



**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE**  
**Departamento de Engenharia Ambiental**

**MARCOS FAISTAUER MENDES**

**MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS NA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE  
COBERTURAS SECAS SOBRE DEPÓSITOS DE REJEITOS DE CARVÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. M.Sc. Eder Luiz Santo  
Co-orientador: Profa. Dra. Rosana Peporine Lopes

**CRICIÚMA, 2003**



**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE**  
**Departamento de Engenharia Ambiental**

**MARCOS FAISTAUER MENDES**

**MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS NA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE  
COBERTURAS SECAS SOBRE DEPÓSITOS DE REJEITOS DE CARVÃO**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado à obtenção do grau de Engenheiro Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense.

Criciúma – SC, Novembro de 2003.

---

M. Sc. Eder Luiz Santo  
Universidade do Extremo Sul Catarinense

---

Dr. Carlyle Torres Bezerra de Menezes  
Universidade do Extremo Sul Catarinense

---

Dra. Rosana Peporine Lopes  
Universidade do Extremo Sul Catarinense

## **DEDICATÓRIAS**

*Aos meus pais, Aura e Maurino, por me proporcionarem o dom da sabedoria, da consciência ética sobre os fatos relacionados à humanidade e ao meio ambiente e por me apoiarem na minha trajetória acadêmica.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço meus colegas de graduação pelo apoio e compreensão, aos meus professores por me conduzirem neste caminho, a Diretoria de Pesquisa da UNESC, ao Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas – IPAT, em especial, Marcos Back e Salésio Nolla, aos colaboradores do PIC, Daiane Zanette, Eduardo Canarin e Eduardo Krebs ao professor Álvaro Back e aos meus orientadores Eder Luiz Santo e Rosana Peporine Lopes por confiarem em meu potencial dando possibilidades de participação em trabalhos e pesquisas auxiliando no meu aprendizado prático sobre as questões ambientais.*

## EPÍGRAFE

*“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar. É melhor tentar, ainda em vão, que sentar-se fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver...”*

*(Martin Luther King)*

## RESUMO

Este trabalho teve por finalidade o desenvolvimento de uma metodologia para identificação e caracterização dos tipos de cobertura de solo que melhor se adaptam para o recobrimento dos depósitos de carvão mineral com vistas a minimizar a geração de drenagem ácida, principal problema ambiental proveniente da extração e beneficiamento do carvão mineral. Para tanto foram realizados testes em campo e em laboratório. Os materiais utilizados como cobertura (substratos siltosos) foram coletados em um local de deposição de rejeitos com mais de dez anos, localizado em área pertencente ao Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas (IPAT), no bairro Sangão, próximo ao rio Sangão. No tocante ao rejeito optou-se por coletar um material pouco alterado e potencialmente mais agressivo ao meio (rico em pirita) – rejeito da Metropolitana. Em campo foram efetuados testes de infiltração e permeabilidade do solo de cobertura dos depósitos, para verificar as condições reais e posteriormente simular estas condições em laboratório, por meio de lisímetros. As condições de intemperismo que atuam naturalmente sobre os rejeitos de beneficiamento de carvão, foram simuladas no laboratório em três cubas de vidro – lisímetros - extrapolando os dados climáticos, para que fosse possível simular em um curto prazo longos períodos de intemperismo natural. Os dados de clima foram obtidos na estação climatológica de Urussanga, dos quais foram selecionados dados médios mensais de precipitação, velocidade dos ventos e radiação em um período de vinte e dois anos (1981/2002). A água utilizada para simular a precipitação foi deionizada e armazenada em uma bombona plástica graduada de onde saiu uma mangueira plástica de 1,5 metros, tendo na sua outra extremidade um chuveiro acoplado para a saída de água. Os ventos foram simulados com o uso de um ventilador lateral no interior do laboratório. A radiação solar foi reproduzida com o uso de um par de lâmpadas UV (Ultra Violeta) e IV (Infra Vermelho). A fim de se interpretar melhor como se processa a geração da drenagem ácida, no primeiro lisímetro o rejeito de carvão não foi recoberto. Nos dois outros lisímetros foram utilizadas as mesmas coberturas - substrato silte-argiloso, sendo que em um deles foi adicionado calcário em pó ( $\text{CaCO}_3$ ) misturado com os rejeitos. A partir da interpretação das características físico-químicas dos lixiviados, pretende-se verificar a eficiência destas coberturas. Com isto será possível verificar qual o melhor tipo de cobertura de depósitos de rejeitos de carvão para posteriormente ser aplicada em projetos de reabilitação ambiental.

**Palavras-chave:** drenagem ácida, rejeitos de carvão, lisímetros.

## **ABSTRACT**

A methodology is proposed in this study to identify the best cover system can be use to control acid mine drainage produced from coal mine waste. The tests were done in field and laboratory. The material used to recover - a kind of siltite - was collected near the laboratory in an area that had been used to deposit coal waste for more than ten years. The coal waste selected for this experiment is from an actual mine - a refresh material rich in pyrite. Tests to estimate such parameters as permeability and hydraulic conductivity were done at field. The efficiency of recover was tested in laboratory using lysimeters. The simulation of climatic conditions like precipitation, temperature and solar radiation, based on meteorology data collected from Urussanga Climatologic Station in a period between 1981 and 2002, and the weathering reactions inside lysimeters have been done by use deionized water to simulate rain, fan to simulate wind and lamps (ultraviolet and infra-red) to simulate sun. Three experimental lysimeter has been tested: (i) the first has a layer of coal waste without recover that represent the best condition to generate acid mine drainage; (ii) the second was filled with coal waste recovered with soil; and (iii) the third was filled with coal waste recovered with a fine layer of limestone and soil bed like the second. Analyzing the physical and chemical compounds presents in the weathering products we expected to determine the more efficient cover to apply in coal waste deposits and restoration projects.

**Keywords:** acid mine drainage, coal waste, lysimeters.

## SUMÁRIO

LISTA FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS .....	12
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS DO PROJETO DE PESQUISA .....	16
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
3 JUSTIFICATIVAS.....	18
4 REVISÃO DA LITERATURA .....	20
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
5.1 ESTUDOS EM CAMPO .....	35
5.1.1 TESTE DE INFILTRAÇÃO .....	37
5.1.2 TESTE DE PERMEABILIDADE.....	38
5.2 ESTUDOS EM LABORATÓRIO .....	40
5.2.1 TESTES CINÉTICOS EM LISÍMETROS .....	40
5.2.1.1 Deposição De Material Filtrante Na Base Do Lisímetro.....	41
5.2.1.2 Introdução Do Material A Ser Estudado Nos Lisímetros.....	42
5.2.1.3 Ciclo De Simulação .....	45
5.2.1.4 Simulação Do Efeito Do Sol E Vento .....	46
5.2.1.5 Simulação Da Precipitação.....	47
5.2.1.6 Programa De Amostragem .....	49

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
6.1	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NOS ENSAIOS.....	50
6.1.1	SUBSTRATO.....	50
6.1.2	REJEITO PIRITOSO .....	52
6.1.3	BRITA DE QUARTZO E AREIA LAVADA .....	53
6.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO.....	55
6.2.1	TESTES PELO MÉTODO DOS ANÉIS CONCÊNTRICOS .....	55
6.2.2	TESTES PELO MÉTODO DO TRADO INVERTIDO.....	56
6.3	QUANTIFICAÇÃO DOS VOLUMES DE ÁGUA SIMULADOS.....	57
6.4	SIMULAÇÃO DO INTEMPERISMO NOS LISÍMETROS .....	61
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69

## LISTA FIGURAS

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DOS TESTES DE CAMPO. ....	36
FIGURA 2 – ESTRATIGRAFIA DA CAMADA DE SOLO DO DEPÓSITO DE REJEITOS ESTUDADO. ....	36
FIGURA 3 - ENSAIO DE INFILTRAÇÃO PELO MÉTODO DOS ANÉIS CONCÊNTRICOS. ....	37
FIGURA 4 - ENSAIO DE PERMEABILIDADE PELO MÉTODO DO TRADO INVERTIDO. ....	39
FIGURA 5 - PERFURAÇÃO DO FURO PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	39
FIGURA 6 - ESQUEMA DE UM DOS LISÍMETROS UTILIZADOS NOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO.....	41
FIGURA 7 - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FILTRANTE UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS. ....	42
FIGURA 8 - LISÍMETRO 1: TESTES FEITOS APENAS COM O REJEITO COMPACTADO.....	43
FIGURA 9 - LISÍMETRO 2: TESTES FEITOS COM UMA CAMADA DE SOLO SOBRE OS REJEITOS. ....	44
FIGURA 10 - LISÍMETRO 3: TESTES FEITOS COM UMA CAMADA DE SOLO SOBRE OS REJEITOS E COLOCAÇÃO DE CALCÁRIO HIDRATADO ENTRE ELES, AUXILIANDO O AUMENTO DO PH DA ÁGUA. ....	45
FIGURA 11 - SIMULAÇÕES DOS EFEITOS DE RADIAÇÃO E FORNECIMENTO DE CALOR. ....	46
FIGURA 12 - BOMBONA GRADUADA DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DEIONIZADA COM SAÍDA POR UMA MANGUEIRA E UM CHUVEIRO DE JARDIM. ....	48
FIGURA 13 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO FUNCIONAMENTO DO LABORATÓRIO. ....	48
FIGURA 14 -VERIFICAÇÃO DAS CAMADAS DE SOLO SOBRE OS REJEITOS. ....	51

FIGURA 15 - SOLO ÚMIDO COLETADO E EXPOSTO NA SOBRA PARA SECAR.....	52
FIGURA 16 - SOLO APÓS SECAR 10 DIAS NA SOBRA PRONTO PARA A DEPOSIÇÃO NO LISÍMETRO. .....	52
FIGURA 17 - REJEITO PIRITOSO TESTADO NOS LISÍMETROS.....	53
FIGURA 18 - PENEIRAS UTILIZADAS NOS TESTES DE SEPARAÇÃO DOS MATERIAIS FILTRANTES..	54
FIGURA 19 - SIMULAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO.....	61
FIGURA 20 - REAÇÕES OCORRIDAS NO ENSAIO REALIZADO NO LISÍMETRO 1. ....	62
FIGURA 21 - VISTA SUPERIOR DA CAMADA SUPERFICIAL DE SOLO DO LISÍMETRO 2, DEMONSTRANDO FISSURAS. ....	63

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CARACTERÍSTICAS DAS BACTÉRIAS EM AÇÃO NA DRENAGEM ÁCIDA. ....	24
TABELA 2: SULFETOS MAIS COMUNS E PRODUTOS DE OXIDAÇÃO. ....	25
TABELA 3: FATORES QUE INFLUENCIAM NA DRENAGEM ÁCIDA. ....	27
TABELA 4: CLASSIFICAÇÃO DAS COBERTURAS SECAS E SUAS FUNÇÕES NA INIBIÇÃO DA DAM. ....	31
TABELA 5: PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAR O EFLUENTE COLETADO. ....	49
TABELA 6: CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA DE SOLO. ....	51
TABELA 7: VOLUMES EM MILÍMETROS DE INFILTRAÇÃO, PARA OS ÚLTIMOS 22 ANOS EM UM TIPO DE SOLO COM VALOR DE CN 95, OBTIDOS DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DE URUSSANGA/SC. ....	59

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil, desde a sua colonização até hoje, sofre conseqüências de atividades extrativas desordenadas e também com pouco controle tecnológico. Muitas vezes a tecnologia utilizada por empresas mineradoras é inadequada e ultrapassada em relação às nossas características naturais, necessitando de investimentos em tecnologia e pesquisa de acordo com suas dificuldades e necessidades de controle ambiental.

Na busca do aprimoramento das técnicas de extração e beneficiamento, a mineração tornou-se alvo de controle dos aspectos ambientais decorrentes de suas atividades. A partir disto, o poder público tem tentado frear os impactos ambientais por meio da aplicação de uma política ambiental rigorosa.

