

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**

**COMPARAÇÃO ENTRE MODELAGEM  
NUMÉRICA E EXPERIMENTO DE CAMPO EM  
ESCALA REAL PARA UM SISTEMA DE  
COBERTURA NA MINA FAZENDA BRASILEIRO  
(BAHIA)**

**Gustavo Lourenço Amorim Silva**

**Belo Horizonte**

**2014**

**Gustavo Lourenço Amorim Silva**

**COMPARAÇÃO ENTRE MODELAGEM NUMÉRICA E  
EXPERIMENTO DE CAMPO EM ESCALA REAL PARA  
UM SISTEMA DE COBERTURA NA MINA FAZENDA  
BRASILEIRO (BAHIA)**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: (Geotecnia)

Orientador: Lúcio Flávio de Souza Villar

Coorientador: Roberto Francisco de Azevedo

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2014

S586c

Silva, Gustavo Lourenço Amorim.

Comparação entre modelagem numérica e experimento de campo em escala real para um sistema de cobertura na Mina Fazenda Brasileiro (Bahia) [manuscrito] / Gustavo Lourenço Amorim Silva. – 2014.  
xvi, 90 f., enc.: il.

Orientador: Lúcio Flávio de Souza Villar.

Coorientador: Roberto Francisco Azevedo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.85-90.

Bibliografia: f. 78-84.

1. Mecânica do solo - Teses. 2. Evapotranspiração - Teses. 3. Lisímetro – Teses. I. Villar, Lúcio Flávio de Souza. II. Azevedo, Roberto Francisco de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624.13(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES



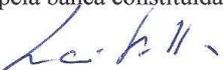
## FOLHA DE APROVAÇÃO

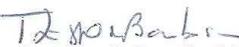
**COMPARAÇÃO ENTRE MODELAGEM NUMÉRICA E  
EXPERIMENTO DE CAMPO EM ESCALA REAL PARA UM SISTEMA  
DE COBERTURA NA MINA FAZENDA BRASILEIRO (BAHIA)**

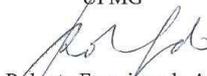
**GUSTAVO LOURENÇO AMORIM SILVA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 05 de junho de 2014, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof. Lúcio Flávio de Sousa Villar - Orientador  
UFMG

  
Profa. Terezinha de Jesus Espósito Barbosa  
UFMG

  
Prof. Roberto Francisco de Azevedo  
UFV

  
Profa. Izabel Christina Duarte Azevedo  
UFV

Belo Horizonte, 5 de junho de 2014.

## DEDICATÓRIA

À Deus,

Aos meus pais Ney e Amélia,

À minha noiva Lorena,

Às minhas irmãs Izabela e Raquel.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Ney Amorim Silva e Amélia Carmem Lourenço A. Silva que me ensinaram os valores da vida, me apoiam em minhas decisões e sempre se dedicaram muito à mim e minhas irmãs. Em especial ao meu pai por ter me inspirado a cursar engenharia civil.

A Lorena pela dedicação, amor, por ter me incentivado todos os dias nos estudos e que fez os meus dias mais duros parecerem tranquilos e agradáveis.

Ao professor Roberto Azevedo que além de ter passado muitos ensinamentos e ter grande participação nessa dissertação se tornou um grande amigo.

Ao professor Lúcio pela compreensão em momentos difíceis passados durante o curso de pós-graduação e pelos conselhos e conhecimentos transmitidos.

Ao Ney Rosário Amorim, que além de primo e amigo me motivou a estudar e foi o responsável pela minha transição para a geotecnia.

Ao Gil França, pela ajuda nas modelagens numéricas e discussões técnicas, além da amizade diária na Geoestável.

Ao Lineker, pela ajuda na calibração dos instrumentos em laboratório e pela amizade.

Ao Carlos Lima pelo auxílio nos desenhos e pela amizade.

Aos professores e colegas do programa de pós-graduação da UFMG do departamento de geotecnia pelas aulas ministradas e pelos grupos de estudos.

A Geoestável que possibilitou meu contato com o tema e permitiu que eu conciliasse os estudos com meu trabalho.

A Yamana Gold que se preocupou com os aspectos ambientais de fechamento de mina e financiou a construção dos experimentos.

Ao Leonardo Bissacot e José Anselmo da Yamana que participaram das decisões técnicas durante o dimensionamento das coberturas e disponibilizaram os dados para elaboração dessa dissertação.

