfato	Turbidimétrico	Turbidímetro	0,1 mg/L
Condutividade	Conducométrico	Marca Instrutherm, modelo CD-850	0,1/1 µS/cm

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, apresentar-se-ão os resultados relacionados ao volume de efluente percolado, à temperatura do material e à qualidade da água coletada nos quatro lisímetros instalados nas quatro diferentes configurações de disposição de rejeitos de carvão. Apresentar-se-á também a análise técnica das quatro células experimentais com relação à eficiência da cobertura seca.

5.1 ANÁLISE DO VOLUME DE EFLUENTE PERCOLADO

A Tabela 11 mostra os volumes acumulados da água percolada nos quatro lisímetros durante o período compreendido entre 2009 e 2010. Esses valores representam parcela correspondente a 20 % do volume total de água percolada em cada uma das quatro células.

Tabela 11 - Volumes acumulados da água percolada nos quatro lisímetros.

Período	Lisímetro 1 (litros)	Lisímetro 2 (litros)	Lisímetro 3 (litros)	Lisímetro 4 (litros)
01/09	16.124,70	5.049,40	130,01	2.138,06
02/09	18.167,70	5.473,90	132,10	2.549,06
03/09	19.763,70	5.902,40	135,35	2.863,56
04/09	20.341,70	6.263,40	139,76	2.939,56
05/09	20.827,20	6.453,40	143,39	2.955,46
06/09	21.432,70	6.642,40	145,24	2.976,84
07/09	22.799,20	6.934,90	146,54	2.994,84
08/09	25.028,20	7.429,90	147,51	3.252,34
09/09	26.196,70	8.035,90	149,31	3.558,34
10/09	27.805,70	8.937,30	151,59	3.749,34
11/09	29.678,70	9.812,30	153,78	4.095,84
12/09	31.641,70	10.719,80	157,41	4.193,63
01/10	33.917,20	11.700,80	161,03	4.597,13
02/10	35.906,70	12.429,80	164,48	4.764,13
03/10	37.533,70	13.203,30	168,16	4.955,13
04/10	39.266,20	13.966,80	171,36	5.413,13
05/10	41.520,70	14.847,30	173,67	6.041,63
06/10	43.497,70	15.441,80	175,18	6.304,13
07/10	45.663,20	16.113,30	175,93	6.601,93
08/10	47.387,70	16.699,80	177,04	6.889,43
09/10	48.259,70	17.059,30	178,29	6.937,93
10/10	49.670,70	17.461,30	179,84	7.017,93
11/10	51.361,70	17.799,80	181,62	7.217,13
12/10	52.356,70	18.157,30	183,69	7.354,13

Quando somados os volumes percolados durante o período de 2009 e 2010 dos quatro lisímetros, obtém-se valor da ordem de 78.051,82L. De acordo com a Tabela 11, observa-se que no lisímetro da célula 1 o valor total percolado foi de 52.356,70L; no lisímetro da célula 2, o valor total percolado foi de 18.157,30L; no lisímetro da célula 3, o volume total, em litros, foi de 183,69; e no lisímetro da célula 4, o volume total percolado foi de 7.354,13L.

Considerando-se o valor total (78.051,82L), o volume de água percolada no lisímetro da célula 1 corresponde a 67,07 %; no lisímetro da célula 2, a 23,26 %; no lisímetro da célula 3, a menos de 1%; e no lisímetro da célula 4, a 9,42%.

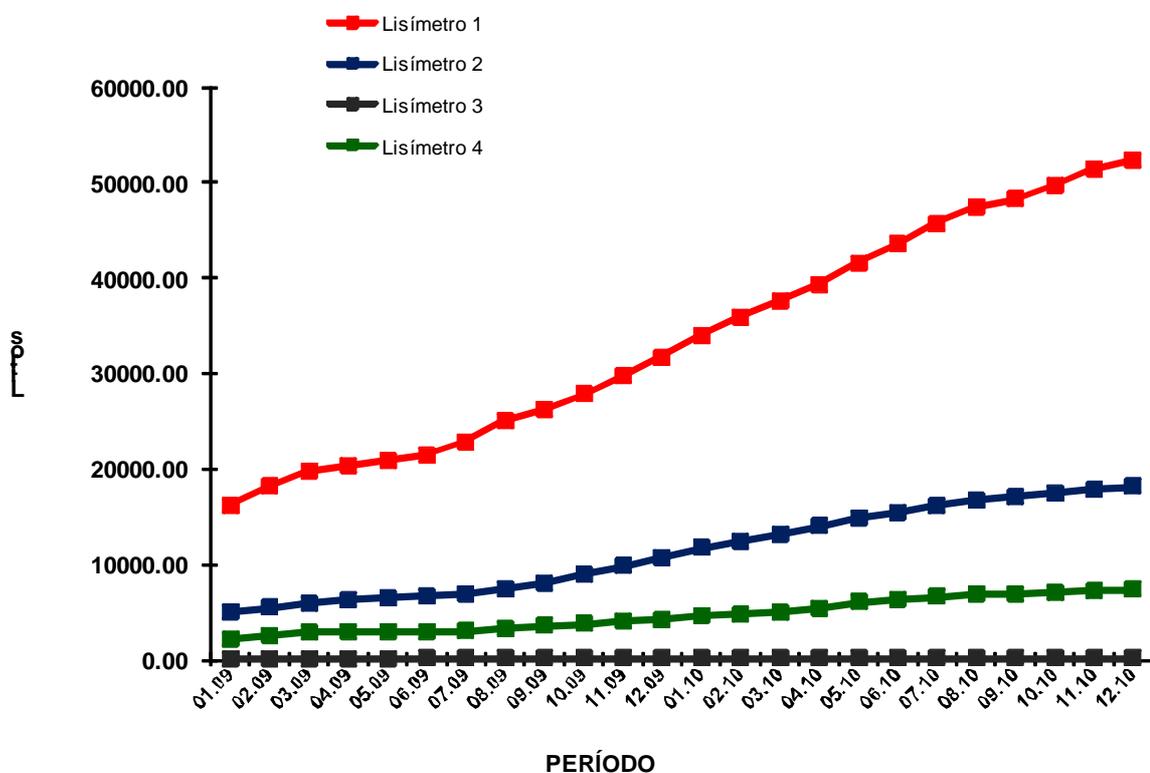


Figura 17 – Volumes acumulados de água nos quatro lisímetros.

A Figura 18 mostra as precipitações mensais, em milímetros, registradas no período de 2009. A Figura 19 mostra as precipitações mensais, em milímetros, registradas no período de 2010. No período de 2009, os volumes máximos de chuva ocorreram nos meses de janeiro e setembro, com 300mm e 400mm, respectivamente. No período de 2010, os volumes máximos de chuva ocorreram nos meses de janeiro, maio e novembro, com valores da ordem de 200mm, 300mm e 2.100mm, respectivamente.

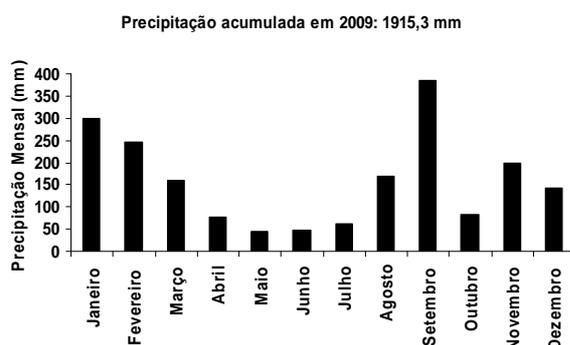


Figura 18 – Precipitação mensal no ano de 2009.

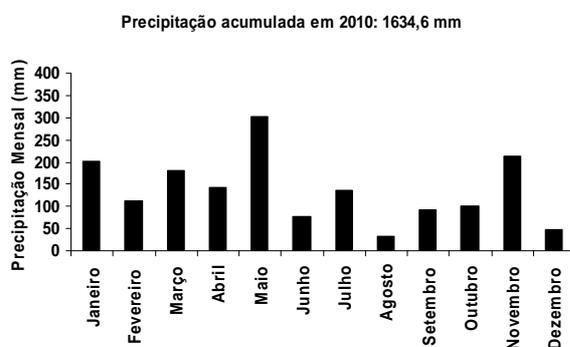


Figura 19 – Precipitação mensal no ano de 2010.

5.2 TEMPERATURA

A Figura 20 apresenta os dados de temperatura nas células, obtidos através de sensores instalados no interior do rejeito grosso, a 1m de profundidade. Na célula 1, registraram-se valores de temperatura entre 30 e 45°C; na célula 2, os valores foram de 25 a 30°C; na célula 3, os valores encontrados estão entre 18 e 25°C; na célula 4, a temperatura encontrada variou entre 20 e 25°C.

Na célula 2, a temperatura diminuiu substancialmente, porém, ainda está bem acima da temperatura ambiente. As temperaturas medidas mais elevadas registraram-se nas células 1 e 2 e se devem à ocorrência de reações exotérmicas de oxidação, catalisadas pela ação das bactérias. No caso das células 3 e 4, as temperaturas oscilaram entre valores próximos aos da temperatura média ambiente.