Segundo Kopezinski (2000), a mineração promove alterações e degradações no meio físico, atingindo os recursos hídricos, a atmosfera, o solo e a biota.

Em Santa Catarina a atividade mineira destaca-se pela produção de carvão mineral desde a década de 40, embora de fundamental importância para o crescimento econômico da região sul catarinense, as consequências da extração irregular, sem preocupação com o meio ambiente, vem degradando o solo, a flora, contribuindo para o desaparecimento da a fauna e principalmente contaminando os recursos hídricos, devido à inadequada deposição dos rejeitos e estéreis do beneficiamento de carvão, ricos em pirita ( $\text{FeS}_2$ ) que aparecem sob a forma de cristais nos rejeitos e de nódulos nos estéreis, principalmente nos arenitos piritosos. Estes minerais são as principais fontes de contaminação potencialmente geradoras de drenagens ácidas, sulfatos e metais pesados, devido à ação do intemperismo nestes materiais, provocando o aparecimento de águas e solos ácidos. (IPAT/UNESC, 2003).

A estocagem dos rejeitos das minerações de carvão gera grandes problemas ambientais para a região carbonífera Catarinense. Kopezinski (2000), salienta a mobilidade de certos elementos químicos, como Cu, Pb, Ni, Fe, Mn entre outros e também a geração de drenagens ácidas nos arredores dos depósitos de rejeitos.

Em virtude dos impactos ambientais provenientes da mineração de carvão, especialmente dos depósitos de rejeitos, vem sendo desenvolvido por pesquisadores do IPAT/UNESC, no âmbito do programa de Iniciação Científica (PIC), um projeto de pesquisa sobre os tipos de coberturas adequadas para depósitos de rejeitos do minério. O trabalho ora apresentado tem por finalidade apresentar a metodologia desenvolvida para a caracterização de diferentes tipos de cobertura, bem como os procedimentos de ensaios em laboratório, através de lisímetros, simulando as condições climatológicas naturais, visando verificar quais as coberturas mais eficientes, tendo em vista a preocupação com a minimização da geração de

drenagem ácida. Por meio da simulação de chuva, sol e vento sobre os depósitos de rejeitos experimentais e análises químicas do material lixiviado que percolou pelo solo e rejeitos, verificar-se-á as melhores condições para aplicar esta técnica em projetos de reabilitação ambiental na região Carbonífera Catarinense.

## **2 OBJETIVOS DO PROJETO DE PESQUISA**

A drenagem ácida proveniente da disposição inadequada dos rejeitos do beneficiamento de carvão mineral representa um sério problema ambiental para a região Carbonífera Catarinense, contribuindo para a contaminação dos solos, das águas superficiais de rios e lagoas e dos lençóis freáticos, não somente das áreas onde são depositados os materiais reativos, mas também em áreas a jusante, abrangendo por vezes toda a bacia hidrográfica na qual o material é depositado.

Este projeto tem por objetivo a descrição da metodologia empregada nos estudos realizados em laboratório, para caracterização e proposição de tipos de cobertura eficazes para o recobrimento de depósitos de rejeitos de carvão e estéreis piritosos, seja de minas a céu aberto ou subterrâneas, visando minimizar a geração da drenagem ácida de mina.

## 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver metodologia para ensaios de lixiviação de longa duração, com o auxílio de lisímetros, simulando as condições climáticas que contribuem para a oxidação de sulfetos nos depósitos de rejeitos de carvão da região Carbonífera Catarinense;
- Testar diferentes tipos de cobertura para depósitos de rejeitos de carvão utilizando substrato silte-argiloso proveniente da Formação Rio Bonito e calcário em pó misturados aos rejeitos;
- Observação e descrição dos processos de infiltração da água e das alterações físicas dos rejeitos;

### 3 JUSTIFICATIVAS

A mineração de carvão é responsável em grande parte pelos problemas de geração de drenagem ácida em vários locais do mundo onde existe a extração deste bem mineral, em países como a Austrália, o Brasil, o Canadá, e os Estados Unidos.

A drenagem ácida é proveniente da oxidação de sulfetos como a pirita e a marcassita ( $\text{FeS}_2$ ), ambos com a mesma composição química e que se diferem apenas na formação cristalina, onde a pirita apresenta a formação cúbica e a marcassita à formação ortorrômbica. Sendo assim, estes minerais são responsáveis pela geração de acidez e solubilização dos metais pesados. Em consequência disto, a região carbonífera catarinense vem sendo afetada com o lançamento de efluentes ácidos em quase dois terços dos cursos d'água da região, sendo que o baixo valor do pH, a elevada acidez e o transporte de metais dissolvidos, são as principais fontes de poluição alterando as características físico-químicas dos corpos d'água superficiais e também dos lençóis subterrâneos. (Alexandre & Krebs, 1995).

Existem diversas possibilidades de ocorrência de drenagens ácidas. Em uma mineração de carvão, a geração de drenagens ácidas pode ocorrer a partir dos efluentes líquidos, das águas de mina, dos depósitos e bacias de rejeitos e finos e de pilhas de estéreis. (Menezes & Santo, 2001). Nesse sentido a importância do projeto desenvolvido está na descrição dos estudos simulados para identificar formas adequadas de deposição dos rejeitos, tanto em minas ativas como em projetos de reabilitação ambiental de antigas áreas de extração do minério, onde há a necessidade da retirada dos materiais potencialmente poluidores espalhados por toda a área, evitando assim que os mesmos continuem contaminando as águas, os solos e afetando muitas espécies da fauna e flora existentes anteriormente nestes locais.

Neste enfoque, este trabalho visa a observação e aprimoramento da metodologia empregada em projetos de reabilitação e de deposição de rejeitos a partir de pesquisas efetuadas em laboratório, com a deposição de rejeitos sob coberturas secas de forma a testar a eficácia desse procedimento para minimizar a geração de impactos ambientais locais e regionais, referentes à degradação da qualidade das águas e do solo.

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

As indústrias do setor minero-metalúrgico são das mais impactantes sobre o meio ambiente e causadoras de degradação dos recursos naturais como o solo, a fauna, a flora e principalmente as águas. Um dos grandes desafios das empresas que atuam no ramo de extração mineral em diversos países está em aprimorar e desenvolver novas técnicas para o manuseio e a disposição de estéreis e rejeitos.

Em atividades que envolvem extração e beneficiamento de minérios sulfetados ou que tenham sulfetos associados, é constante a busca por soluções tanto para a prevenção, quanto para o controle de drenagens ácidas, adotando medidas como: (i) restrição da passagem de oxigênio e de água pela camada de cobertura de solo, quando se utiliza a deposição de rejeitos em ambiente sub-aéreo; (ii) utilização de bacias de rejeitos, onde estes ficam cobertos por uma lâmina d'água; (iii) inundamento de cavas a céu aberto ou de galerias de minas subterrâneas; (iv) tratamento de efluentes; (v) utilização de produtos químicos, bacteriológicos e controladores de pH, entre outros. (Menezes, 2000).

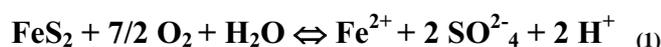
Conforme Souza (2001), os rejeitos são constituídos de silicatos, óxidos e minerais sulfetados, que durante a extração e beneficiamento do minério de carvão são descartados e normalmente são descarregados em bacias na forma de polpa, predominantemente com partículas de granulometria variando em torno de  $1\mu\text{m}$  a  $1\text{mm}$  (argila, silte e areia fina). O material estéril é predominantemente a rocha de cobertura que foi retirada para o acesso ao corpo mineral de interesse da lavra, composto de partículas que variam de silte ( $0,06 - 0,004\text{ mm}$ ), até blocos ( $>256\text{ mm}$ ), encontrando-se dispostos geralmente em grandes pilhas.

A oxidação de minerais sulfetados como a pirita e a marcassita ( $\text{FeS}_2$ ), acabam por gerar drenagens com baixos valores de pH, altas concentrações de acidez, sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ),  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e outros metais solubilizados. Os sulfetos de ferro são freqüentemente encontrados nas minerações de carvão, sendo os principais produtores de drenagens ácidas.

Em sua grande maioria, a pirita presente nas rochas encaixantes e estéreis, ocorrem como grãos cristalinos muito pequenos, misturados com os constituintes orgânicos do carvão e também podendo estar difundida nas camadas de folhelhos e arenitos. (Souza, 2001). Em áreas mineradas a céu aberto na região carbonífera catarinense, o IPAT/UNESC (2003), descreveu a presença de pirita e de marcassita tanto em estéreis como folhelhos, siltitos e arenitos quartzosos, como nos rejeitos do beneficiamento do carvão mineral. Segundo os autores, a marcassita ocorre principalmente sob a forma de nódulos ou agregados cristalinos de granulção fina associados a cristais de sílica. Já a pirita ocorre também com hábito maciço quando preenchendo fraturas.

Segundo a estequiometria proposta por Singer e Stumm (1970), as principais reações geoquímicas atuantes em ambientes potencialmente geradores de drenagem ácida são as descritas abaixo.

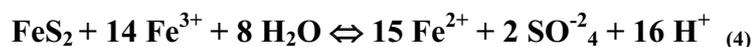
A reação inicial é a oxidação do sulfeto de ferro pelo O<sub>2</sub> atmosférico, liberando sulfato, Fe<sup>2+</sup> e íons de H<sup>+</sup> em solução, conforme descrito na reação (1).



Na seqüência, o Fe ferroso (Fe<sup>2+</sup>) também se oxida produzindo Fe férrico (Fe<sup>3+</sup>) de acordo com a reação (2). Por sua vez, este íon sofre hidrólise produzindo hidróxido férrico e conseqüentemente liberando mais acidez, conforme reação (3).



No entanto, quando o pH do meio fica abaixo de 3,5, o Fe férrico (Fe<sup>3+</sup>) passa a ser o principal componente responsável pela oxidação da pirita, sendo reduzido novamente a Fe ferroso (Fe<sup>2+</sup>), como descrito na reação (4). A partir daí o O<sub>2</sub> passa a ter um papel indireto na oxidação descrita na reação (1), tornando o processo um ciclo contínuo com capacidade de gerar grande quantidade de acidez.



Ao verificar a descrição e a caracterização de microorganismos oxidantes de ferro e enxofre, é descrito que um certo número de bactérias vivem autotroficamente a partir da energia retirada da oxidação do ferro inorgânico e de alguns compostos de enxofre. Conseqüentemente a isto, um subgrupo de bactérias aeróbico tem sido descrito como importantes organismos na formação de acidez nas drenagens de minas. Estas bactérias são representadas principalmente pelas espécies, *Thiobacillus thiooxidans* e *Thiobacillus ferrooxidans*. (Santa Catarina, 1982).

A ação das bactérias ferro-oxidantes na alteração dos sulfetos de ferro, de acordo com Sengupta (1993), ocorre em meios com valores de pH abaixo de 3,5. Nessas condições a oxidação do  $\text{Fe}^{+2}$  pelo  $\text{O}_2$  é acelerada em mais de 300 vezes, de acordo com experimentos realizados pelo autor. Portanto, o processo de geração de acidez é bastante intenso em ambientes já acidificados ( $\text{pH} < 3,5$ ), uma vez que as reações de oxidação tanto do  $\text{Fe}^{+2}$  como da pirita são aceleradas pela ação combinada do  $\text{O}_2$  (reação 2), na presença de bactérias *Thiobacillus ferrooxidans*, e do  $\text{Fe}^{+3}$  (reação 4).

Na tabela 1 são descritas algumas características das bactérias *Thiobacillus ferrooxidans* e *Thiobacillus thiooxidans*, agindo nas drenagens ácidas de mina, segundo informações constantes em Santa Catarina (1982).