## RESUMO

O fechamento de empreendimentos minerários é um tema recente, principalmente no Brasil, onde as discussões nesse sentido começaram no início dessa década. Na maioria dos casos, os resíduos de mineração são dispostos em superfície, mais especificamente reservatórios formados por barragens ou diques (rejeito) e pilhas de estéril, sendo essencial o conhecimento e domínio de sistemas de cobertura destes resíduos para minimizar os impactos ambientais. Nesse contexto, foram construídos experimentos de campo em escala real (lisímetros) de sistemas de coberturas com o objetivo de cobrir um reservatório de rejeito. O experimento foi instalado na Mineração Fazenda Brasileiro (MFB), de propriedade da empresa Yamana Gold, localizada nas proximidades do município de Teofilândia, no estado da Bahia. A mina se dedica à produção de ouro a partir da lavra subterrânea de minério sulfetado e da lavra a céu aberto de minério oxidado. O sistema de disposição de rejeitos se encontra em operação desde 1988 e é composto por um conjunto de barramentos que formam lagos sequenciados. Foram concebidas soluções distintas de cobertura para serem simuladas em lisímetros e posteriormente avaliadas e validadas durante um período de monitoramento de pouco mais de um ano. Os sistemas experimentais de cobertura com solo são do tipo evapotranspirativos com associação de barreira capilar. Durante a etapa de dimensionamento das coberturas dos experimentos, os materiais utilizados foram caracterizados em laboratório e foram realizadas análises de fluxo de umidade e percolação por meio de modelagem numérica em solos não saturados com o auxílio do software VADOSE/W. O monitoramento do experimento foi realizado por meio de sensores de umidade instalados na cobertura e no rejeito e de medidor de vazão da água percolada pela cobertura. Ao final do período de monitoramento, os dados medidos foram comparados àqueles obtidos com a modelagem numérica e, posteriormente, o modelo foi adequado de modo a obter resultados semelhantes aos medidos em campo.

Palavras Chaves: sistemas de cobertura com solo, coberturas evapotranspirativas, lisímetros, fechamento de mina, análise numérica

## ABSTRACT

The concern about the closure of mines after the end of their activities is recent in Brazil, where discussions about this subject began only some years ago. Here, in most cases, the mining wastes are disposed in mud form inside reservoirs formed by dams or dikes constructed using the mining tailings themselves. A well-designed cover system constructed over the tailings at the end of the reservoir life is essential to minimize environmental impacts. In this research, field experiments were performed simulating different cover systems for a mining waste reservoir. The experiment was installed at Mina Fazenda Brasileiro (MFB), located near the city of Teofilândia in the state of Bahia, Brazil. This company explores gold from both underground and open-pit mining operations. The tailings disposal system has been operating since 1988 and consists of a set of dams forming sequential lakes. Different cover systems were designed and placed over the lysimeters especially constructed for these experiments in real scale and filled with mining wastes. These lysimeters were instrumented and monitored during approximately a year. The experimental cover system was composed by one evapotranspirative layer placed over a capillary barrier layer. The thickness and position of these layers varied from lysimeter to lysimeter. The geotechnical properties of the materials used to construct the cover systems were measured in laboratory. Volumetric water content sensors were fixed inside the cover layers and tailings and the volume of fluid percolated through the lysimeter was also measured. The analysis of the water flow through the cover system and the lysimeter were performed by the software Vadose/W. The data measured from the field experiments were compared to those of the numerical modeling allowing the adjustment of the parameters used by the model. It was possible to compare different designs of cover systems to verify the most efficient one.

Key words: *soil cover systems, evapotranspirative covers, lysimeter, mine closure, numerical modelin*

# SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE GRÁFICOS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 <i>Objetivos</i> .....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 <i>Introdução</i> .....	3
2.2 <i>Drenagem Ácida de Mina</i> .....	3
2.2.1 <i>Métodos de Investigação do Potencial de Geração de DAM</i> .....	6
2.2.2 <i>Remediação de DAM</i> .....	6
2.3 <i>Pilhas de Lixiviação (Heap Leach)</i> .....	8
2.4 <i>Sistemas de Cobertura</i> .....	9
2.5 <i>Tipos de Cobertura</i> .....	9
2.5.1 <i>Coberturas Prescritivas</i> .....	10
2.5.2 <i>Coberturas Evapotranspirativas (ET)</i> .....	11
2.6 <i>Experimento de Campo x Equivalência Hidráulica</i> .....	16
2.7 <i>Metodologias para Dimensionamento de Coberturas</i> .....	16
2.7.1 <i>Seleção de Critério de Desempenho</i> .....	16
2.7.2 <i>Dimensionamento Preliminar</i> .....	17
2.7.3 <i>Caracterização do Local</i> .....	17
2.7.4 <i>Análise de Sensibilidade a Partir da Modelagem Numérica</i> .....	19
2.7.5 <i>Projeto Final</i> .....	20
2.8 <i>Modelagem Numérica de Coberturas</i> .....	22