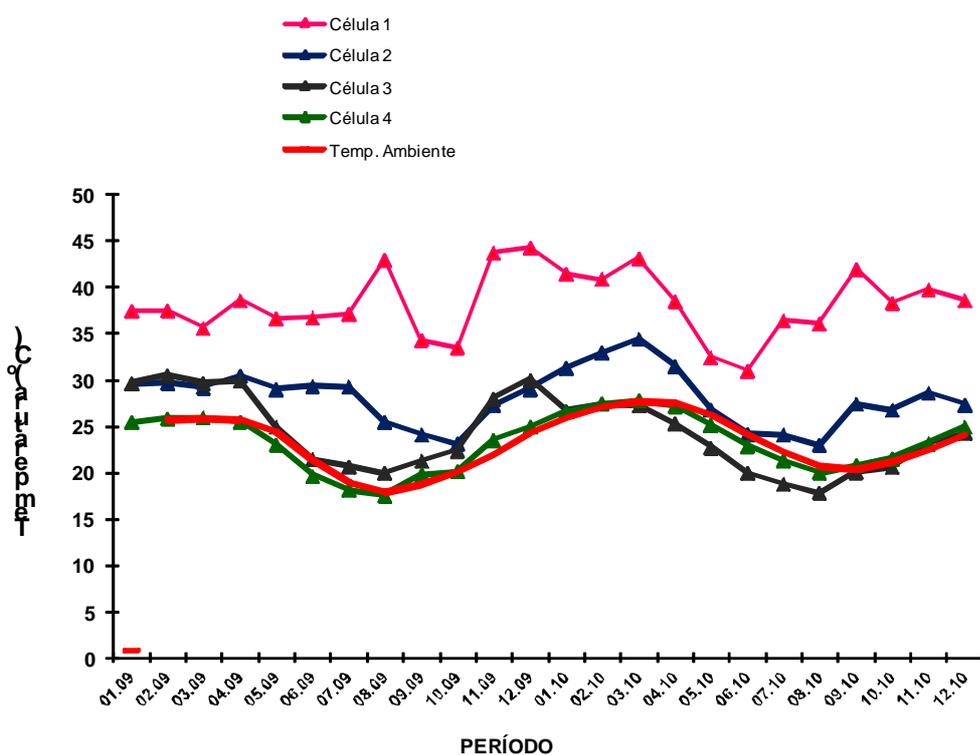


Figura 20 – Temperaturas observadas no rejeito grosso, a 1m de profundidade nas quatro células.

5.3 PARÂMETROS QUÍMICOS E FÍSICO-QUÍMICOS DOS EFLUENTES PERCOLADOS

A água da chuva, ao percolar o rejeito nas quatro células experimentais, gera efluentes com diferentes características. A Figura 21 mostra o aspecto geral das águas coletadas nos quatro lisímetros. No L1 (lisímetro 1), o efluente apresenta cor alaranjada, típica da presença de Fe^{3+} , indicando condição oxidante. No L2 (lisímetro 2), a coloração é esverdeada, típica da predominância de Fe^{2+} , evidenciando condição mais redutora. Nos L3 (lisímetro 3) e L4 (lisímetro 4), o efluente não apresenta coloração, o que evidencia menor concentração de Fe e inibição do processo de oxidação da pirita.



Figura 21 – Aspecto visual das amostras representativas dos efluentes nos quatro lisímetros.

5.3.1 pH

A Figura 22 mostra que os valores de pH do efluente percolado nas células 1 e 2 são baixos e que o pH do efluente percolado nas células 3 e 4 estabilizou-se em uma faixa neutra.

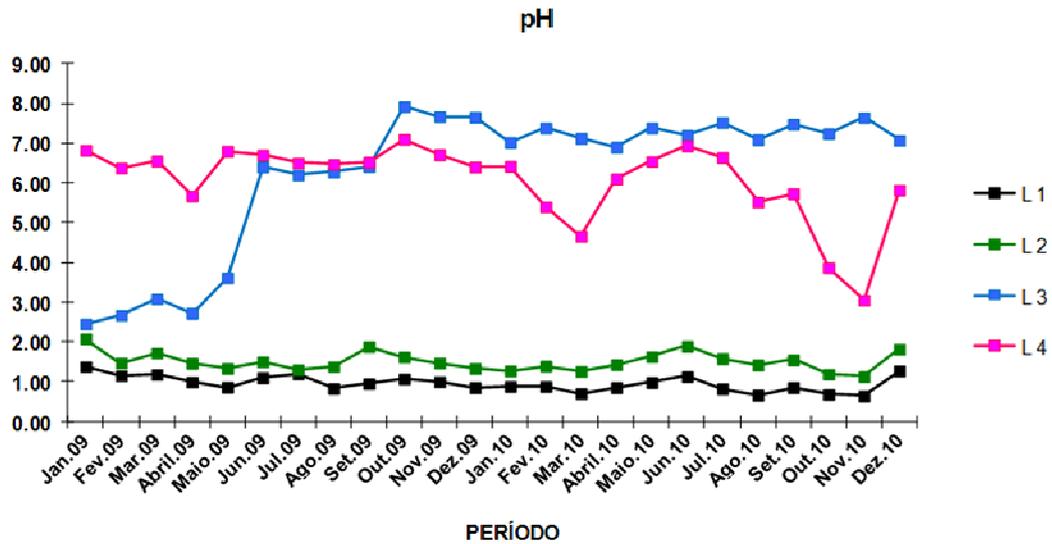


Figura 22 – Valores de pH dos efluentes percolados nas quatro células.

Excepcionalmente, no período de coleta e de análise, que se estendeu de janeiro a maio de 2009, os valores de pH obtidos no efluente percolado da célula 3 foram mais baixos. Esse fato coincidiu com período de precipitação elevada (acima de 300mm) e maior quantidade de água percolada pelo lisímetro da célula 3 (Figuras 18 e 19). Nesse período, acredita-se que hajam surgido fissuras na camada de argila (impermeável), o que permitiu a entrada de água e de ar no rejeito. Com isto, houve reações de oxidação da pirita e geração de drenagem ácida. Essa hipótese é corroborada pelo fato de outros parâmetros também terem sofrido alterações, como o aumento do Eh (Figura 23), o aumento nas concentrações de alguns metais como Fe, Al, Cu e Zn, e elevação da acidez.

Da mesma forma, houve queda no pH do efluente do L4 no período que se estende de outubro a novembro de 2010, fato esse inesperado, pois o período mencionado foi seco (Figura 19). Nesse período também houve alterações em outros parâmetros de qualidade da água, como o aumento do Eh (Figura 23), o aumento nas concentrações de Fe, Al, Cu e Zn, e da acidez. Esse fato se explica pelo surgimento de fissuras na camada de argila devido à ausência de saturação que deveria ter sido mantida pela camada sobrejacente e subjacente de cinzas de fundo. Esta ausência permitiu a entrada simultânea de ar e água, o que possibilitou a geração de drenagem ácida.

5.3.2 Potencial Redox – Eh

Com relação às células 1 e 2, o potencial redox permaneceu por todo o período na faixa entre 600 – 700 mV, acompanhando os menores valores de pH e contribuindo significativamente para a solubilização das espécies químicas, o que provocou a geração de DAM. Porém, no caso dos efluentes percolados nas células 3 e 4, o gráfico da Figura 23 mostra que na maior parte do período monitorado o potencial redox ficou na faixa de 250 a 400 mV.

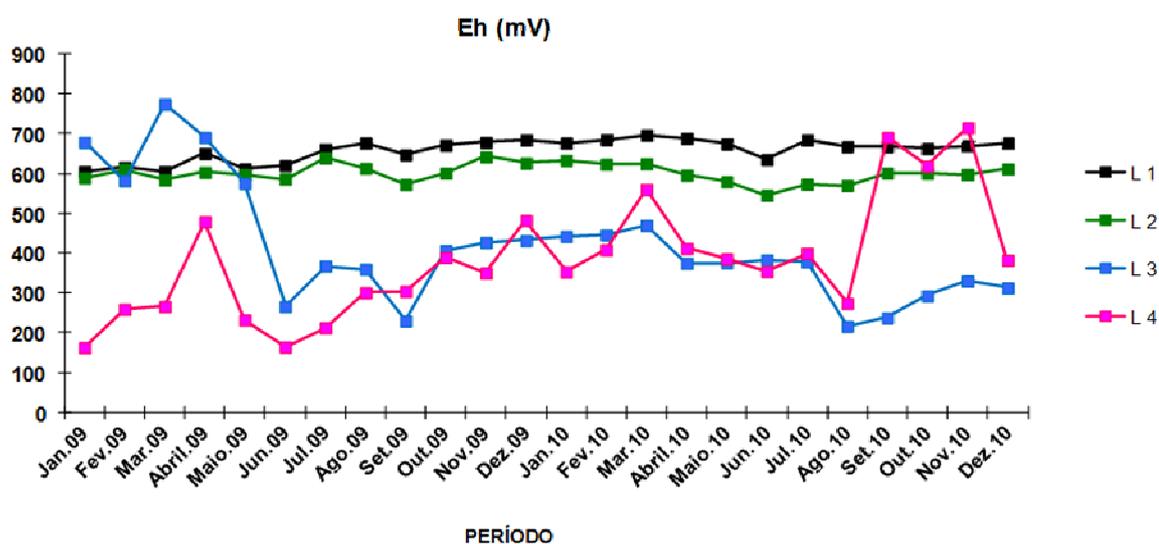


Figura 23 – Valores de Eh dos efluentes percolados nas quatro células.