**Tabela 1: Características das bactérias em ação na drenagem ácida.**

Bactéria	Características
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	<p>São encontradas geralmente em drenagem ácida;</p> <p>São os principais organismos participantes da oxidação de sulfetos de metais pesados;</p> <p>Além da oxidação de sais ferrosos, também retiram sua energia de compostos de enxofre reduzido;</p> <p>Possuem resistência a altas concentrações de metais pesados</p>
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	<p>Utiliza energia decorrente da oxidação de compostos de enxofre reduzido, onde o CO<sub>2</sub> e derivados funcionam como única fonte de carbono;</p> <p>Não utilizam materiais orgânicos, mas seu crescimento é suprimido pela presença deles;</p> <p>Ao contrário das outras espécies de <i>Thiobacilli</i>, preferem ambientes com pH abaixo de 5;</p> <p>Possui tolerância ao ácido e tem grande habilidade de oxidar rapidamente o enxofre elementar</p>

Além do elemento ferro, outros metais também podem combinar-se com o enxofre para gerar sulfetos (Tabela 2), possibilitando a geração de drenagens ácidas em minerações de cobre, chumbo, zinco e níquel. (Souza, 2001).

A exemplo da oxidação da pirita, a reação (5) demonstra como ocorre a formação de ácido sulfúrico a partir da alteração da calcopirita na presença de oxigênio e água, o que produz efeitos maléficos tanto para a vida aquática como para o abastecimento público. (Machado et al., 1984).



**Tabela 2: Sulfetos mais comuns e produtos de oxidação.**

<b>Minerais</b>	<b>Composição</b>	<b>Produtos Aquosos Finais da Oxidação Completa</b>	<b>Minerais Secundários Formados a pH neutro</b>
<b>Pirita</b>	$FeS_2$	$Fe^{3+}, SO_4^{2-}, HO^-$	Hidróxido férrico e sulfatos; gesso
<b>Marcassita</b>	$FeS_2$	$Fe^{3+}, SO_4^{2-}, HO^-$	Hidróxido férrico e sulfatos; gesso
<b>Pirrotita</b>	$Fe_{1-x}S^4$	$Fe^{3+}, SO_4^{2-}, HO^-$	Hidróxido férrico e sulfatos; gesso
<b>Amorfo</b>	$FeS_2$	$Fe^{3+}, SO_4^{2-}, HO^-$	Hidróxido férrico e sulfatos; gesso
<b>Calcopirita</b>	$CuFeS_2$	$Cu^{2+}Fe^{3+}, SO_4^{2-}, H$	Hidróxido férrico e sulfatos; Hidróxidos e carbonatos de cobre; gesso
<b>Arsenopirita</b>	$FeAsS$	$Fe^{3+}, AsO_4^{3-}, SO_4^{2-}, H^+$	Hidróxidos e sulfato férrico; Arsenatos de ferro e cálcio; gesso
<b>Galena</b>	$PbS$	$Pb^{2+}, SO_4^{2-}, H^+$	Hidróxido, sulfato e carbonato de chumbo; gesso
<b>Esfalerita</b>	$ZnS$	$Zn^{2+}, SO_4^{2-}, H^+$	Carbonato e hidróxido de zinco; gesso

Fonte: British Columbia AMD Task Force (1989) *apud* HUTCHISON E ELLISON (1990). p.141

Sendo o enxofre o principal vilão no processo de formação da drenagem ácida, é fundamental para o estudo do fenômeno, que se determine quais são os tipos de enxofre que estão associados ao carvão e quais deles são responsáveis por desencadear tal processo.

Segundo Souza (2001), o enxofre que se encontra no carvão mineral e nas rochas encaixantes pode ocorrer na forma de enxofre orgânico, enxofre sulfático e enxofre pirítico.

Machado et al. (1984), descrevem que o enxofre sulfático, quando presente, geralmente é representado pelo sulfato de cálcio ou pelo sulfato ferroso. Já o enxofre orgânico ainda é pouco conhecido. No entanto, sabe-se que corresponde a uma parte significativa da

constituição fundamental do carvão, tendo uma distribuição uniforme. Para remover o enxofre orgânico é necessário aplicar um beneficiamento químico, ainda hoje pouco usado.

Os sulfatos que provêm das drenagens ácidas são formados pela oxidação do enxofre contido na pirita. Conforme a resolução 20 do CONAMA, as concentrações máximas de sulfatos para águas de classe II (abastecimento público) não devem ultrapassar 250 mg/L. Em rios da região carbonífera catarinense, afetados pela mineração de carvão, tais como rio Sangão e rio Maina em Criciúma, rio Fiorita, em Siderópolis, rio Carvão em Urussanga e rio Rocinha em Lauro Muller, já foram encontrados valores de concentrações acima de 2000mg/L. (Menezes e Santo, 2001).

É notório, portanto, que estando estéreis reativos e rejeitos depositados sem nenhuma medida de controle, verifica-se que muitos processos físicos e químicos podem desencadear uma série de problemas relacionados com a contaminação dos solos e principalmente das águas, sendo a drenagem ácida originária da lixiviação destes materiais a grande causadora de impactos ambientais a serem levados em consideração.

Quando levantados e compreendidos os fatores que identificam a geoquímica da drenagem ácida podemos relacionar as questões que influenciam na sua geração, a partir de um determinado substrato, cujos fatores descritos na tabela 3 podem estar diretamente relacionados com a drenagem ácida. (Mello e Abrahão, 1998).

**Tabela 3: Fatores que influenciam na drenagem ácida.**

<b>Fator</b>	<b>Descrição</b>
<b>Mineralogia do Substrato</b>	Quantidade e reatividade dos sulfetos, presença de outros minerais, quantidade e tipo de argila presente
<b>Condições Ambientais</b>	Temperatura média, umidade relativa, regime de chuvas de certa região
<b>Condições de Lavra</b>	Método de lavra, acondicionamento e granulometria do substrato

Menezes (2000), recomenda que antes da desativação de empresas com atividades minero-metalúrgicas, deve-se ter um plano de recuperação de suas áreas. Das principais medidas utilizadas atualmente para mitigação destes problemas, destacam-se as seguintes:

- Técnicas modernas de manuseio e disposição de estéreis e rejeitos;
- Prevenção e controle da drenagem através da restrição de oxigênio e água realizando a cobertura da pilha com camadas de argila e o plantio de gramíneas.
- Restrição de oxigênio com a deposição de rejeitos sob lamina d'água;
- Inundação de cava da mina ou das galerias subterrâneas;
- Tratamento químico dos efluentes, como neutralização da acidez com soda, barrilha ou cal; uso de inibidores químicos e bacteriológicos; redução do ferro férrico e ferroso.

Das diversas metodologias de gerenciamento de estéreis e rejeitos com potencial de geração de contaminantes, a estratégia de disposição e controle destes materiais na forma de encapsulamento e aterramento é que está sendo avaliada neste projeto, tomando como base estudos realizados em campo e laboratório onde se pretende elaborar uma metodologia de análise e monitoramento dos tipos de cobertura seca para os depósitos de rejeitos.

Este tipo de deposição de rejeitos, segundo (Borba e Souza, 2002), vem sendo empregado em muitos lugares do mundo como uma opção para o gerenciamento do material potencialmente gerador de drenagens ácidas. Entretanto, para obtenção de resultados positivos utilizando tal técnica é necessário que se busque alcançar alguns objetivos, como:

- Minimização das taxas de oxidação dos sulfetos e geração de acidez por meio da criação de barreiras para a passagem de oxigênio e água, inibindo também a ação das bactérias catalisadoras *Thiobacillus thiooxidans* e *Thiobacillus ferrooxidans*;
- Minimização da percolação da água através do material de cobertura, inibindo a migração de produtos de oxidação pelos poros do substrato;
- Equilíbrio entre a acidez e alcalinidade, de forma a propiciar que os materiais de oxidação sejam precipitados e imobilizados dentro do próprio depósito.

Segundo os autores supra-citados, a redução da taxa de penetração de oxigênio é a medida mais efetiva para minimizar a oxidação dos materiais reativos estudados. A utilização de uma cobertura seca que apresente uma baixa taxa de difusão do oxigênio e conseqüente-

mente uma reduzida permeabilidade, certamente irá diminuir a velocidade das reações de oxidação de sulfetos e os produtos de sua lixiviação.

Para se alcançar os objetivos desejados, pode-se adotar coberturas secas simples ou complexas, as quais variam tanto em profundidade como em variedade de materiais. Podem ser constituídas de uma simples camada de solo ou serem compostas pela associação de diversas camadas de solo nativo, material beneficiado estéril ou rejeito não reativo, materiais geosintéticos e orgânicos consumidores de oxigênio. (Borba e Souza, 2002).

Algumas considerações devem ser tomadas para maximizar a efetividade deste tipo de deposição de rejeitos e estéreis. Tais medidas são descritas por Borba e Souza (2002), conforme exposto abaixo.

- A profundidade para disposição do material reativo em cavas ou bacias deve ser maximizada, de forma a reduzir a área superficial de cobertura, devido aos altos custos dos materiais de recobrimento;
- Colocação do material mais reativo, com maiores teores de enxofre, em locais mais baixos de forma que possam ser facilmente enterrados e compactados, evitando a passagem de oxigênio e água;
- Procurar não espalhar o material, deixando-o em uma área menor possível e com uma maior compactação.

Para coberturas secas, segundo Skermer e Rohrs (1992) *apud* Borba e Souza (2002), podemos classificar as barreiras naturais e artificiais em duas classes:

- Barreiras geológicas naturais  $\Rightarrow$  o solo e a rocha hospedeira apresentam características de impermeabilidade para atuarem com eficiência no isolamento dos materiais reativos;
- Barreiras artificiais  $\Rightarrow$  são empregados materiais processados ou manufaturados construídos em campo, para alcançar a constituição de um produto uniforme.

Um sistema de cobertura seca visando controlar o fluxo de oxigênio deve ser projetado de tal forma que a camada selante mantenha elevado grau de saturação, em função do oxigênio se difundir com uma velocidade menor na água, do que nos espaços ocupados pelo ar. O'Kane (2002), descreve que o grau de saturação (S) de um solo ou sistema de cobertura seca é definido pela fórmula abaixo, sendo que quanto maior o valor de S, maior a condutividade hidráulica e menores o poder de sucção e a difusão de oxigênio.

$$S = V_a/V_v \times 100$$

Onde:  $V_a$  = volume de poros preenchidos por água; e  $V_v$  = volume de poros vazios;

As coberturas secas construídas com objetivo de controlar a geração de drenagem ácida podem ser classificadas segundo a tabela 4.

A presença de água nos poros da camada de solo cria uma barreira física de fluxo de oxigênio. Como esta camada fica exposta as ações do tempo, umedecimento e ressecamento, aos agentes do intemperismo e erosões, o mais apropriado é construir um sistema de cobertura composta de varias camadas, que juntas, tenham a finalidade de manter inalterado o grau de saturação da camada argilosa e exercer proteção dessa camada quanto ao seu desgaste. A condutividade hidráulica desejada para estas camadas argilosas devem ser igual ou inferior a  $1 \times 10^{-7}$  m/s, para terem real eficiência na aplicação. (Borba e Souza, 2002).

**Tabela 4: Classificação das coberturas secas e suas funções na inibição da DAM**

<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
<b>Barreiras de Transporte de Oxigênio</b>	Atuam de forma a reter a umidade e fornecer uma barreira de baixo coeficiente de difusão do oxigênio gasoso
<b>Barreiras Hidráulicas</b>	Atuam de forma a impedir, por meio de adoção de uma camada de material impermeável, o fluxo de água para dentro do material reativo
<b>Barreiras Capilares</b>	Atuam de forma a minimizar o fluxo de umidade da camada argilosa por meio da maximização do armazenamento próximo à superfície e posterior liberação pela evapotranspiração
<b>Barreiras de Consumo de Oxigênio</b>	Atuam como uma fonte de consumo de oxigênio de forma a fornecer baixa concentração de oxigênio na interface cobertura/resíduo
<b>Barreiras de Inibição da Reação</b>	Atuam de forma a inibir possíveis reações, neutralizando o pH

Fonte: BORBA E SOUZA, 2002, p. 32

A real avaliação da eficiência da cobertura deve ser feita através de ensaios em laboratório e de experimentos em escala piloto em campo.