2.9	<i>Conceitos Básicos da Mecânica dos Solos Não Saturados</i> .....	23
2.9.1	Fases do Solo.....	24
2.9.2	Sucção.....	25
2.9.3	Curva de Retenção de Umidade do Solo ou Curva Característica .....	26
2.9.4	Métodos Para Medir a Sucção .....	28
2.9.5	Ajuste dos Pontos Obtidos em Ensaio.....	30
2.9.6	Função de Permeabilidade Não Saturada.....	33
2.9.7	Fluxo de Calor .....	34
2.9.8	Fluxo de Umidade em Solo Não Saturado .....	35
2.9.9	Cálculo de Evaporação e Transpiração .....	37
3	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	39
	3.1 <i>Reconhecimento das Características Locais e Caracterização da Área de</i> <i>Estudo</i>	40
3.1.1	Materiais Disponíveis.....	41
3.1.2	Clima .....	45
3.1.3	Vegetação .....	45
3.2	<i>Modelagem Numérica Preliminar</i> .....	46
3.2.1	Dados Climáticos.....	47
3.2.2	Dados Relacionados à Vegetação.....	47
3.2.3	Propriedade dos Materiais .....	47
3.2.4	Modelagem da geometria e Condições de Contorno.....	48
3.3	<i>Concepção de Experimento de Campo em Escala Real</i> .....	49
3.3.1	Apresentação dos Experimentos.....	49
3.3.2	Instrumentação .....	52
3.3.3	Construção do Experimento .....	56
3.3.4	Calibração dos Sensores de Umidade.....	59
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	64
4.1	<i>Resultados Obtidos Pelos Sensores de Umidade</i> .....	64

4.1.1	Comparação entre lisímetros por meio da variação da umidade.....	65
4.2	- <i>Resultados Obtidos pelos Medidores de Vazão</i> .....	68
4.3	<i>Comparação da Modelagem Numérica com dados de campo</i> .....	70
4.3.1	Adequação do modelo numérico.....	71
4.3.2	Comparação da vazão de percolação.....	74
5	CONCLUSÕES .....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
	ANEXO.....	85

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$P_t$	Percolação pela cobertura
$P$	Precipitação
$R$	Escoamento superficial
$S$	Armazenamento de água no perfil da cobertura
$T$	Transpiração
$L$	Drenagem lateral
$S_t$	Sucção total
$S_o$	Sucção osmótica
$S_m$	Sucção mátrica
$a$	Parâmetros de ajustes para curvas de sucção
$n$	Parâmetros de ajustes para curvas de sucção
$m$	Parâmetros de ajustes para curvas de sucção
$W$	Umidade gravimétrica do solo
$W_s$	Umidade gravimétrica referente à saturação
$S_p$	Inclinação da curva tangente à curva característica
$s$	Inclinação da linha tangente à função que passa pelo ponto de inflexão
$K_{sat}$	Coefficiente de permeabilidade saturada
$L_v$	Calor latente de vaporização
$J$	Fluxo de acordo com a lei de Fick
$D$	Coefficiente de difusão
$n'$	Gradiente de concentração

$V_w$	Volume de água que atravessa unidade de área
$K_w$	Coefficiente de permeabilidade como função de sucção mátrica
$U_a$	Pressão de ar nos poros
$U_w$	Pressão de água nos poros
$D_v$	Coefficiente de difusão de calor
$g$	Aceleração da gravidade
$m_2^w$	Inclinação da curva de retenção de umidade
$P'$	Pressão de ar na fase gás
$C_v \gamma_s$	Calor específico volumétrico
$E$	Evaporação
$U_a$	Velocidade do vento
$e_a$	Pressão de vapor do ar acima da superfície do solo
$h_r$	Umidade relativa na superfície do solo
$h_a$	Umidade relativa do ar
$T_r$	Transpiração real
$R_t$	Espessura total da zona da raiz
$FPM$	Função referente à capacidade da planta em retirar água do solo em função da sucção