O potencial de oxi-redução (Eh) indica o nível de energia potencial, determinado de acordo com o estado de equilíbrio entre os oxidantes e redutores que coexistem na solução.

A partir das faixas de variação dos valores de pH e Eh, determinados nos efluentes das células, foi possível localizar as áreas onde termodinamicamente se situam os efluentes no diagrama de Pourbaix Fe/H₂O - pH x Eh (Figura 24). Observa-se nitidamente que os efluentes das células 1 e 2 se localizam em região de predomínio do Fe na forma solúvel em água enquanto que os efluentes gerados

nas células 3 e 4 apresentam características semelhantes às de rios (LEVISON, 1980 *apud* RITCEY, 1994).

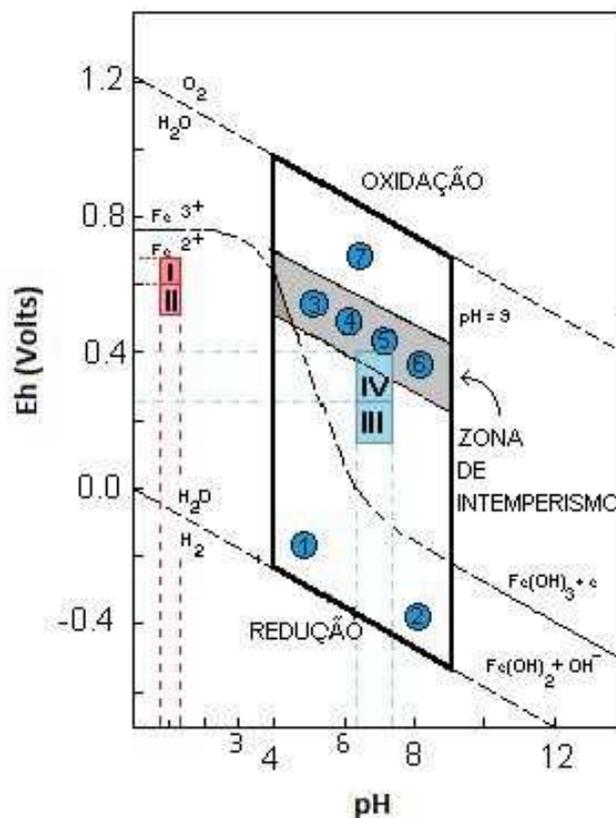


Figura 24 – Diagrama Eh x pH - Fe - H₂O.

I – Efluente percolado no lisímetro 1; II – Efluente percolado no lisímetro 2; III – Efluente percolado no lisímetro 3; IV – Efluente percolado no lisímetro 4; ① Ambiente de pântano e solos encharcados; ② Sedimentos marinhos redutores; ③ Água ácida de mina; ④ Água da chuva; ⑤ Água de rios; ⑥ Água dos oceanos; ⑦ Depósitos de sulfetos de Pb oxidados.

Fonte: LEVINSON, 1980 (*apud* RITCEY 1989).

5.3.3 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica (CE) é a expressão numérica da habilidade de uma solução aquosa de transmitir corrente elétrica. Essa capacidade depende da presença de íons, da concentração total dos íons, da mobilidade, da valência, das concentrações relativas e da temperatura. A Figura 25 mostra que a condutividade

elétrica, expressa em mS/cm, foi muito superior nos efluentes das células 1 e 2, indicando maior quantidade de íons presentes na solução. A dissolução dos íons foi consequência dos baixos valores de pH (elevada acidez), o que ocasionou a solubilização das espécies químicas. Os valores de condutividade elétrica nos efluentes das células 3 e 4 são bastante baixos, o que confirma a eficiência do processo de cobertura seca na redução da concentração das espécies iônicas dissolvidas.

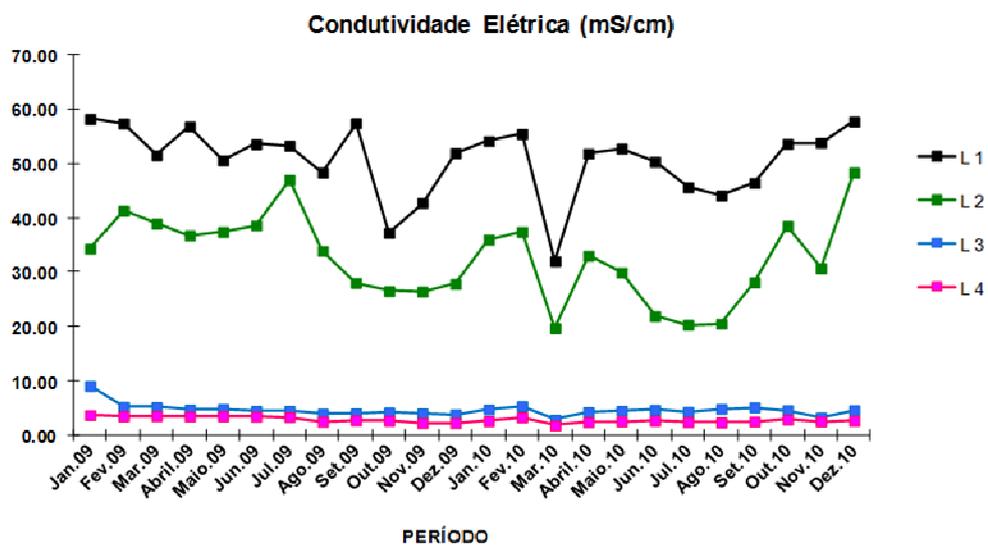


Figura 25 – Valores de condutividade elétrica nos efluentes percolados nas quatro células.

5.3.4 Acidez

A acidez é a capacidade, em termos quantitativos, de reação do meio aquoso com íons hidroxila. A acidez resulta da presença de íons hidrogênio, dissociados de ácidos fortes e cátions de bases fracas, particularmente aquelas de metais pesados. Mede-se esta capacidade através da titulação do meio com solução de NaOH, utilizando-se a Fenolfatleína ($C_{20}H_{14}O_4$) como indicador do ponto de viragem (Merck Index 10, 7117 – 1990/91).

Observa-se na Figura 26 que os valores de acidez (mg/L) foram muito superiores nas células 1 e 2 se comparados aos obtidos nas células 3 e 4. A Figura 27 exhibe os valores de acidez em escala mais detalhada para os resultados das células 3 e 4. Entre estes, os valores de acidez do efluente da célula 3 foram ainda inferiores aos do efluente da célula 4.

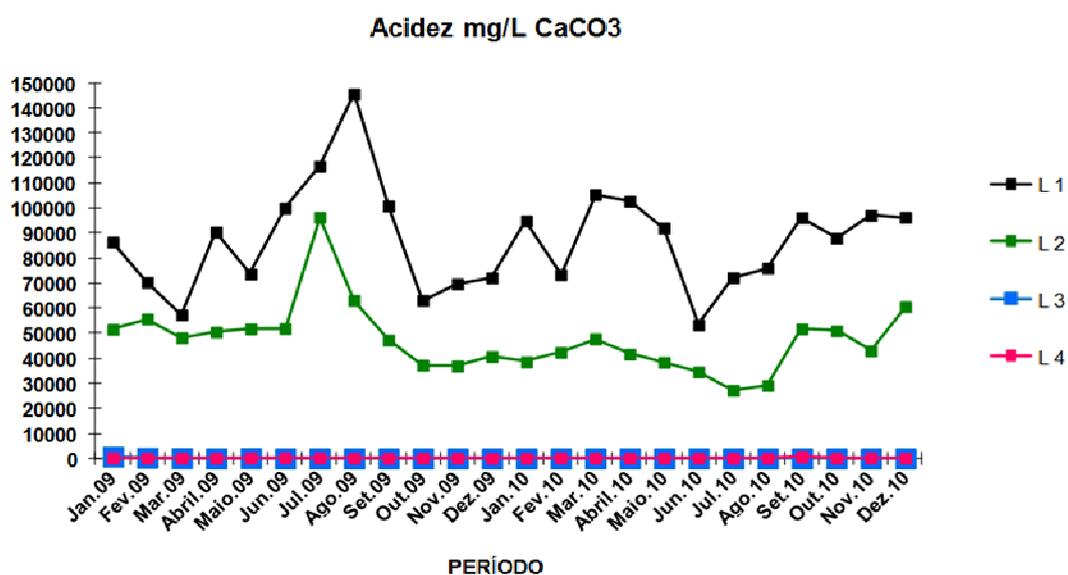


Figura 26 – Valores de acidez nos efluentes percolados nas quatro células.