Em unidades pilotos de sistema de cobertura sugeridas por O’Kane (2002), três, configurações de cobertura devem ser testadas em campo e monitoradas por um período de 2 a 5 anos, de forma a caracterizar o comportamento durante os períodos de seca e chuva. Estes sistemas de cobertura podem ser constituídos por uma camada de argila de 30 cm e posteriormente cobertos por hidrossemeadura, para efeito de execução de unidades piloto sugerindo a avaliação de três hipóteses.

- a) Sistema de cobertura que exibiu melhor desempenho segundo modelagem, considerando as condições climáticas da região;
- b) Sistema de cobertura utilizando uma camada de 30 cm de argila com implantação de vegetação por hidrossemeadura;
- c) Depósito de resíduos sem nenhum tipo de cobertura.

Estas unidades piloto, chamadas de lisímetros de campo, têm a finalidade de monitorar o transporte e qualidade das águas que percolam pelos resíduos, onde se verificará a taxa de infiltração de água da chuva incidente sobre aquela superfície, através do sistema de cobertura. A composição química da água coletada na base do lisímetro estará relacionada com a taxa de geração de poluentes dentro do resíduo. (Borba et. al, 2002).

Em laboratórios são executados testes para a verificação do potencial de oxidação de materiais sulfetados, podendo ser divididos em ensaios estáticos e ensaios cinéticos. A diferença entre estes tipos de testes, é que nos ensaios estáticos não é levada em consideração a cinética das reações envolvidas no processo de oxidação e/ou neutralização dos sulfetos. Isto

indica que os ensaios estáticos apenas indicam os possíveis problemas, mas é nos ensaios cinéticos que se verifica a confirmação da geração de acidez e o potencial de liberação de outros contaminantes, como os metais pesados e sulfatos.

Mello e Abrahão (1998), descrevem um determinado teste estático realizado, como sendo a avaliação dos potenciais ácido/base de algumas amostras de sondagem. Já os testes cinéticos podem verificar e descrever a magnitude do efeito da geração de acidez presente. Dentre os testes denominados cinéticos, que implicam variações do material ensaiado ao longo do tempo, os testes com lisímetros se destacam, onde se pode ensaiar pequenos ou grandes volumes de amostras de rejeitos e minérios em condições controladas em laboratório, visando simular as condições reais de intemperismo e as reações físico-químicas a que estes materiais estariam naturalmente submetidos e verificar os efeitos sobre a qualidade das águas em contato com estes materiais.

Os objetivos dos testes com o uso de lisímetros são os de poder prever em escala de laboratório, os processos geoquímicos de intemperismo, confirmar a taxa de variação temporal na geração de ácido e qualidade da lixívia, avaliar o efeito das diferentes técnicas de disposição de rejeitos na geração da DAM e proporcionar uma avaliação para opções de controle da DAM. (Borba et. al, 2002).

Uma grande vantagem dos testes cinéticos feitos com lisímetros é a possibilidade de prever antecipadamente, por meio de ensaios em escala de laboratório sob condições controladas, as situações esperadas quando da exposição de minérios sulfetados durante o proces-

so de lavra, de beneficiamento ou de deposição de rejeitos e estéreis, extrapolando a escala de tempo real, podendo prever e propor alternativas de minimizar da geração de drenagens ácidas mesmo antes da abertura de uma mina.

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1 ESTUDOS EM CAMPO**

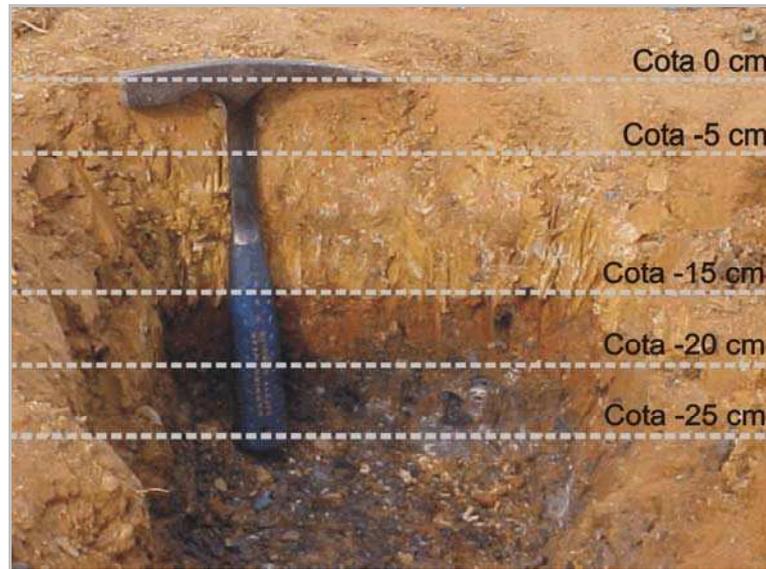
O local selecionado para coleta de amostras e testes de campo está localizado na antiga ICC (Indústria Carboquímica Catarinense), onde hoje funciona o IPAT (Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas), pertencente a UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense (figura 1). Neste local foram depositados rejeitos de carvão, denominados de R<sub>1</sub> (primário mais rico em sulfeto) e R<sub>2</sub> (mais pobre em sulfeto), folhelhos carbonosos e finos produtos do beneficiamento de carvão de todas as carboníferas existentes na região na década de oitenta, além de rejeitos de carboníferas do Rio Grande do Sul.

Na figura 1 aparece o local exato da área de estudo (coordenadas UTM Leste 655423 e Norte 6820761 – quadrado em vermelho), onde foram executados os testes de infiltração e permeabilidade do solo, segundo a metodologia empregada por Tucci (1993).



**Figura 1 – Localização da área dos testes de campo.**

Para identificar e caracterizar as camadas de solo e sua profundidade, foi escavada uma trincheira no solo até atingir a camada de rejeito depositado (figura 2).



**Figura 2 – Estratigrafia da camada de solo do depósito de rejeitos estudado.**

Os testes consistiram em verificar as condições reais de compactação do solo, sua condutividade hidráulica, índices de infiltração de água e escoamento superficial de um depósito atual, verificando assim a eficiência de isolamento da camada superior de solo para o re-

jeito, para posteriormente serem simuladas estas condições em laboratório, onde estão sendo feitos testes com uso de lisímetros. Cada um dos testes empregados são descritos a seguir.

Deve-se mencionar ainda que após a identificação destes materiais e da execução dos testes foram realizadas coletas de amostras deformadas conforme descrito em Borba et. al. (2002), com auxílio de uma pá de corte e uma enxada. Como o material aparentemente se mostrava heterogêneo, optou-se por coletar amostras representativas de cada nível do perfil.

### 5.1.1 TESTE DE INFILTRAÇÃO

O teste de infiltração de água no solo foi realizado através do método dos anéis concêntricos, visando a caracterização hidráulica do solo. A técnica consiste em captar dados através de dois anéis cilíndricos de chapa de aço de 3 mm de espessura, diâmetros de 25 e 50 cm e altura de 30 cm, conforme figura 3.



**Figura 3 - Ensaio de infiltração pelo método dos anéis concêntricos.**

Para tanto deve-se cravar os anéis no solo até uma profundidade de 15 cm, e, posteriormente saturar com água a camada superior, correspondente a área dos dois anéis. Uma vez saturado o solo deu-se início ao teste propriamente dito, com a introdução de uma lâmina d'água de 1 cm no interior do anel menor. O anel externo (anel maior) tem a função de reduzir o efeito da dispersão lateral da água infiltrada no tubo interno. Com isto a água do tubo interno infiltra no perfil do solo em uma direção predominantemente vertical, evitando assim uma superestimativa da velocidade de infiltração. A partir desta técnica foi verificado o tempo de infiltração do volume de água disposto no anel interno, e calculado o valor da condutividade hidráulica desta cobertura.

### **5.1.2 TESTE DE PERMEABILIDADE**

O teste de permeabilidade do solo foi efetuado pelo método do trado invertido, permitindo estimar assim a condutividade hidráulica do substrato (figura 4). A técnica consistiu em perfurar o solo com auxílio de um trado holandês (figura 5), com diâmetro de 10 cm até atingir a profundidade de 1 metro. Estando o furo pronto, o mesmo foi preenchido com água e com uma trena com uma bóia na extremidade. A cada 5 minutos foi feita uma leitura, verificando e descrevendo em uma planilha, qual a altura da lâmina de água. À medida que o nível da trena baixava, identificava-se a infiltração da água no solo. O teste foi finalizado quando o volume d'água infiltrada atingiu valores constantes de infiltração por minuto.



**Figura 4 - Ensaio de permeabilidade pelo método do trado invertido.**



**Figura 5 - Perfuração do buraco para ensaio de permeabilidade.**

## **5.2 ESTUDOS EM LABORATÓRIO**

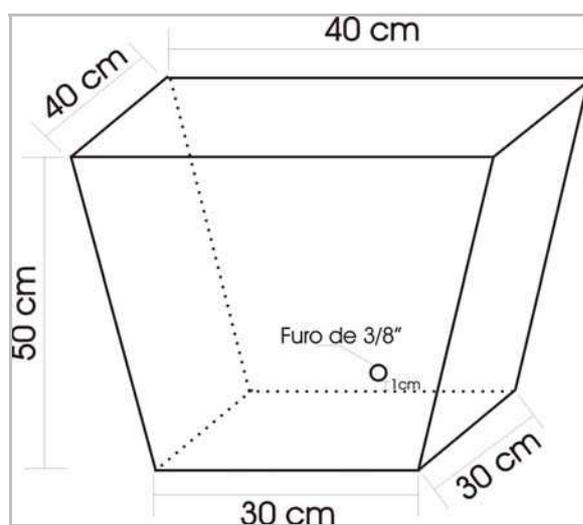
Os materiais utilizados nos ensaios, solos e rejeitos, foram coletados e encaminhados para caracterização química e mineralógica. Estes ensaios são de extrema importância para verificação da potencialidade poluidora destes materiais. Tanto o substrato quanto o rejeito foram encaminhados para análises nos laboratórios da CIDASC (Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola), para verificação da composição química – análises de enxofre, ferro, manganês, alumínio, zinco, pH, Eh, CTC, matéria orgânica, fósforo, potássio e cálcio. Para a verificação mineralógica (tipos de minerais e compostos cristalinos) optou-se pela técnica de Difractometria de raios-X, realizada em São Paulo no IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).

### **5.2.1 TESTES CINÉTICOS EM LISÍMETROS**

Testes cinéticos indicam variações ao longo do tempo de um material a ser ensaiado em escala piloto em laboratório (Pinto e Nepomuceno, 1998). Estes ensaios foram executados após a caracterização e identificação do substrato e rejeito, por meio de três lisímetros. Os lisímetros são caixas utilizadas para conter pequenos volumes de amostras de minérios ou rejeitos, que em condições controladas em laboratório, possam ser submetidas aos efeitos do intemperismo (chuva, calor, insolação, vento), gerando transformações físico-químicas nestes materiais, as quais estariam naturalmente ocorrendo no meio.