## Letras Gregas

$\Phi_t$	Potencial total de sucção
$\Phi_o$	Potencial osmótico ou de soluto
$\Phi_m$	Potencial mátrico
$\Phi_g$	Potencial gravitacional
$\Phi_a$	Potencial pneumático
$\Phi_p$	Potencial de adensamento
$\theta_r$	Umidade volumétrica residual
$\psi$	Sucção
$\theta_s$	Umidade volumétrica de saturação
$\psi_p$	Valor que a tangente da curva característica corta o eixo de sucção
$\psi_r$	Sucção correspondente ao valor de umidade residual
$\psi_i$	Valor de sucção no ponto de inflexão da curva característica
$\theta_i$	Umidade volumétrica no ponto inicial
$\lambda$	Condutividade térmica
$\gamma_w$	Massa específica da água

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- PRINCIPAIS MEDIDAS PARA PREVENIR DAM .....	7
FIGURA 2.2 - MEDIDAS DE REMEDIAÇÃO (ADAPTADO DE JOHNSON; HALLBERG, 2005) .....	7
FIGURA 2.3 - ESQUEMA TÍPICO DE EXTRAÇÃO DE OURO A PARTIR DE LIXIVIAÇÃO DE PILHAS.....	8
FIGURA 2.4 - PERFIL TÍPICO DE UMA COBERTURA EVAPOTRANSPIRATIVA.....	13
FIGURA 2.5 - SISTEMAS DE COBERTURA ET MONOLÍTICA E COM BARREIRA CAPILAR .....	14
FIGURA 2.6 - ESQUEMA DE PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE MATERIAIS DE UMA COBERTURA ET TÍPICA.....	14
FIGURA 2.7 - COBERTURAS E TIPOS CLIMÁTICOS (ADAPTADO DE INAP, 2014) .....	18
FIGURA 2.8 - SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES PROPOSTAS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE COBERTURA (JUNQUEIRA ET. AL., 2011).....	21
FIGURA 2.9 - ELEMENTO DE SOLO NÃO SATURADO (ADAPTADO DE FREDLUND; MOGENSTERN, 1977) .....	24
FIGURA 2.10 - EXEMPLO DE UMA CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO (GUIZELINI, 2011)....	27
FIGURA 2.11 - CURVAS DE RETENÇÃO DE UMIDADE TÍPICAS PARA AREIAS, SILTES E ARGILAS (ADAPTADO DE FREDLUND ET. AL, 1994).....	28
FIGURA 2.12 - CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA O PAPEL FILTRO WHATMAN Nº 42 (MONCADA, 2004).	29
FIGURA 2.13- PROCEDIMENTOS GRÁFICOS PARA OBTER OS PARÂMETROS A, N, M E $\psi_r$ (ADAPTADO DE FREDLUND;XING, 1994).....	32
FIGURA 3.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DO EXPERIMENTO (ADAPTADO DE BAIXAR MAPAS, 2013).....	39
FIGURA 3.2 - LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E DO RESERVATÓRIO DE REJEITOS. (ADAPTADO DO GOOGLE EARTH MAPAS, 2014).....	40
FIGURA 3.3 - MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DA MODELAGEM NUMÉRICA COM NÓS REPRESENTADOS COMO PONTOS VERMELHOS.....	48
FIGURA 3.4 - VARIAÇÃO DA UMIDADE NA COBERTURA DURANTE A SIMULAÇÃO DO ANO DE 2010...	49
FIGURA 3.5 - ESQUEMA DO EXPERIMENTO .....	50
FIGURA 3.6 - SEÇÃO TRANSVERSAL E PERFIS ESQUEMÁTICOS DOS LISÍMETROS. ....	50
FIGURA 3.7 - PERFIL ESQUEMÁTICO CONTEMPLANDO AS CAMADAS DO LISÍMETRO 01.....	51
FIGURA 3.8 - PERFIS ESQUEMÁTICOS DOS LISÍMETROS 02 E 03.....	52
FIGURA 3.9 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO LISÍMETRO 3.....	52
FIGURA 3.10 - SENSOR DE UMIDADE WCR. (ADAPTADO DE CAMPBELL SCIENTIFIC INC, 2014).....	53
FIGURA 3.11 - DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES DE UMIDADE EM CADA COLUNA.....	54
FIGURA 3.12 - INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO DE PEQUENAS VAZÕES - TIPPING BUCKET (ADAPTADO DE HYDROLOGICAL SERVICES, 2012).....	55
FIGURA 3.13 - SISTEMA DE MEDIDOR DE VAZÃO PARA DRENAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.	55
FIGURA 3.14 - ESCAVAÇÃO DE BACIA .....	56
FIGURA 3.15 - IMPERMEABILIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS COM GEOMEMBRANA. ....	57