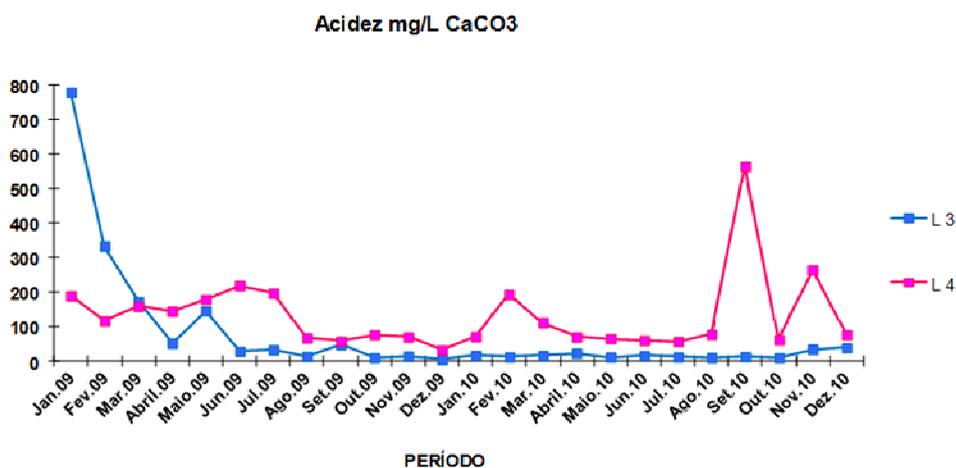


Figura 27 – Valores de acidez nos efluentes percolados nas células 3 e 4.

5.3.5 Sulfatos

O conjunto de sais, normalmente dissolvidos na água, é representado pelos bicarbonatos, cloretos e sulfatos, além de outros sais em menor concentração, o que confere à água sabor salino e propriedade laxativa.

O sulfato é um dos ânions de ocorrência mais comum em águas naturais, constituindo também um dos principais indicadores de qualidade dos mananciais para abastecimento público e industrial. A presença de sulfato em quantidades excessivas é nociva tanto para seres humanos quanto para as redes de distribuição e equipamentos industriais, acarretando elevados custos de manutenção e de tratamento. No caso estudado, o sulfato é produto direto da oxidação da pirita (FeS_2), sendo indicativo da oxidação desse mineral no módulo de rejeitos. A Figura 28 mostra a concentração de sulfatos nas quatro células estudadas. Pode-se verificar que os níveis de sulfato na água de percolação das células 1 e 2 são muito elevados, demonstrando que a oxidação da pirita está ocorrendo em grande intensidade. Comparando-se estas duas células, observa-se que a oxidação da pirita é mais intensa na célula 1 do que na célula 2. Isso demonstra que o preenchimento dos espaços vazios com partículas finas inibe, em parte, o processo de oxidação da pirita, mas não evita a geração da drenagem ácida de mina. Por sua vez, os níveis de sulfato na água de percolação das células 3 e 4 são muito baixos, evidenciando que a oxidação da pirita foi, em grande parte, inibida.

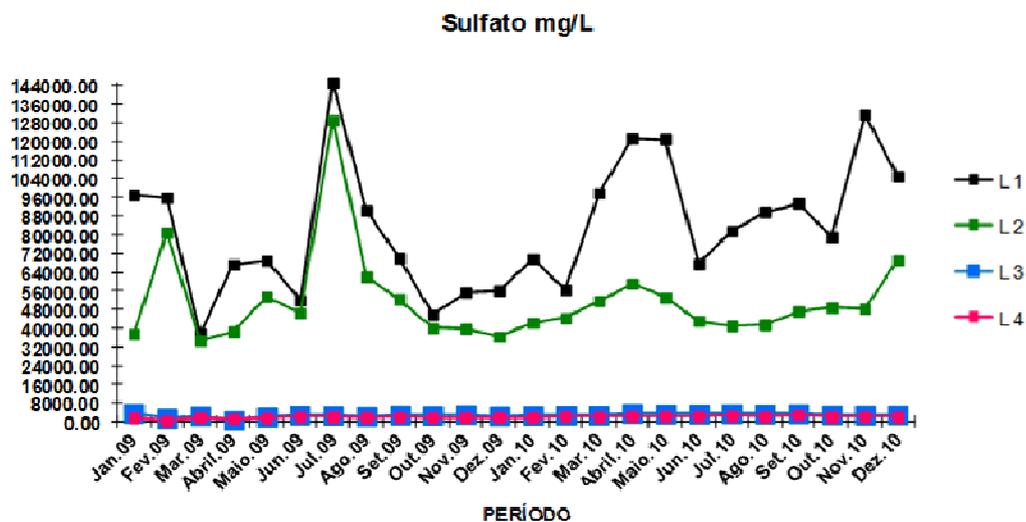


Figura 28 – Valores de sulfatos nos efluentes percolados nas quatro células.

5.3.6 Ferro Total

Da mesma forma que o sulfato, o Fe é produto direto da oxidação da pirita. Pode-se observar na Figura 29 que a concentração de Fe na água de percolação é maior no efluente coletado no L1, seguido do L2. A água dos L3 e L4 apresenta concentrações de Fe muito baixas. Esses dados confirmam os resultados obtidos com o sulfato, demonstrando que processos químicos e microbiológicos de oxidação da pirita e geração da DAM ocorrem nas células 1 e 2. Contudo, esses processos são inibidos pela presença de cobertura seca tanto na configuração da célula 3 como na da célula 4.

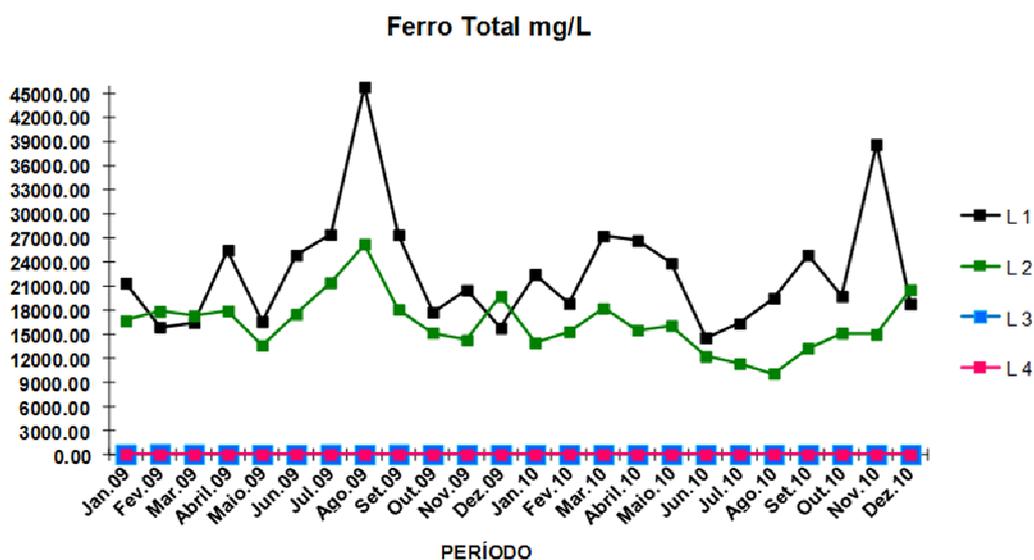


Figura 29 – Valores de Fe total nos efluentes percolados nas quatro células.

5.3.7 Outros metais (Al, Mn, Cu e Zn)

O Al é um dos principais metais presentes na DAM. A concentração deste elemento em valor acima de 0,5 mg/L no efluente com pH abaixo de 5,5 pode eliminar todos os peixes e muitos macroinvertebrados presentes na drenagem atingida. Comparativamente ao Fe e ao Mn, o Al é mais prejudicial à vida aquática e ao organismo humano, no qual é suspeito de contribuir para o desenvolvimento de neuropatias como o mal de Alzheimer.

A Figura 30 mostra que a concentração de Al é muito superior nas células 1 e 2 se comparada aos valores presentes nas células 3 e 4. Com relação à célula 1, observa-se que o valor máximo aconteceu em agosto de 2009, com concentração de 7.053,8 mg/L, e o mínimo, em dezembro de 2009, com concentração de 2.467 mg/L. Na célula 2 verificaram-se valores máximos em julho, agosto e setembro de 2009, com concentrações da ordem de 3.156, 2.982 e 2.605 mg/L, respectivamente. Com relação aos valores obtidos nas células 3 e 4, as máximas foram de 6,5 mg/L (março de 2009) e de 6,8 mg/L (novembro de 2010) (Figura 31).