Os lisímetros foram confeccionados em vidro temperado de 6 mm de espessura, com dimensões de base inferior de 0,30 x 0,30 m, base superior de 0,40 x 0,40 m e altura de

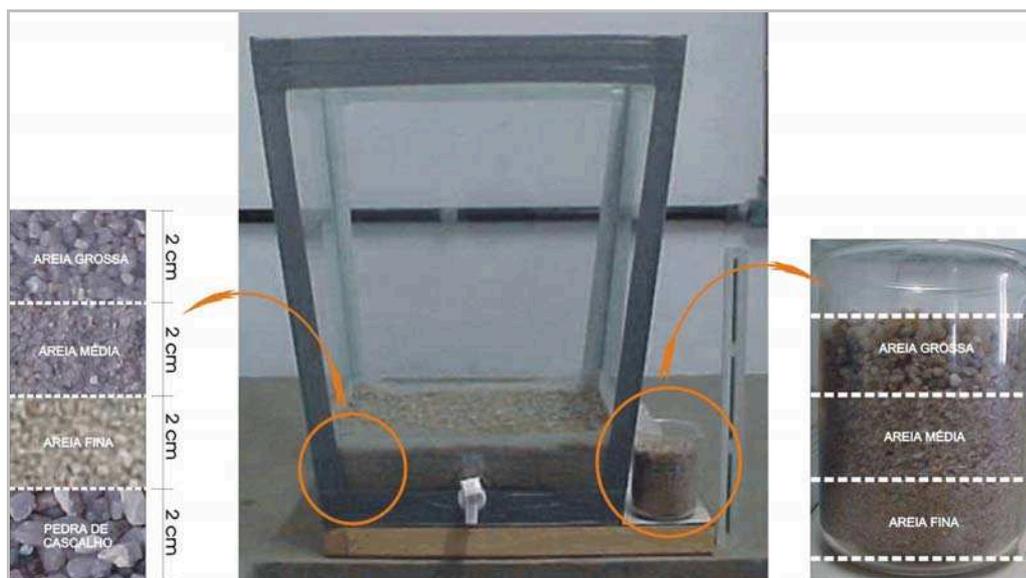
0,50 m, (figura 6) com uma saída de água a 1 cm da base inferior, para coleta de amostras de efluentes. Construídas as cubas foram iniciados os trabalhos de adaptação e introdução das amostras para posteriormente dar-se início aos testes. A seguir serão descritas cada uma das etapas realizadas após a confecção das cubas.



**Figura 6 - Esquema de um dos lisímetros utilizados nos ensaios em laboratório.**

#### **5.2.1.1 Deposição de material filtrante na base do lisímetro**

Na base de cada lisímetro, foram introduzidas três camadas de areia de granulometria distintas e uma camada de cascalho, cada uma dessas separadas por uma tela filtrante de plástico, tendo a finalidade de não misturar os materiais e de auxiliar na coleta dos lixiviados, inibindo assim a passagem de finos de carvão pela torneira coletora. Os materiais utilizados aparecem ilustrados na figura 7.



**Figura 7 - Caracterização do material filtrante utilizado nos experimentos.**

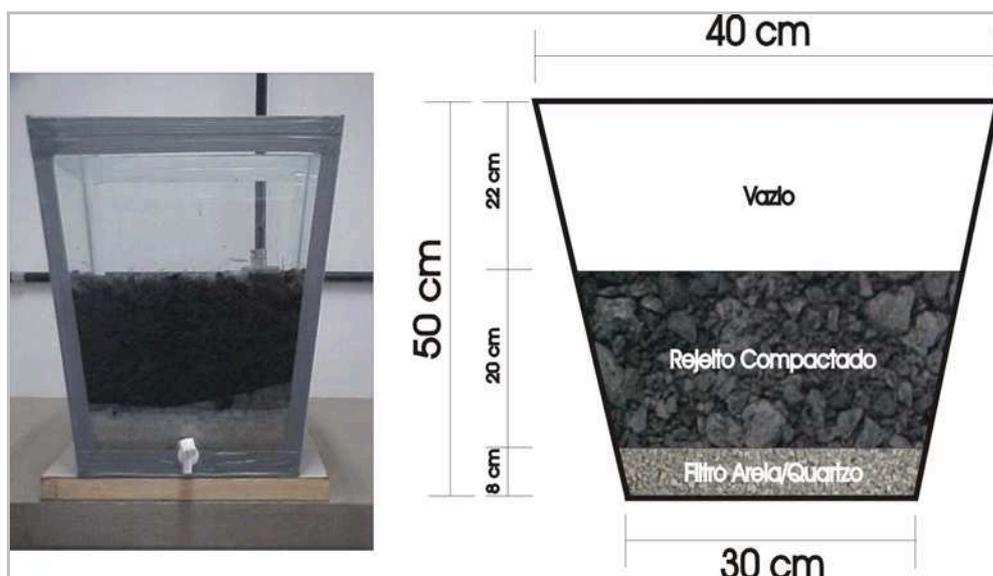
- 2 cm de areia grossa lavada;
- 2 cm de areia média lavada;
- 2 cm de areia fina lavada;
- 2 cm de pedras de cascalho;

### **5.2.1.2 Introdução do material a ser estudado nos lisímetros**

Após a colocação dos filtros na base dos lisímetros foram introduzidos os materiais alvo de estudo. A fim de entendimento de como se processa a geração e evolução da drenagem ácida, em um dos lisímetros só foi colocado o rejeito, sem cobertura enquanto que nos outros dois, acima do rejeito foi introduzido um substrato, como descrito a seguir:

### ➤ Lisímetro 1

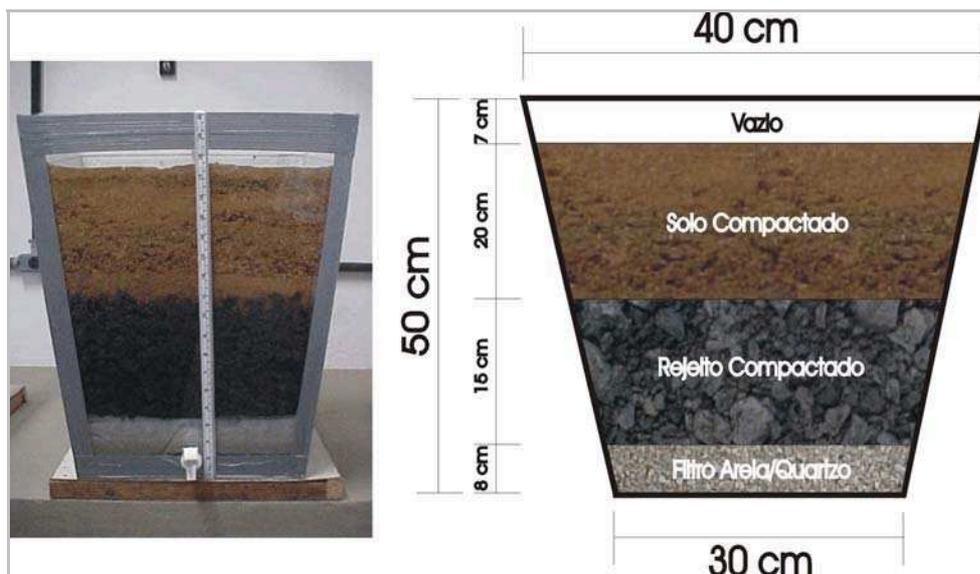
Foram feitas as simulações apenas com uma camada de rejeito compactado, (figura 8), para verificar a geração de acidez potencial destes materiais reativos e posteriormente compará-las com as dos outros lisímetros, onde foram testadas coberturas de solos.



**Figura 8 - Lisímetro 1: Testes feitos apenas com o rejeito compactado.**

### ➤ Lisímetro 2

Foi colocada sobre a camada de rejeitos, uma camada de solo de 20 cm compactada, evitando assim os espaços vazios entre os materiais e conseqüentemente o oxigênio atmosférico presentes entre estes materiais, inibindo a oxidação direta dos sulfetos presentes nestes rejeitos. (Figura 9).



**Figura 9 - Lisímetro 2: Testes feitos com uma camada de solo sobre os rejeitos.**

### ➤ Lisímetro 3

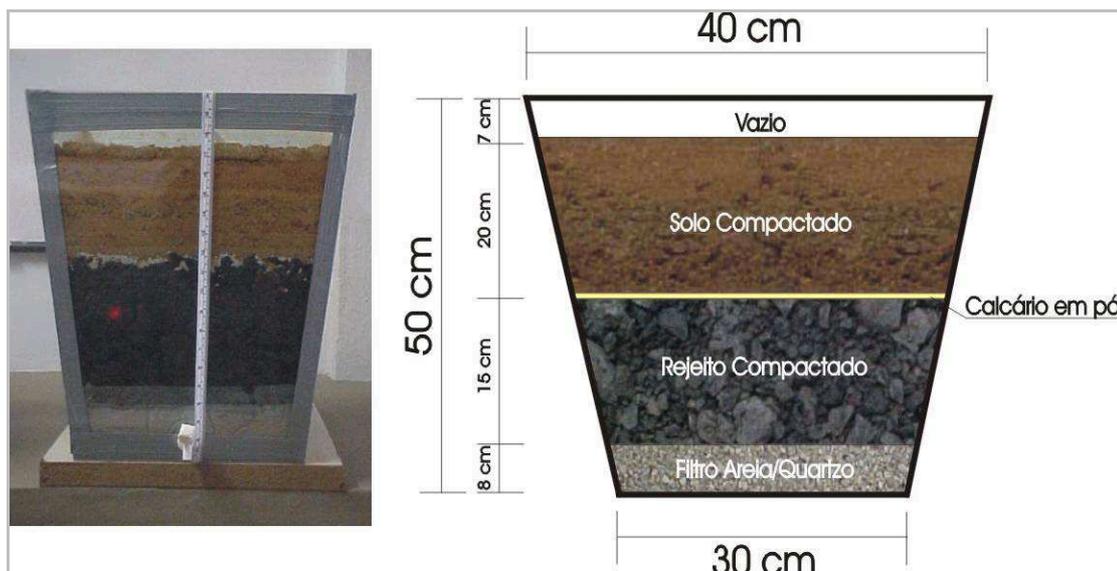
Neste, foram realizados os testes com a mesma cobertura de 20 cm de solo compactado sobre os rejeitos, conforme lisímetro 2, mas foi utilizado entre as camadas de solo/rejeito uma camada de calcário em pó conforme figura 10. Segundo o projeto I-PAT/UNESC (2003), recomenda-se que por hectare deve-se adicionar 69,92 t de calcário (PRNT 75%), sobre os rejeitos e estéreis. Assim com base nas proporções estipuladas pela equação abaixo, a quantidade ideal de calcário a ser utilizado no lisímetro foi de 1,12 Kg.

$$\text{Área superficial do lisímetro 3} \Rightarrow 0,16 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2 \Rightarrow 69,92 \text{ t} = 69920 \text{ kg calcário}$$

$$0,16 \text{ m}^2 \Rightarrow X \text{ Kg calcário}$$

$$X = 1,12 \text{ Kg de calcário}$$



**Figura 10 - Lisímetro 3: Testes feitos com uma camada de solo sobre os rejeitos e colocação de calcário em pó entre eles, auxiliando o aumento do pH da água.**

A adoção dessa medida neste teste tem por finalidade reduzir a geração de drenagem ácida a partir desses materiais, entretanto não se sabe realmente se esse volume será suficiente para evitar que águas ácidas sejam produzidas. Este teste verificará as quantidades a serem empregadas para realmente evitar a formação de efluentes ácidos.

### 5.2.1.3 Ciclo de simulação

A relação adotada para a simulação nesta pesquisa foi de simular 6 meses em 1 mês. É importante ressaltar que erros de predição considerando o tempo simulado com o tempo real relacionado podem ocorrer, mas o objetivo do trabalho não fica comprometido, visto que a aceleração do intemperismo com aumento das cargas nas simulações sobre o material ensaiado pode ser atingida, podendo então prever os efeitos sobre as drenagens (efluentes coletados) que é o objetivo principal do estudo. (Pinto e Nepoumceno, 1998).

#### 5.2.1.4 Simulação do efeito do sol e vento

A simulação dos efeitos da radiação do sol nas camadas de solo e rejeito foi efetuada a partir da captação de dados de irradiação na Estação Meteorológica de Urussanga/SC, onde foram transformados os dados da irradiação de calor em watts. Tal efeito foi simulado com dois pares de lâmpadas infra-vermelho e ultra-violeta dispostos sobre os lisímetros, a fim de caracterizar os efeitos de radiação e fornecimento de calor aos materiais ensaiados. (Figura 11). O efeito do vento foi simulado pela instalação de um ventilador em um ponto estratégico do laboratório que alcance todos os lisímetros. Assim os efeitos do intemperismo com a ação dos ventos, radiação e fornecimento de calor, são aplicados aos ensaios, conforme estes estivessem dispostos em um ambiente natural sofrendo essas ações.