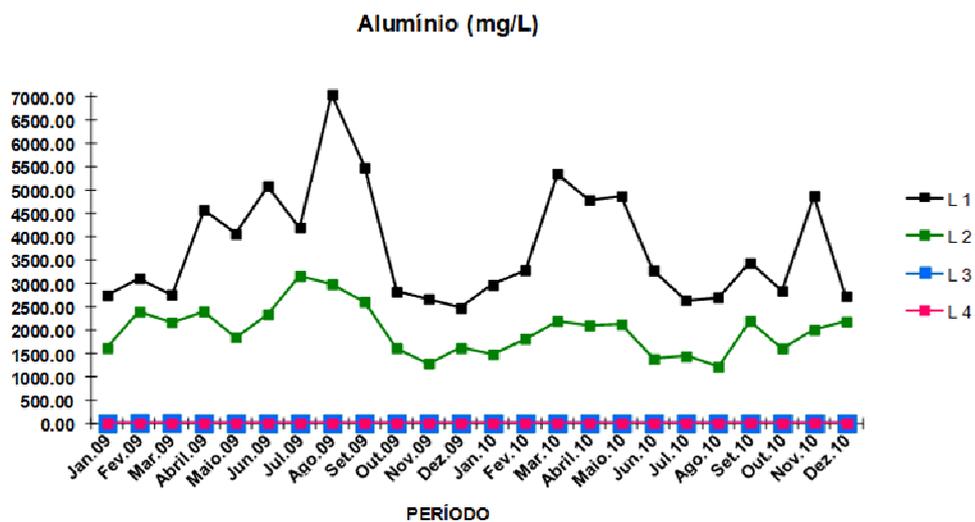


Figura 30 – Valores de Al nos efluentes percolados nas quatro células.

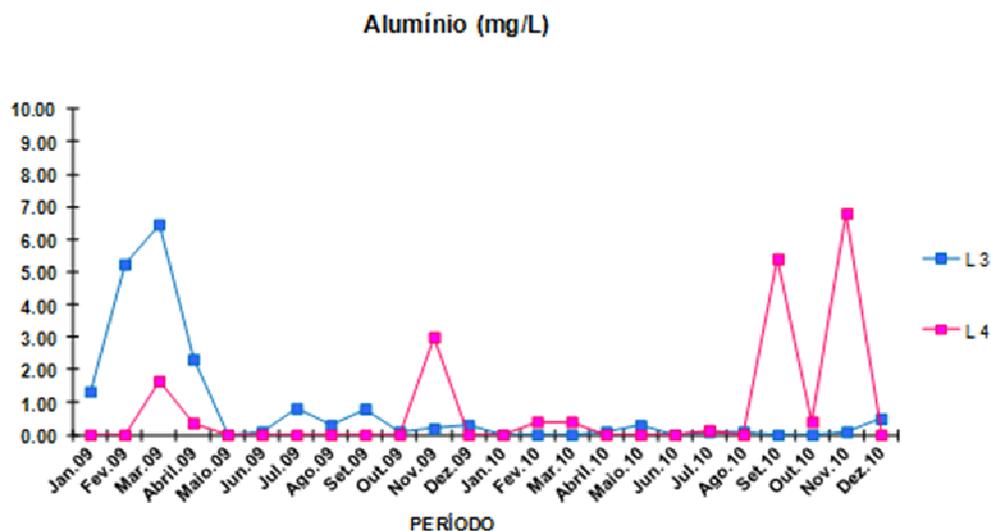


Figura 31 – Valores de Al nos efluentes percolados nas células 3 e 4.

Com relação à concentração de Mn, verifica-se na Figura 32 que na célula 1 a concentração diminui com o passar de tempo, demonstrando que o processo continuado de lixiviação reduz sua concentração. No início do estudo, em 2008, os valores iniciaram com concentração de 308,3 mg/L. Ao final de 2010, a concentração foi medida em 8,78 mg/L. Na célula 2, a lixiviação ocorre de forma mais lenta, pois sua concentração inicial foi de 451,1 mg/L em 2008 e ao final de 2010 o valor obtido foi de 62,1 mg/L. Os valores obtidos nas células 3 e 4, se comparados aos das células 1 e 2, são bem inferiores, mas ainda assim acima do limite máximo permitido pela Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005 (Figura 33). Esse fato reforça a necessidade de tratamento complementar para se atender a este parâmetro.

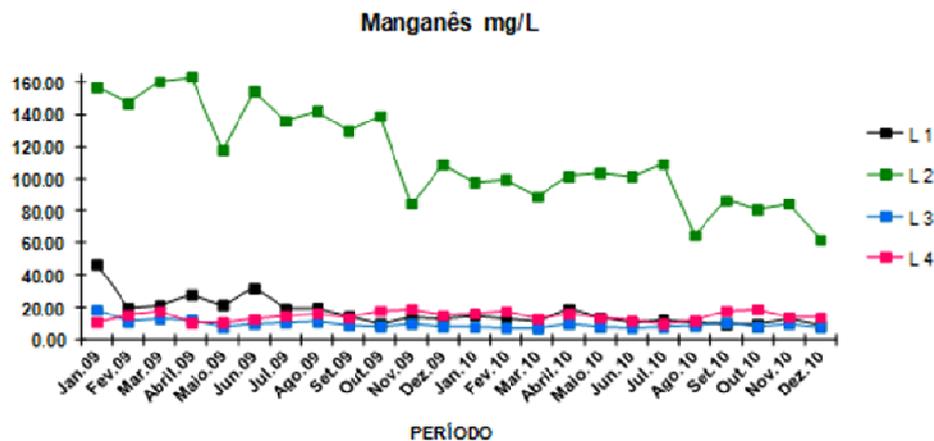


Figura 32 – Valores de Mn nos efluentes percolados nas quatro células.

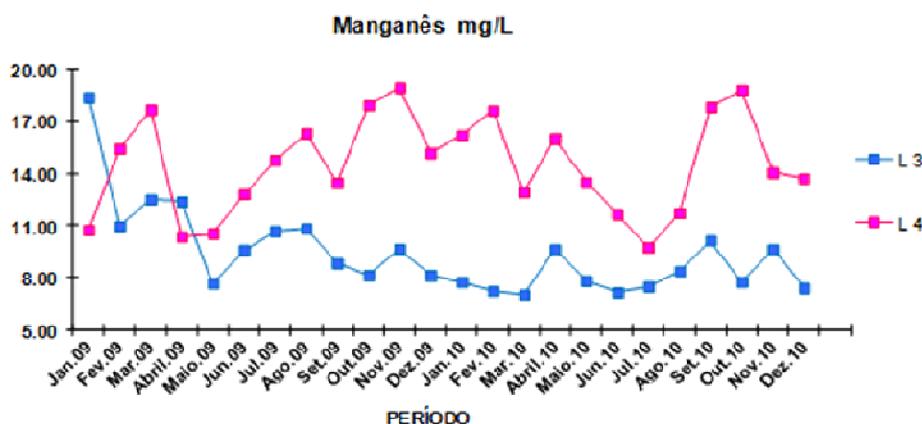


Figura 33 – Valores de Mn nos efluentes percolados nas células 3 e 4.

Em relação à concentração de Cu, observa-se no gráfico da Figura 34 que os valores obtidos nos efluentes percolados nas células 1 e 2 foram muito superiores ao das células 3 e 4. Na célula 1 as concentrações tiveram valores máximos na ordem de 32,4 e 28,1 mg/L nos meses de agosto e setembro de 2009, respectivamente. Na célula 2 os valores máximos verificaram-se nos meses de setembro, agosto e julho de 2009, com 22,5 mg/L, 19,2 mg/L e 18,2 mg/L, respectivamente. Os valores obtidos nas células 3 e 4 estiveram abaixo de 1 mg/L, limite máximo permitido pela Resolução CONAMA N.º. 357, de 17 de março de 2005 (Figura 35).

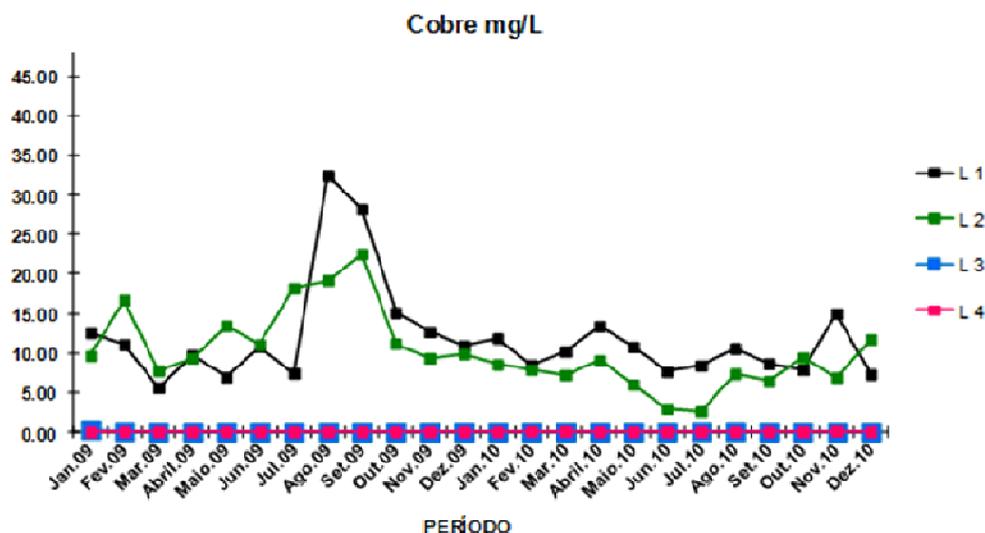


Figura 34 – Valores de Cu nos efluentes percolados nas quatro células.