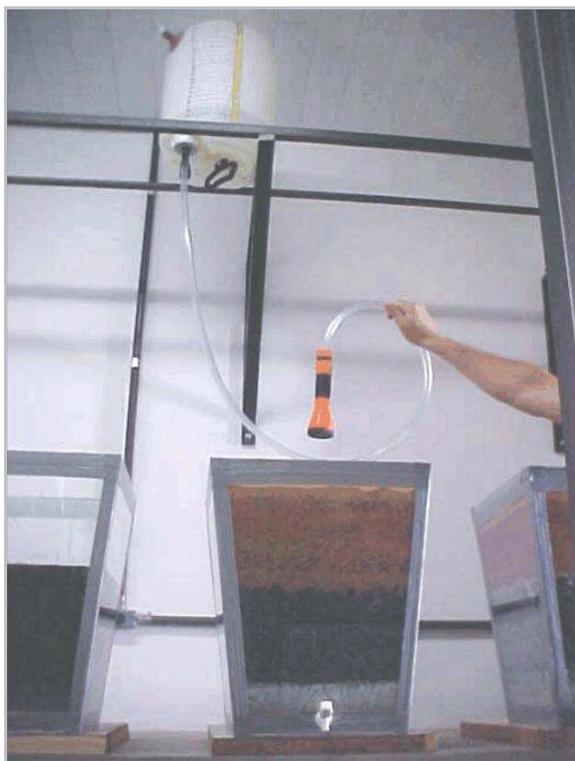
**Figura 11 - Simulações dos efeitos de radiação e fornecimento de calor.**

### 5.2.1.5 Simulação da precipitação

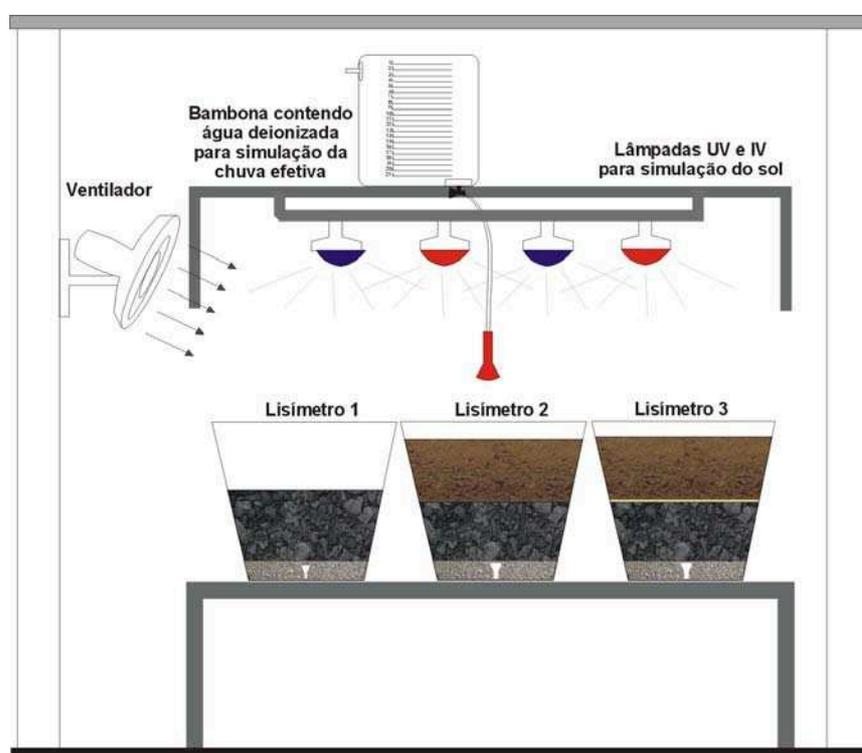
A simulação da precipitação foi baseada nos dados pluviométricos da estação Meteorológica de Urussanga/SC, onde verificou-se a chuva média mensal da região. Após os testes de condutividade hidráulica do solo em campo, que forneceram a quantidade de água que infiltra no solo do depósito de rejeitos onde foram feitos os testes, os mesmos foram classificados conforme o método de Soil Conservation Service (SCS). Após estes testes quantificou-se o volume de água a ser precipitada nos lisímetros levando em conta as devidas transformações para a área a ser drenada (superfície dos lisímetros). O volume simulado refere-se às médias mensais dos últimos 22 anos, onde apenas as águas que infiltram no solo, conforme testes realizados, foram levadas em consideração, desconsiderando as águas de escoamento superficial e evaporação.

Conforme valores de precipitação obtidos dos dados médios mensais dos últimos 22 anos, foram executadas conversões destes volumes que são referentes à unidade de medição habitual, onde um milímetro de chuva corresponde ao volume de precipitação de 1 litro por metro quadrado de superfície.

A água empregada foi deionizada visando eliminar a influência de íons presentes nas águas de captação. Os equipamentos utilizados para estes testes de precipitação foram: uma bombona graduada de 20 litros para armazenar a água para cada lisímetro onde existe uma saída de água na parte inferior da bombona controlado por um registro e saindo por uma mangueira até um chuveiro de jardim. (Figura 12).



**Figura 12 - Bombona graduada de armazenamento de água deionizada com saída por uma mangueira e um chuveiro de jardim.**



**Figura 13 - Desenho esquemático do funcionamento do laboratório.**

### 5.2.1.6 Programa de amostragem

As amostragens dos lixiviados estão sendo feitas com coletas de água dos lisímetros a cada cinco dias, onde o volume precipitado é correspondente a um mês de simulações. É necessário salientar que os volumes introduzidos são equivalentes as águas de infiltração por esta camada de solo (precipitação efetiva). Após isto, serão analisados os parâmetros de interesse ambiental para o estudo do comportamento da formação de drenagem ácida, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5: Parâmetros utilizados para caracterizar o efluente coletado.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método de Análise</b>
<b>Acidez Total (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	Volumétrico a pH 8,3
<b>Alumínio (mg/L)</b>	Espectrofotometria de absorção atômica
<b>Dureza Total (mg/L)</b>	Complexométrico c/ EDTA
<b>Eh (potencial oxi-redução) (mg/L)</b>	Potenciométrico
<b>Ferro Total (mg/L)</b>	Espectrofotometria de absorção atômica
<b>Manganês (mg/L)</b>	Espectrofotometria de absorção atômica
<b>pH</b>	Potenciométrico
<b>Sulfatos (mg/L)</b>	Turbidimétrico

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **6.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NOS ENSAIOS**

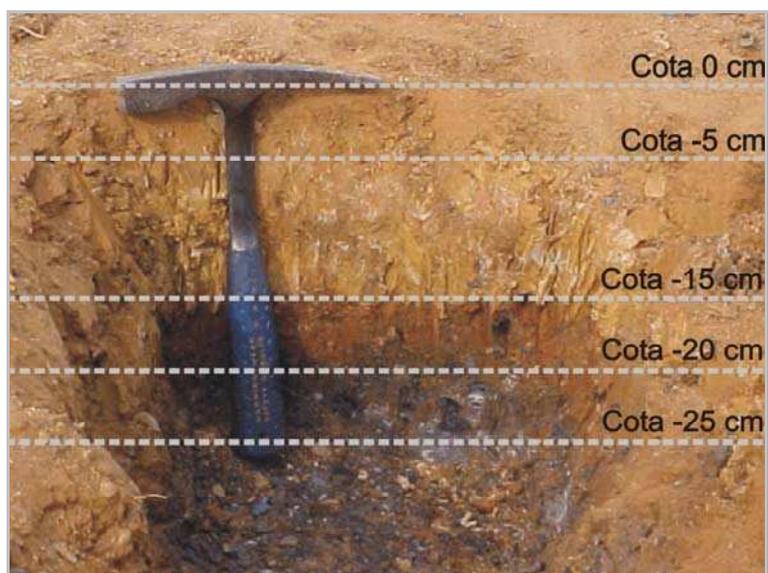
#### **6.1.1 SUBSTRATO**

Na área onde foi escavada a trincheira nota-se uma variação do substrato. As principais características observadas em cada um dos níveis aparecem descritas a seguir (Tabela 6). Como se observa na tabela o substrato varia de um solo a rocha alterada, com granulometria fina (silte-argiloso) cuja coloração é distinta, aparecendo desde marrom acastanhado até marrom avermelhado.

No dia em que foi realizada a coleta do substrato, o material estava úmido, e apresentava-se na forma de torrões (figura 15), dificultando a compactação e a disposição nos lisímetros. Desse modo, foi preciso deixar o substrato secar a sombra durante 10 dias, e após este período foram desmanchados com auxílio de uma marreta, resultando assim em um material com granulometria menor, facilitando a compactação nos lisímetros. (Figura 16).

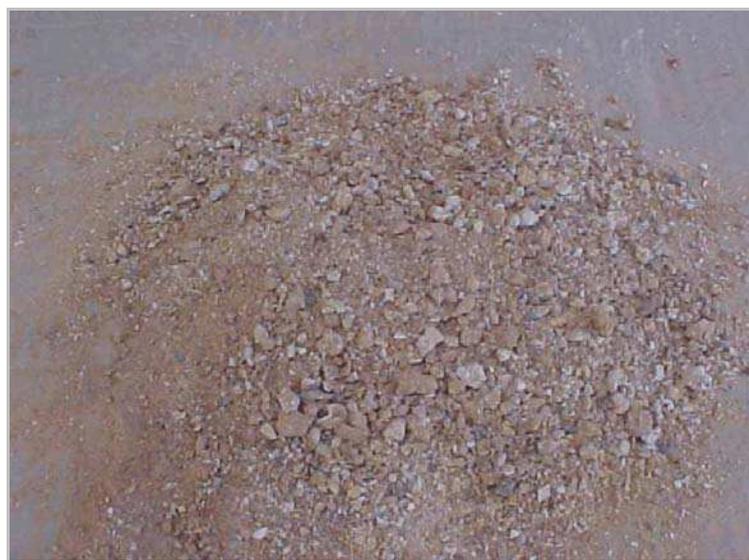
**Tabela 6: Caracterização da camada de solo.**

<b>Profundidade</b>	<b>Descrição do solo</b>
<b>0 a 5 cm</b>	Solo siltoso em formação, cor marrom acastanhado com estrutura porosa, com presença de raízes e baixa densidade.
<b>5 a 15 cm</b>	Solo siltito argiloso cor ocre com manchas rosadas e cinza claro. Material com boa plasticidade indicando alta % de argila.
<b>15 a 20 cm</b>	Siltito marrom avermelhado, com boa plasticidade, argiloso contendo rejeito de carvão com granulometria grossa (até 1,5 cm) disperso no meio do material.
<b>20 a 25 cm</b>	Rejeito de beneficiamento de carvão contendo carvão mineral e folhelho cinza escuro. Presença de sulfato de Fe hidratado (massa microcristalina amarelo pálido e amarelo acinzentado com hábito fibroso/radiado) Não foram identificados sulfetos de ferro.

**Figura 14 -Verificação das camadas de solo sobre os rejeitos.**



**Figura 15 - Solo úmido coletado e exposto na sobra para secar.**



**Figura 16 - Solo após secar 10 dias na sombra pronto para a deposição no lisímetro.**

### **6.1.2 REJEITO PIRITOSO**

Primeiramente foram coletados rejeitos na área do depósito onde foram realizados os testes de campo (*vide* tabela 6). Mas verificou-se que este rejeito, por ser um material exposto as condições naturais há duas décadas, já havia reagido, apresentando sulfatos de ferro hidratados produto da alteração dos sulfetos e também baixo teor de enxofre, o que para o estudo aqui apresentado não seria interessante, pois não representaria as condições reais en-

contradas em rejeitos com pirita que ainda não sofreram alterações. A partir desta verificação optou-se por coletar um material são, pouco intemperizado, rico em pirita, de preferência extraído diretamente do beneficiamento de uma das minerações da região. Em vista disto foi coletado material da Carbonífera Metropolitana, na cidade de Treviso/SC. No momento da coleta e na hora da introdução nos lisímetros o rejeito apresentava-se com um alto teor de umidade, porém encontrava-se em estado inalterado com grande quantidade de pirita sem sinais de oxidação. (Figura 17).



**Figura 17 - Rejeito piritoso testado nos lisímetros.**

### **6.1.3 BRITA DE QUARTZO E AREIA LAVADA**

No início do projeto considerava-se que apenas seria necessário colocar um filtro de quartzo (brita) para filtragem dos finos do rejeito e coleta do efluente. Porém, durante os primeiros ensaios de ajuste dos lisímetros, foi observado que este material não apresentava granulometria suficiente para tal função.

A areia lavada e a brita de quartzo utilizadas no experimento tiveram a finalidade de formação de um pré-filtro, evitando assim a passagem de finos de carvão no efluente a ser coletado. Houve a preocupação em utilizar materiais filtrantes que não reagissem quando em contato com a água e com os outros tipos de materiais. Na construção do filtro, a areia lavada foi separada em três granulometrias diferentes, a fim de obter uma melhor eficiência na retenção dos finos dos rejeitos. A separação desse material foi realizada com o auxílio de peneiras, conforme descrito pela norma NBR 7217/87, (figura 18), onde foram separadas as seguintes frações conforme os seguintes diâmetros.

- 2,36 mm - grânulos;
- 1,18 mm – areia muito grossa;
- 0,30 mm – areia média.



**Figura 18 - Peneiras utilizadas nos testes de separação dos materiais filtrantes.**

## 6.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

### 6.2.1 TESTES PELO MÉTODO DOS ANÉIS CONCÊNTRICOS

Previamente a realização dos testes, verificou-se a necessidade de saturar a camada superficial de solo, a fim de evitar que a água simulada ficasse retida nas camadas superiores do solo, mantendo-o saturado e não infiltrando. Conforme os dados do teste realizado por este método, o valor da infiltração foi ajustado pela equação de Kostiakov para a infiltração básica. (IPH/UFRGS, 2001).

A lâmina de 1 cm de água levou 1 hora e 45 minutos para infiltrar no interior do anel menor, conforme descrito pela equação abaixo. O valor da condutividade hidráulica (K) obtida neste método de ensaio foi de  $K = 7.77 \times 10^{-8}$  m/s, caracterizando assim solos com baixa capacidade de infiltração e baixa capacidade de recarga, indicando alta porcentagem de argila e alto poder de impermeabilização.

$$\phi \text{ do anel maior } 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$$

$$\phi \text{ do anel menor } 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ cm} = 0,01 \text{ m (lâmina infiltrada)}$$

$$T = 1 \text{ h } 45 \text{ m} = 6300 \text{ s (tempo de infiltração)}$$

$$A = \pi \times R^2$$

$$A = \pi \times 0,125^2$$

$$A = 0,049 \text{ m}^2$$

$$V = A \times h$$

$$V = 0,049 \times 0,01$$

$$V = 0,00049 \text{ m}^3$$

$$K = V/\Delta T$$

$$K = 0,00049 \text{ m}^3 / 6300 \text{ s}$$

$$K = 7.77 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

### 6.2.2 TESTES PELO MÉTODO DO TRADO INVERTIDO

Neste teste foi verificado que os solos possuem baixa capacidade de infiltração e recarga, com altos teores de argila indicando boa capacidade de impermeabilização.

Este teste indicou infiltrações verticais e horizontais de água no solo, ao contrário do primeiro, onde ocorreu apenas a infiltração vertical. Por este método, após 75 minutos de teste verificou-se que a infiltração ficou estável em 2 mm a cada leitura de cinco minutos, e os testes foram conduzidos até 2 horas de experimento. A altura infiltrada nestas duas horas foi de 8,3 cm e a condutividade hidráulica do solo identificada neste ensaio foi de  $K = 9,05 \times 10^{-8}$  m/s, conforme equação.

$$\phi \text{ do furo } 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$L = 1 \text{ m}$$

$$h = 8,3 \text{ cm} = 0,083 \text{ m (lâmina infiltrada)}$$

$$T = 2 \text{ h} = 7200 \text{ s (tempo de infiltração)}$$

$$A = \pi \times R^2$$

$$A = \pi \times 0,05^2$$

$$A = 0,00785 \text{ m}^2$$

$$V = A \times h$$

$$V = 0,00785 \times 0,083$$

$$V = 0,00065 \text{ m}^3$$

$$K = V/\Delta T$$

$$K = 0,00065 \text{ m}^3 / 7200 \text{ s}$$

$$K = 9,05 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

### 6.3 QUANTIFICAÇÃO DOS VOLUMES DE ÁGUA SIMULADOS

De posse dos dados de campo e dos dados climatológicos dos últimos 22 anos, obtidos pela Estação metereológica de Urussanga, os testes em laboratório iniciaram-se com simulações conforme os volumes de precipitação médios obtidos para o mês de novembro, descritos na tabela 7.

Conforme caracterização do substrato de cobertura, identificando sua condutividade hidráulica, o solo foi classificado conforme o método do *Soil Conservation Service* (SCS), pertencendo ao grupo E, que caracteriza solos barrentos com teor de argila em torno de 30 % apresentando uma camada impermeável de solo, com uma condição de umidade descrita como condição II, isto é, solos poucos secos, onde houve uma precipitação de 15 a 40 mm nos últimos 5 dias.

Após esta definição, obtidos o valor da porcentagem de escoamento superficial das águas sobre este substrato, foi definido conforme Tucci (1993), que os valores de CN (*curve number*) para este solo é de 95, isto é, escoamento em torno de 40 %, indicando substratos com boa capacidade de impermeabilização.

Os dados iniciais de infiltração simulados para solos com valor de CN=95, correspondente a uma área de um metro quadrado, foi um volume de 89,4 mm de chuva para o mês inteiro. Estes valores médios caracterizam o mês de novembro, onde foram simulados nos primeiros 5 dias de teste. Portanto a cada 5 dias será simulado os valores correspondentes a um mês de chuva, iniciados a partir do mês de novembro. Então do sexto ao décimo dia, foi simulado o volume correspondente ao mês de dezembro e assim por diante, considerando as devidas proporções para a área superficial do lisímetro. Concluindo os dados extrapolados foram de simulação de 6 meses em um 1 mês.

**Tabela 7: Volumes em milímetros de infiltração, para os últimos 22 anos em um tipo de solo com valor de CN 95, obtidos da estação pluviométrica de Urussanga/SC.**

<b>ANO</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<b>1981</b>	94,6	77	109,1	93	47	45,2	40,6	46,1	95,9	78,8	69	87,6
<b>1982</b>	55,3	109,1	136,7	55,7	62,6	91	54,7	72,3	47,1	125,7	102,6	100,8
<b>1983</b>	134,4	111,9	104,3	88,3	130,9	63,7	129,1	85,8	53,3	58	138,8	145,4
<b>1984</b>	126,1	60	136,4	83,9	75,8	88,4	86,8	76,5	74,6	74,7	105,6	118
<b>1985</b>	76,1	130,8	98,7	71,7	34,7	62,8	54,7	91,7	60,4	97	71,2	76,9
<b>1986</b>	77,5	126,7	92,8	104,3	51,2	21,4	76	55,9	79,3	78,1	114,5	114,9
<b>1987</b>	89,1	121,9	66,8	63,5	129,2	87,7	104	106,9	67,1	142	83,5	98,5
<b>1988</b>	150,3	65,9	65,3	83,6	46,4	69,2	27,8	15	86	77,7	45,4	87,2
<b>1989</b>	153,3	86,8	78,9	77,4	78,2	44,1	62,6	50,6	110	54,6	62,7	90,1
<b>1990</b>	137,9	107,8	75,6	106,5	82	62,5	72,6	42,1	111,9	73,2	122,3	99,4
<b>1991</b>	88,8	51	60,3	99,8	18,5	69,2	33,8	43,8	41,7	109,5	119,5	133
<b>1992</b>	84,5	149,1	103,3	29	109,1	45,2	74,1	96,1	97,7	58,2	61,4	45,3
<b>1993</b>	168,6	127,6	123,6	88,7	55,5	37,1	107,3	24,3	81,3	96,3	67,7	139,3
<b>1994</b>	65,1	145,6	134,7	50	130,4	50	87,4	26,2	27,2	106,6	109,1	101,4
<b>1995</b>	96,3	135,2	58,5	41,7	24,3	94	103,7	58,2	92	101,5	89	87
<b>1996</b>	133,5	98,8	104,6	57,7	61,9	85,2	58,2	85,1	104,7	88,7	56,7	156,8
<b>1997</b>	119,4	128	37,8	59,5	23	48,3	62,8	102,2	74,8	148,3	102,2	71,1
<b>1998</b>	126,4	141	119,5	70,1	53,1	57,9	92,7	108,9	109,7	87,8	61,4	66,6
<b>1999</b>	51,8	126	85,2	80,2	44,1	53,3	113,8	32,3	47,4	83	66,6	58,5
<b>2000</b>	168,3	136,9	89,9	48,7	80,9	89,8	40,1	43,1	83,8	129,8	100	89,8
<b>2001</b>	128,7	126,9	67,2	145,9	52,9	64,1	80,6	31,5	114,6	93,9	89,7	96,5
<b>2002</b>	118,6	114,8	110,5	74,6	66,5	65	52,3	68,5	83,7	144,6	127,3	136,6
<b>Média</b>	<b>111,1</b>	<b>112,7</b>	<b>93,6</b>	<b>76,1</b>	<b>66,3</b>	<b>63,4</b>	<b>73,4</b>	<b>62,0</b>	<b>79,3</b>	<b>95,8</b>	<b>89,4</b>	<b>100,0</b>

No entanto, a área de superfície neste experimento para realização da simulação, foi calculada e as conversões para os volumes correspondentes de simulação estão descritas nas equações que seguem.

Os cálculos foram feitos com os valores correspondentes ao mês de novembro, onde os dados obtidos foram de 89,4 mm de infiltração para uma área de 1 m<sup>2</sup>.

- Área de superfície do lisímetro medida em laboratório;

$$A = a^2 \Rightarrow a = 0,37 \text{ m}$$

$$A = 0,37^2$$

$$A = 0,1369 \text{ m}^2$$

- Conversão do volume infiltrado em um mês para a área correspondente;

$$1 \text{ m}^2 \text{ de área} \Rightarrow 89,4 \text{ mm ou } 89,4 \text{ litros}$$

$$0,1369 \text{ m}^2 \text{ de área} \Rightarrow X \text{ mm/L}$$

$$X = 12,24 \text{ mm ou litros}$$

Portanto, o volume simulado nos primeiros cinco dias, após conversões para a área a ser drenada, correspondente a média do mês de novembro, foi de 12,24 litros de água para cada lisímetro. Já a próxima escala de cinco dias, onde corresponde ao mês de dezembro foi simulado conforme os dados da tabela 6, 13,69 litros em cada lisímetro e assim sucessivamente. A cada cinco dias será simulado o mês seqüencial.

## 6.4 SIMULAÇÃO DO INTEMPERISMO NOS LISÍMETROS

Como descrito no capítulo 5 (materiais e métodos) foram utilizados três lisímetros para estudo de como se processa a drenagem ácida e se comportam os rejeitos quando recobertos com coberturas secas e expostos aos efeitos do intemperismo. Abaixo apresenta-se algumas características observadas durante os primeiros ensaios realizados, lembrando que este trabalho continua em andamento, sendo estes os primeiros resultados obtidos.

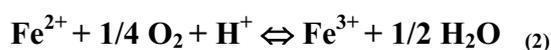
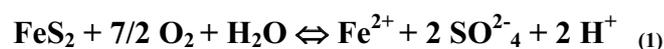
### ➤ Lisímetro 1

O lisímetro 1 foi preenchido apenas com rejeitos piritosos compactados, conforme descrito no capítulo 5 deste projeto. O primeiro ensaio foi simulado introduzindo um volume de 7 litros de água deionizada, correspondente a 17 dias de precipitação levando em consideração a precipitação média efetiva no mês de novembro nos últimos 22 anos, que é de 89,4 mm. (Figura 19).