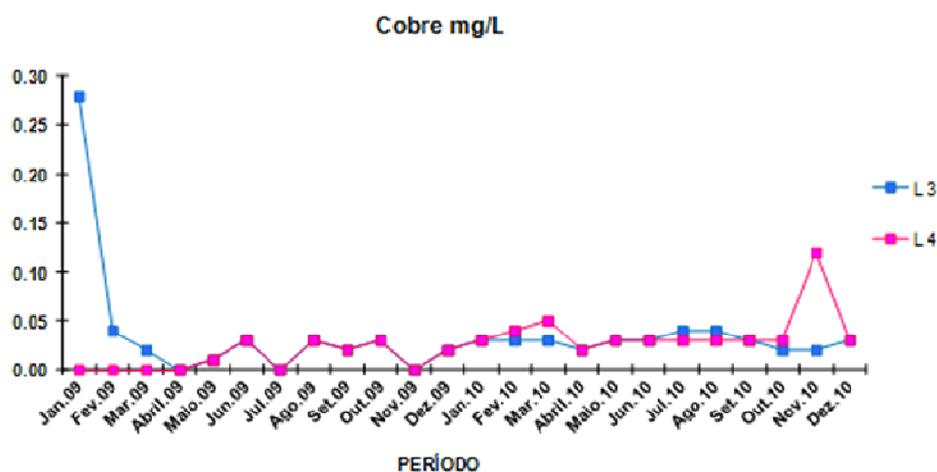


Figura 35 – Valores de Cu nos efluentes percolados nas células 3 e 4.

Em relação à concentração de Zn, os valores obtidos nos efluentes percolados nas células 1 e 2 foram muito superiores ao das células 3 e 4 (Figura 36). Na célula 1, o efeito foi similar ao do Mn, havendo diminuição na concentração no decorrer do tempo. Os valores obtidos nas células 3 e 4 estiveram abaixo de 1 mg/L, limite máximo permitido pela Resolução CONAMA Nº 357 (Figura 37).

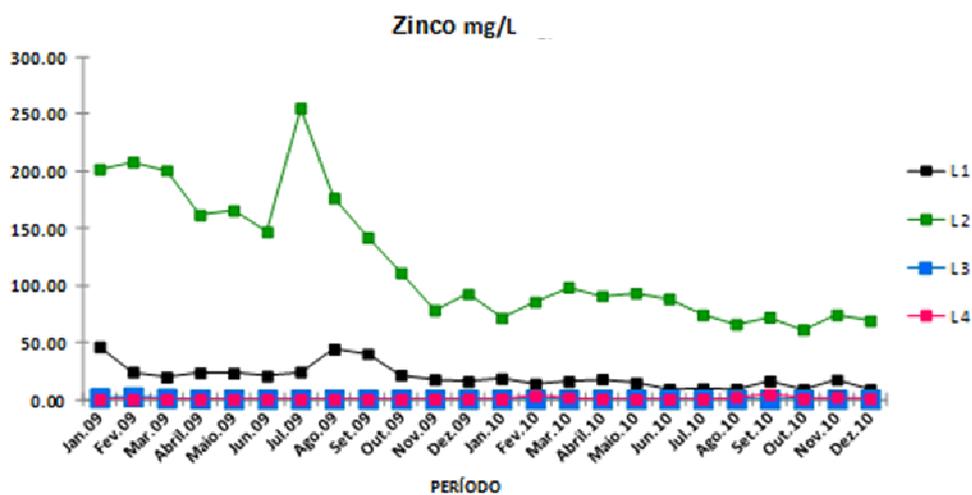


Figura 36 – Valores de Zn nos efluentes percolados nas quatro células.

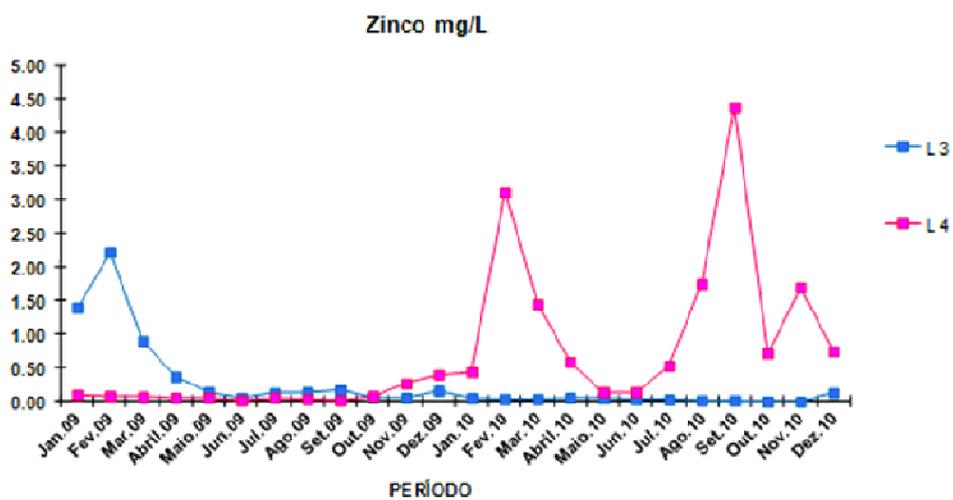


Figura 37 – Valores de Zn nos efluentes percolados nas células 3 e 4.

5.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS COBERTURAS

Os resultados do monitoramento realizado ao longo de dois anos permitem que se proceda a uma avaliação preliminar do desempenho das coberturas secas projetadas.

A seguir, apresentam-se avaliações para cada uma das células e dos diferentes tipos de cobertura seca utilizados.

5.4.1 Célula 1

Essa célula não possui nenhum tipo de cobertura e representa a situação muito comum outrora observada em diferentes locais da bacia carbonífera, isto é, pilhas de rejeito dispostas a céu aberto, sem quaisquer técnicas de controle sobre a geração de DAM. Assim, pode-se considerá-la referência na avaliação da eficiência das demais células.

O volume de água percolado no lisímetro dessa célula, ou seja, o L1 (52.356,70 L), corresponde a 66,48 % do volume total percolado nos quatro lisímetros. Os valores médios obtidos do efluente gerado indicaram elevadas concentrações de Fe total, sulfato e outras espécies químicas como Al, Mn, dentre outras, pH baixo (em torno de 1), elevada condutividade elétrica e potencial de oxidação na faixa de 650 a 700 mV. O volume percolado e a qualidade do efluente coletado refletem o tipo de água a ser liberada ao meio ambiente se nenhum tipo de tratamento for feito e o rejeito ficar exposto ao meio ambiente.

5.4.2 Célula 2

A célula 2 possui camada de 30cm de rejeito misturado (mistura de rejeito grosso e fino oriundo do processo de beneficiamento da CCSA), denominado no texto “pré-cobertura”. Essa pré-cobertura se compõe de material reativo e não se pode considerá-la cobertura seca. Porém, esta configuração visa a verificar a diminuição no fluxo de água para o interior do rejeito grosso uma vez que o rejeito misturado possui condutividade hidráulica inferior à do rejeito grosso.

O volume de água percolado no lisímetro dessa célula (18.157,30 L) corresponde a 23,71% do volume total percolado nos quatro lisímetros. Em relação à célula 1, verificou-se, no período analisado, redução de 65,30% do volume percolado no rejeito grosso com a aplicação da camada de rejeito misturado.

Os resultados dos laudos analíticos realizados nas campanhas amostrais revelaram que a água percolada pelo rejeito na célula 2 é de má qualidade, com valor médio de pH (em torno de 2), alta condutividade elétrica e potencial de oxidação em torno de 600 mV. As concentrações de Fe total, sulfato, Mn e Al também são elevadas, com valores muito acima dos níveis máximos tolerados pela legislação ambiental (CONAMA 357). Como no caso da célula 1, a célula 2 também necessita de tratamento ativo, por exemplo, com reagentes alcalinos.

Deve-se levar em conta também que a água do escoamento superficial também será ácida (pH inferior a 3) se a camada denominada pré-cobertura não for protegida por camadas superiores. Além do tratamento da água percolada é necessário tratar-se a água do escoamento superficial.

5.4.3 Célula 3

A célula 3 foi construída com o emprego de camada de 30cm de argila compactada sobre a qual se colocou camada de solo orgânico não compactado para proteger a primeira. A quantidade de água percolada através do rejeito foi muito pequena se comparada à do efluente percolado nas células 1 e 2.

O uso desse tipo de cobertura (rejeito misturado + argila + solo orgânico) reduziu em mais de 99% o fluxo de água percolada no rejeito grosso. Em relação à célula 1, verificou-se, no período analisado, redução de 99,30% do volume percolado no rejeito grosso com aplicação da camada de rejeito misturado e argila.

Os valores médios dos laudos analíticos demonstraram que a qualidade do efluente gerado até o final do ano de 2010 é boa, requerendo apenas alguma melhoria nas concentrações de sulfato e de Mn.