**Figura 19 - Simulação da precipitação.**

Quarenta e oito horas depois de simulado o efeito da chuva verificou-se que a camada superficial dos rejeitos se encontrava seca, e as piritas presentes nos rejeitos já haviam perdido o brilho, mostrando-se mais opacas. Nessa camada foi verificada a formação de cristais de sulfato de ferro hidratado de coloração branca, provavelmente melanterita, que precipitaram após ocorrer oxidação do sulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ) pelo oxigênio atmosférico e a hidrólise pelo contato com a água. A melanterita é mostrada na figura 20 sendo identificada pelos círculos azuis. Também foi observada a formação de hidróxido de ferro sobre os rejeitos piríticos, característicos pela cor marrom alaranjado, e que estão destacados pelos círculos vermelhos na figura 20. A formação destes minerais pode ser explicada a partir das reações químicas apresentadas na revisão da literatura (reações de Singer e Stuman, 1970), descritas abaixo. No interior do lisímetro o rejeito apresentava-se bem úmido devido a infiltração da água.



**Figura 20 - Reações ocorridas no ensaio realizado no lisímetro 1.**

➤ **Lisímetro 2**

O lisímetro 2 está preenchido com rejeitos, sobre os quais foi depositada uma camada de 0,20m de siltito argiloso compactado. A mesma simulação de precipitação descrita no lisímetro 1 foi empregada neste lisímetro, ou seja, 7 litros, referentes a 17 dias de chuva dos meses de novembro dos últimos 22 anos.

Depois de 48 horas desta simulação foi visto que a camada de solo encontrava-se saturada e sua camada superficial sofrera contração identificada pela presença de gretas. (Figura 21). No entanto a camada de rejeito sob o solo não sofrera alteração devido a pequena migração de água e oxigênio através da camada superior, permanecendo apenas um pouco úmida e semelhante ao estado em que se encontrava antes da simulação.



**Figura 21 - Vista superior da camada superficial de solo do lisímetro 2, demonstrando fissuras.**

### ➤ Lisímetro 3

No lisímetro de número 3 foi depositada, entre os rejeitos e o solo, uma camada de calcário conforme descrito no capítulo “Materiais e Métodos”, tendo sido determinada a quantidade de 1,12 kg de calcário em pó, calculado de acordo com o que segue:

$$\text{Área superficial do lisímetro 3} \Rightarrow 0,16 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2 \Rightarrow 69,92 \text{ t} = 69920 \text{ kg calcário (IPAT/UNESC, 2003)}$$

$$0,16 \text{ m}^2 \Rightarrow X \text{ Kg calcário}$$

$$\mathbf{X = 1,12 \text{ Kg de calcário}}$$

Conforme observado no lisímetro 2, neste também foi verificado que as camadas superiores de solo encontravam-se saturadas após as 48 horas da simulação da precipitação, não ocorrendo percolações de água para os rejeitos. O calcário utilizado encontrava-se inalterado não sofrendo influência das águas precipitadas, demonstrando que o solo é eficiente para a finalidade de isolamento de materiais reativos.

Depois de três dias realizou-se nova simulação de chuva, nos três lisímetros, correspondente ao volume restante para simulação do mês de novembro, isto é, 5,24 litros em cada lisímetro, referentes a 13 dias de chuva. Após esta simulação verificou-se que o sulfato de ferro antes precipitado sob a forma de melanterita, sofreu solubilização no ensaio 1 e as camadas de solo nos lisímetros 2 e 3 ficaram recobertas com uma lamina d'água.

Desde o início dos testes tomou-se os cuidados para, a cada dia, serem também simuladas as condições de vento e insolação, de forma que os 3 experimentos foram expostos

a um ventilador e a lâmpadas ultra-violeta e infra-vermelho, para estimular as condições de intemperismo do vento e do calor encontradas naturalmente.

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ensaio de lixiviação realizados em lisímetros são de extrema importância para obtenção de dados referentes às reações químicas, alterações físicas e biológicas dos materiais ensaiados. No caso específico das simulações descritas neste trabalho, os testes possibilitam o acompanhamento do desenvolvimento da geração de acidez a partir de rejeitos do beneficiamento de carvão mineral; o comportamento geoquímico dos estéreis e rejeitos; a influência das características físicas da cobertura e dos rejeitos no desencadeamento das reações químicas; além das características físicas do meio como a porosidade, a permeabilidade, o teor de umidade e de oxigênio influenciando na geração de acidez.

Os testes realizados em campo foram fundamentais para a determinação das características dos materiais ensaiados, especialmente a determinação da taxa de infiltração do solo, uma vez que a partir deste dado se calculou o valor de precipitação efetiva, aquela que infiltra no solo, para condução dos testes em laboratório.

É importante salientar que o material de cobertura testado recobre um atual depósito de rejeitos e é freqüentemente utilizado nesses tipos de projetos. Os tipos de solos encontrados foram descritos com características de baixa permeabilidade com altos teores de argila e alta eficiência de isolamento da água percolante.

A utilização de reagentes como o calcário hidratado, entre os rejeitos e a cobertura de solo pode ser uma solução interessante tanto para tornar indisponíveis os metais presentes nos rejeitos, evitando dessa forma que os mesmos sejam solubilizados, bem como uma barreira capaz de alcalinizar as águas que fluem pela cobertura, tornando-as menos ácida e conseqüentemente menos reativa. Também outros tipos de materiais podem ser testados nestes lisímetros, como por exemplo coberturas constituídas de compostos orgânicos de lixo urbano.

Até o presente momento, verificamos no lisímetro 1 a formação de precipitados de sulfato de ferro hidratado, que provavelmente é representado pela melanterita e também verificou-se a formação de hidróxido de ferro sobre os rejeitos piritosos. Já nos lisímetros com uma cobertura de solo, não se identificou a formação destes precipitados, indicando então que a cobertura está inibindo grande parte da passagem de água e oxigênio pelos poros da camada superior para os rejeitos.

É importante salientar que a implantação desta metodologia é lenta e que ainda podem ser tomadas algumas medidas para o seu aprimoramento, uma vez que as simulações estão em fase inicial. Ajustes podem ser necessários no desenvolvimento dos experimentos,

sempre levando em conta os cuidados tomados para representar o mais fielmente possível as condições naturais encontradas no ambiente.

Com o desenvolvimento dos testes será possível verificar o comportamento de diferentes sistemas de cobertura de depósitos de rejeitos do beneficiamento de carvão mineral, pesquisados em laboratório mas com características representativas da realidade de campo. Dessa forma, com um baixo custo, será possível avaliar alternativas condizentes para cada caso individual, e a partir daí propor técnicas eficientes e baratas para isolar fontes de poluição e evitar a geração dos contaminantes carregados com as drenagens ácidas e que são os grandes responsáveis pelo comprometimento dos recursos hídricos de extensas áreas da região carbonífera catarinense.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRE, N Z.e KREBS, A.S.J. **Qualidade das Águas Superficiais do Município de Criciúma – SC**. Vol. 6: CPRM, Porto Alegre, 1995, p. 27-66.

BARBOSA, Juliano P. et al. **Tratamento de efluentes de drenagens ácidas através de processos ativos**. Relatório Técnico: CETEM/MCT, 2002, p.11-14.

BORBA, L.e SOUZA, V. P. **Processos de mitigação da formação de drenagens ácidas utilizando coberturas secas**. Relatório Técnico: CETEM/MCT, 2002, Atividade 1, p. 3-33.

BORBA, L.et. al. **Processos de mitigação da formação de drenagens ácidas utilizando coberturas secas**. Relatório Técnico: CETEM/MCT, 2002, Atividade 2, p. 11-29.

BORBA, L.et. al. **Processos de mitigação da formação de drenagens ácidas utilizando coberturas secas**. Relatório Técnico: CETEM/MCT, 2002, Atividade 3, p. 3-13.

GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Ed BCD: Rio de Janeiro, 1996, p. 59-122.

HUTCHISON, I.P.G. e ELLISON, R.D. **Mine Waste Management – A Resouse for mining industry professionals, regulators and consulting engeneers**. Lewuis Publishers: Boca Raton. 1990, p. 127-142.

IPAT/UNESC. **Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para o Controle de Drenagem Ácida e Tratamento de Efluentes da Indústria Carbonífera**. Relatório Técnico: I-PAT/UNESC Convênio Cooperminas, Criciúma, 2000, p. 5-12.

IPAT/UNESC. **Projeto de Reabilitação Ambiental de Áreas Degradadas pela Atividade Extrativa de Carvão Mineral – Campo Morozini – Treviso/SC**. Relatório Técnico: I-PAT/UNESC, Criciúma, 2003, p. 27-42.

IPH/UFRGS. **Avaliação da Contaminação na Área da Vila Funil por Atividades de Mineração de Carvão – Siderópolis/SC.** Relatório Técnico: IPH/UFRGS, Porto Alegre, 2001, p. 8-58.

KOPEZINSKI, Isaac. **Mineração X Meio Ambiente.** Ed Universidade: UFRGS, 2000, Porto Alegre, p. 21-35.

MACHADO, José L. F. et al. **Projeto Estudo da Vulnerabilidade à Contaminação dos Mananciais Subterrâneos Decorrentes da Extração do Carvão Mineral.** Relatório Final da Fase I: Volume I – CPRM, Porto Alegre, 1984, p. 13-43.

MELLO, J.W.V. e ABRAHÃO, W.A.P. Geoquímica da drenagem ácida. In: DIAS, L.E. e MELLO, J.W.V. (ed.). **Recuperação de áreas degradadas.** Viçosa, 1998, p. 45-58.

MENEZES, C. B. M.; SANTO, E.L. **Desenvolvimento de Métodos de Tratamento de Drenagem Ácida de Minas de Carvão.** Relatório Técnico: IPAT/UNESC, Criciúma, 2001, p. 9-28.

O'KANE, M.; AYRES, B.; CHRISTENSEN, D.; MEIERS, G. **CANMET-CETEM: Manual on cover system design for reactive mine waste.** O'Kane Consultants Incorporation. Report nº 689-01. Canadá, 2002, 148p.

PINTO, A.C.P. e NEPOMUCENO, A.L. Testes de predição e controle de processo de drenagem ácida na rio Paracatu Mineração S.A..In: DIAS, L.E. e MELLO, J.W.V. (ed.). **Recuperação de áreas degradadas.** Viçosa, 1998, p. 59-68.

SENGUPTA, M. **Enviromental Impacts of Mining – Monitoring, restoration and control,** Lewis Publishers, United States of America, 1993, p. 121-166.

SINGER, P.E.; STUMM, W. Acid mine drainage: the rate determining step. **Science**, v. 167, 1970, p. 1121-1123.

SOUZA, Vicente P. **Formação de barreira geoquímica para abatimento de drenagens ácidas de pilhas de estéril piritoso.** Tese (Doutorado) – Departamento de Eng<sup>a</sup>. Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SANTA CATARINA/GAPLAN. **Programa de Conservação e Recuperação Ambiental da Região Sul de Santa Catarina – Fiorita/Mãe Luzia Correção da Poluição do Sistema Hídrico.** Relatório Técnico: SANTA CATARINA/GAPLAN/FATMA, Criciúma, 1986, p. 108-114.

TEIXEIRA, Eglé N. **Avaliação do potencial poluidor/contaminador de aterros normalizados e proposta de sistemas alternativos de baixo custo visando a minimização do potencial poluidor/contaminador de aterros em vala.** Relatório Técnico: PRO-SAD/UNICAMP, 2001, p. 132-142.

TUCCI, C.E.M. et al. **Drenagem Urbana.** Ed Universidade: UFRGS, Porto Alegre, 1995, p. 37-239.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia – Ciência e Aplicação.** Ed Universidade: UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 1995, p. 177-372.

VIANELLO, R.L. e ALVES, A.R. **Meteorologia Básica e Aplicações.** Ed Universitária: UFV, Viçosa, 1991, p. 163-175.