A cobertura da célula 3 apresentou-se, até o momento, eficiente na minimização do fluxo de água para o interior do rejeito (183,69L) na medida em que formou uma barreira hidráulica. Porém, essa eficiência deve ser verificada ao longo do tempo de monitoramento para conferir se as camadas de cobertura mantêm, em longo prazo, o mesmo desempenho e integridade. Se, por algum motivo, esta “eficiência hidráulica” não se mantiver, devido à erosão ou a trincas na camada argilosa, haverá geração de DAM.

5.4.4 Célula 4

A barreira capilar dupla da célula 4 se compõe de camada inferior de cinza grossa + camada de argila + camada superior de cinza grossa. Sobre a barreira capilar depositou-se camada de solo orgânico não compactado.

O volume de água percolado no lisímetro da célula 4 (7.354,13L) corresponde a 13,0% do volume total percolado nos quatro lisímetros. Pode-se, pois, deduzir que este tipo de cobertura reduz em 86% o fluxo de água para dentro do rejeito.

Os valores de pH sempre estiveram em níveis aceitáveis pela legislação ambiental (pH entre 5,0 e 9,0). As concentrações das espécies químicas dissolvidas também estão em níveis aceitáveis, à exceção das concentrações de sulfato e Mn, as quais se encontram um pouco acima do permitido e requerem tratamento posterior do efluente.

Se comparados aos da célula 3, os volumes percolados no rejeito grosso, registrados durante o período de monitoramento, foram maiores na célula 4.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabe-se que há uma matriz infindável de possíveis configurações de cobertura tais como barreiras de transporte de oxigênio (atuam de forma a reter a umidade e controlar o fluxo de oxigênio gasoso); barreiras hidráulicas (atuam de forma a impedir, por meio da adoção de camada de material impermeável, o fluxo de água para dentro do material reativo); barreiras evapotranspirativas (atuam de forma a maximizar o armazenamento para a posterior liberação por evapotranspiração); barreiras de consumo de oxigênio (atuam como fonte de consumo de oxigênio de forma a fornecer baixa concentração de oxigênio na interface cobertura/resíduo); barreiras de inibição da reação (atuam de forma a inibir reações, neutralizando o pH). Porém, a escolha da configuração depende de diversos fatores como condições climáticas do local, disponibilidade dos materiais e distância das áreas de material de empréstimo, propriedades e condições dos materiais de cobertura e dos resíduos, topografia do terreno e vegetação (MEND, 1994; MEND, 2001; MEND, 2002).

Neste trabalho, testaram-se três tipos de cobertura, correspondentes às células 2, 3 e 4. A célula 1, destituída de qualquer tipo de cobertura, serviu de referência na avaliação do desempenho das demais células.

A célula 2 recebeu pré-cobertura composta de mistura de rejeito fino e grosso, que atua como barreira hidráulica. Porém, o material usado nesse tipo de cobertura é o próprio material (rejeito grosso e fino) reativo. Este tipo de cobertura vem sendo utilizado por algumas empresas da região com o intuito de reduzir a quantidade de água que se infiltra no rejeito durante períodos chuvosos. Segundo técnicos do CETEM (2009), a aplicação desse tipo de cobertura reduz em cerca de 70% a água percolada para dentro do depósito de rejeito, consideradas as condições de densidade do rejeito misturado na célula 2 (2,00 t/m³). Assim, esse tipo de cobertura reduz o fluxo de água para dentro do depósito, mas não reduz os efeitos da DAM.

A célula 3, constituída por camada de argila devidamente compactada colocada sobre pré-cobertura de rejeito grosso e fino compactado, atua como

barreira hidráulica. A qualidade da água percolada revelou-se boa, o que leva à conclusão de que este tipo de cobertura atua também como barreira para o transporte de oxigênio para o interior do rejeito, impedindo, assim, o fluxo de oxigênio gasoso e a conseqüente geração de DAM. O tipo de cobertura construído na célula 3 não é praticado em depósitos convencionais de rejeito na região carbonífera. O procedimento adotado pelas empresas é somente o da utilização de argila disposta sobre o rejeito em estado natural, sem construção sistemática da pré-cobertura, tal como preconizado nesse trabalho. Tendo em vista o excelente resultado obtido na célula 3, recomenda-se a adoção desse procedimento para todos os depósitos de rejeito da região, uma vez que há geralmente uma jazida de material argiloso nas proximidades das áreas degradadas pela presença de rejeitos de carvão.

Ensaaios geotécnicos nas células, inclusive na célula 3, como determinação da umidade, densidade real, granulometria, limites de Atterberg, compactação, permeabilidade e propriedades de adensamento, apontaram maior grau de eficiência da cobertura empregada na célula 3. Este tipo de cobertura, mantidos os mesmos procedimentos apresentados, pode ser adotado para depósitos de rejeito em escala industrial. Porém, deve-se verificar sua eficiência ao longo do tempo para se saber se as camadas de cobertura conservam o mesmo desempenho e a mesma integridade em longo prazo. Se, por algum motivo, essa “eficiência hidráulica” não for mantida, como, por exemplo, devido à ação de processos erosivos nas camadas superiores e a trincas na camada argilosa, além da ocorrência de fluxos relativamente maiores, é provável que ocorra geração de DAM. É necessária, pois, manutenção constante para se prevenir possível surgimento de fraturas e também eliminar a vegetação arbustiva, cujo sistema radicular profundo pode comprometer a eficiência da cobertura.

A célula 4 foi coberta com barreira capilar dupla, colocada sobre pré-cobertura de rejeito grosso e fino compactado. Ao se comparar a célula 4, cuja função é a de barreira hidráulica, à célula 3, verifica-se que sua eficiência foi inferior, pois no período de dois anos permitiu a infiltração de 7.000L para o interior do rejeito enquanto que na célula 3 o volume percolado foi de apenas 180L.

Quanto aos aspectos qualitativos, os resultados obtidos por ocasião do monitoramento evidenciaram que em ambas as células a água percolada era de boa qualidade, à exceção dos parâmetros de sulfato e Mn, cujos valores estiveram fora dos padrões em ambas. Desta forma, e não havendo qualquer vantagem significativa com a utilização da célula 4 no que se refere à geração de DAM, deve-se avaliar os aspectos construtivos, incluindo-se custos de matéria-prima e facilidades de implantação desse tipo de cobertura em depósitos convencionais de rejeito, cujas áreas superam, em geral, 10ha. Com relação aos aspectos construtivos, deve-se levar em conta as atividades necessárias à sua construção e o custo da matéria prima utilizada.

No capítulo Materiais e Métodos, detalha-se a construção desses dois tipos de cobertura. Para a construção da cobertura da célula 4, necessita-se grande volume de cinza, o que é dispensável na composição do tipo de cobertura utilizado para célula 3. O custo com matéria prima será conseqüentemente muito mais elevado na célula 4.

Outro fator a se considerar é a dificuldade de se obter cinza suficiente para a construção em grande escala da barreira capilar dupla, pois além do custo elevado do transporte da cinza, distante em média 60km dos principais depósitos de rejeito existentes na região carbonífera, há que se ponderar também que atualmente toda a cinza produzida na Tractebel é utilizada na indústria cerâmica e cimenteira.

No que se refere aos aspectos construtivos, na célula 4 deverão ser superpostas três camadas, construídas segundo critérios técnicos, com determinação da umidade ótima para compactação e outros controles de campo necessários para garantir a eficiência da cobertura.

Na construção da cobertura utilizada na célula 3, deve-se empregar somente uma camada de argila devidamente compactada.

No que se refere à manutenção da integridade dessas coberturas, o fato de a cobertura utilizada na célula 3 constituir-se apenas de uma camada, portanto, mais exposta, torna muito mais fácil o monitoramento de qualquer problema relacionado a processos erosivos, a perfurações por vegetais ou mesmo à ação de pequenos animais.

6. CONCLUSÕES

Com relação ao volume percolado nas células

Constatou-se que a cobertura mais eficiente no que se refere ao volume de água percolada para o interior do rejeito foi aquela utilizada na célula 3, pois, considerando-se o volume total de água percolada (78.051,82L), verificou-se que no lisímetro da célula 1 percolaram 52.356,70L (correspondentes a 67,07 %); no lisímetro da célula 2, 18.157,30L (correspondentes a 23,26 %); no lisímetro da célula 3, 183,69L (correspondentes a menos de 1%); e no lisímetro da célula 4, 7.354,13L (correspondentes a 9,42%).

Com relação à qualidade

Os efluentes provenientes das células 3 e 4 apresentaram resultados melhores se comparados aos das células 1 e 2, necessitando somente de polimento posterior para se reduzir a concentração do sulfato e do manganês, adequando-a aos padrões admitidos pela legislação. Comparando-se os resultados obtidos nas células 3 e 4, conclui-se que praticamente não houve ganho adicional na qualidade da água pela aplicação do tipo barreira capilar dupla tal como se implantou na célula 4.

Com relação aos aspectos técnicos das coberturas

Além do menor volume e da boa qualidade da água de percolação, a barreira simples, empregada conforme modelo da célula 3, revelou-se a mais atraente em relação aos aspectos construtivos e econômicos. Na cobertura por barreira capilar dupla, experimentada na célula 4, há necessidade de maior quantidade de materiais e de atividades de preparação. Outros fatores limitantes são distância e carência de cinzas no mercado caso se construa a barreira com cinzas da termoelétrica, como realizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- APHA, 2005 **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21th ed. Washington.
- AACHIB, M., AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P., 1993, **Étude en Laboratoire de La Performance des Barriers de Recouvrement Constituées de Rejets Miniers Pour Limiter Drainage Minier Acide – Un État de la Question**. In: Technical Report EPM/RT- 93/32, École Polytechnique de Montreal, Montreal, Québec, Canada.
- AACHIB, M., MBONIMPA, M, AUBERTIN, M., 2004, **“Measurement and Prediction of the Oxygen Diffusion Coefficient in Unsaturated Media, with Applications to Soil Covers”**, *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 156, pp. 163-193.
- ABNT - **Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987, Resíduos Sólidos – Classificação**. NBR 10.004, Rio de Janeiro.
- ALEXANDRE, N.Z., KREBS, A.S.J., 1995, **“Qualidade das Águas Superficiais do Município de Criciúma, SC”**. In: *Programa de Informações Básicas para Gestão Territorial de Santa Catarina – PROGESC*, v. 1, CPRM, Porto Alegre, RS.
- BACK, A. **Determinação da precipitação efetiva para irrigação suplementar pelo balanço hídrico horário: um caso de estudo em Urussanga, SC**. Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 1997. 132 p. (Tese Doutorado).
- BAKER, R.A., WILSHIRE, A.G., **Microbiological Factor in Acid Mine Drainage Formation: A Pilot Plant Study**. *Current Research*, v.4, n.5, p.401s-407s.
- BARBOSA, J. P., SOARES, P. S. M., BORMA, L.S., et al., 2001, **Projeto Conceitual para Recuperação Ambiente da Bacia Carbonífera Sul Catarinense**, Vol. I, RT/ 33/2000 - Relatório Técnico elaborado p/ SIESCEC.
- BORGHETTI-SOARES, A., UBALDO, M. O., BARBOSA, M. C., et al., 2009, **“Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil. I: Materials Characterization and Numerical Modeling”**, *Mine Water and the Environment*, v.28 (Jun), pp. 219-231.
- BORMA LS, MENDONÇA R, SOUZA VP (2002) **Processo de mitigação da formação de drenagens Ácidas utilizando Coberturas Secas**. Projeto Básico da Unidade Piloto e da Instrumentação - Avaliação Preliminar dos Custos de Instalação e Operação de Piloto, RT 2002-038-00; Relatório Técnico para o SIECESC (Sindicato da Indústria da Extração do Carvão do Estado de Santa Catarina), 126p., CETEM, Rio de Janeiro, Brazil.

Brazil- Canadá **Seminar on Mine Rehabilitation – Technological Innovations**, December, 2003, Eds. Juliano peres Barbosa, Paulo Sérgio Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2003.

CETEM, 2001, **Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, CD-ROM.

CONAMA **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 357 de 17 de março de 2005**, MMA, 2005.

DANIEL, D.E., KOERNER, R.M., 1993, “Cover Systems”. In: Daniel, D.E., *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, chapter 18, London, UK, Chapman & Hall.

EPAGRI. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico do Estado de Santa Catarina**. 1999. CD-ROM.

ESTEBAM, M; DOMIC, M Em: *Hidrometalurgia – Fundamentos, Processos y Aplicaciones*. Cap. 11, Miguel & Mihovilovic. Santiago, 2001.

FARFAN, J.R., FILHO, B.O., SOUZA, V.P., **Avaliação do Potencial de Drenagem Ácida de rejeitos da Indústria Mineral**. Rio de Janeiro: CETEM, 58p., 2004.

FRANKLIN, M. R., **Modelagem Numérica do escoamento Hidrológico e dos Processos Geoquímicos Aplicados à Previsão da Drenagem Ácida em uma Pilha de Estéril da Mina de Urânio de Poços de Caldas – MG**. Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, XXI, 337p 2007

Geoslope International Ltd (1998) SEEP/W for finite elements seepage analysis. User's Guide, version 4.2, Canada

GUEVARA, LRZ (2007). **Predição do Potencial de Drenagem Ácida de Minas Utilizando o Método Cinético da Coluna de Lixiviação**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, PUC/RJ, Rio de Janeiro, RJ.

(KIM *et al.*, 1982). KIM, A.G., HEUSETM B., KLEINMANN, R., DUEL, M., 1982, **Acid Mine Drainage: Control and Abatement Research**. In: Research. U.S. DOI, Bureau of Mines IC 8905, 22p.

KOUTOPOULOS, A. Acid mine drainage control. In: **Effluent Treatment in the Mining Industry**. Castro, S.H.; Vergara, F.; Sánchez, M.A.; (Eds.). University of Concepción, 1998.

KREBS, A.S.J. 2004. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC**. Florianópolis. UFSC. 376p. (Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geografia).

KREBS, A.S.J.; POSSA, M.V.; SCHNEIDER, C.H. DALMINA, L.B.; 2007. **Estudo geológico – hidrogeológico da lavra subterrânea. UM II – Verdinho**. Forquilha SC. Projeto CTENERG. CETEM – MCT. 217p.

MEND. **Evaluation of alternate dry covers for the inhibition of acid mine drainage from tailing**. Mend Report 2.20.1, 1994.

MEND. **Dry Covers. Mend Manual 5.4.2d Prevention and Control**. In: Tremblay GA, Hogan CM (eds), Vol.4, pp. 155-232, 2001.

MEND. **A review of non-traditional dry covers**. Mend Report 2.21.3b, 2002.

MENDONÇA RG (2007) **Estudo da Difusão do Oxigênio em Materiais de Cobertura**. Tese de D.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 354p.

O'KANE, M., AYRES, B., CHRISTENSEN, D. *et al.* (2002), **“Manual on cover system design for reactive mine waste”** CANMET-CETEM OKC Report no 689-01, june.

Quarto relatório de monitoramento dos indicadores ambientais. Vol 1 Ação Civil Pública Nº 93.8000.533-4 Processo de Cumprimento de Sentença Nº 2000.72.04.002543-9 GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO – GTA

REICHARDT, Klaus, 1985, **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**, 4ª ed. Campinas: Fundação Cargill. 466p.

REICHARDT, Klaus, 1990. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole Ltda, 188 p.

RITCEY, C.M. **Tailings Management: problems and solutions in the mining industry**. Amsterdam: ELSEVIER, 1989, Process Metallurgy, v. 6.

SCHNEIDER, C.H., 2006, **Controle da Drenagem Ácida de Minas na Mineração de Carvão de Santa Catarina: Caso da Mina UM II – Verdinho**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, RS, Brasil.

SÉRVULO, E., F., C.; **Ação das Bactérias Oxidantes e Redutoras de Enxofre sobre o Xisto**. 1991, 148p Tese (Doutorado) - Instituto de Microbiologia/UFRJ, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro (Brasil).

SOARES, P.S.M.; TRINDADE, R.B.E 2003, **Sistemas Passivos Abióticos para o Tratamento de Drenagens Ácidas de Mina (DAM)**. Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas. Florianópolis, Brasil.

SOILCOVER, (2000) **Unsaturated Soils Group**, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

SOUZA, C.M.B , 2010, **Modelagem e simulação da drenagem ácida de mina em colunas**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, MG, Brasil

SOUZA, V.P., BORMA, L.S., MENDONÇA, R.M.G., 2003, “**Projeto de Coberturas Secas para Controle da Drenagem Ácida em Depósitos Geradores de Acidez**”. In: *Proceedings Brazil-Canada Seminar on Mine Rehabilitation*, pp. 253-271. Florianópolis.

SOUZA, V.P, 1996,“**Drenagens Ácidas do Estéril Piritoso da Mina de Urânio de Poços de Caldas: Interpretação e implicações ambientais**” Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

SOUZA; V. P; POSSA, M. V.; SOARES, P. S.M. , SOARES. A. B.SOUZA; M. R.R. 2011 “**Interpretação dos parâmetros físico-químicos de efluentes gerados em sistema do tipo rejeito cobertura**”. Proc, III CBC , Gramado, RS, Brasil, 2011

SOUZA V.P., POSSA, M.V., SOARES, P.S.M., SOARES, B. A., BERTOLINO, A.V.F.A., SOUZA, M.R.R. “**Desempenho de cobertura seca em escala piloto para abatimento de DAM gerada por rejeito de carvão**. Proc, 23rd ENTMME, Gramado, RS, Brasil, vol. 2, pp. 515-523, 2009.

TRIANE, B.P., 2010, **Avaliação Geotécnica do Desempenho de Cobertura Seca em Barreira Capilar Dupla em Rejeito de Mineração**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

UBALDO, M.O., 2005, **Uso de Cinza de Carvão na Composição de uma Cobertura de Rejeitos de Mineração**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VANAPALLI SK, FREDLUND DG, PUFAHL DE, CLIFTON AW (1996) **Model for prediction of shear strength with respect to soil suction**. Canadian Geotech. J, 33, pp. 379-392.

RITCEY, C.M. **Tailings Management: problems and solutions in the mining industry**. Amsterdam: ELSEVIER, 1989, Process Metallurgy, v. 6.