FIGURA 3.16 - DETALHES DE INSTALAÇÃO DA GEOMEMBRANA ENTRE A BARREIRA CAPILAR E O REJEITO.....	57
FIGURA 3.17 - INSTALAÇÃO DOS SENSORES DE UMIDADE.....	58
FIGURA 3.18 - VISTA GERAL DOS EXPERIMENTOS.....	59
FIGURA 3.19 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	60

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO “HEAP LEACH” .....	43
GRÁFICO 3.2 - CURVA DE COMPACTAÇÃO DO “HEAP LEACH” .....	43
GRÁFICO 3.3 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO REJEITO.....	43
GRÁFICO 3.4 - CURVA DE COMPACTAÇÃO DO REJEITO. ....	44
GRÁFICO 3.5 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS, CURVAS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E RETENÇÃO DE ÁGUA DO “HEAP LEACH”. ....	44
GRÁFICO 3.6 - RESULTADO DOS ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS, CURVAS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E RETENÇÃO DE ÁGUA DO REJEITO.....	44
GRÁFICO 3.7 - PLUVIOMETRIA E EVAPORAÇÃO REGISTRADAS NO ANO DE 2010 NA ESTAÇÃO DA MFB. .....	45
GRÁFICO 3.8 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DE UM SENSOR PARA O REJEITO. ....	60
GRÁFICO 3.9 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DE UM SENSOR PARA O “HEAP LEACH” .....	61
GRÁFICO 3.10 - CALIBRAÇÃO DE CAMPO X CALIBRAÇÃO DE LABORATÓRIO. ....	63
GRÁFICO 4.1 - VARIAÇÃO DE UMIDADE DOS SENSORES INSTALADOS NO LISÍMETRO 02 A UMA PROFUNDIDADE DE 25 CM ABAIXO DA SUPERFÍCIE.....	64
GRÁFICO 4.2 - VARIAÇÃO DE UMIDADE DOS SENSORES INSTALADOS NO LISÍMETRO 03 A UMA PROFUNDIDADE DE 5CM ABAIXO DA SUPERFÍCIE.....	65
GRÁFICO 4.3 -VARIAÇÃO NA UMIDADE NOS SENSORES INSTALADOS NA PORÇÃO SUPERIOR DA CAMADA DE REJEITO NO LISÍMETRO 02. ....	65
GRÁFICO 4.4 - COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE DOS SENSORES INSTALADOS 5CM ABAIXO DA SUPERFÍCIE NOS LISÍMETROS 02 E 03.....	66
GRÁFICO 4.5 - COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE DOS SENSORES INSTALADOS 15CM ABAIXO DA SUPERFÍCIE NOS LISÍMETROS 02 E 03. ....	66
GRÁFICO 4.6 - COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE DOS SENSORES INSTALADOS 25CM ABAIXO DA SUPERFÍCIE NOS LISÍMETROS 02 E 03. ....	66
GRÁFICO 4.7 - COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE DOS SENSORES INSTALADOS 35CM ABAIXO DA SUPERFÍCIE NOS LISÍMETROS 02 E 03. ....	67
GRÁFICO 4.8 - COMPARAÇÃO DA VARIAÇÃO DA CAMADA MAIS PROFUNDA DO HEAP LEACH DOS TRÊS LISÍMETROS. ....	67
GRÁFICO 4.9 - ESCOAMENTO SUPERFICIAL MEDIDO NO LISÍMETRO 01 .....	69
GRÁFICO 4.10 - ESCOAMENTO SUPERFICIAL MEDIDO NO LISÍMETRO 02 .....	69
GRÁFICO 4.11 - ESCOAMENTO SUPERFICIAL MEDIDO NO LISÍMETRO 03 .....	69
GRÁFICO 4.12 - VALORES DA MODELAGEM NUMÉRICA COMPARADOS AOS MEDIDOS EM CAMPO PARA SENSORES INSTALADOS NO “HEAP LEACH” DO LISÍMETRO 02.....	71
GRÁFICO 4.13 - VALORES DA MODELAGEM NUMÉRICA COMPARADOS AOS MEDIDOS EM CAMPO PARA SENSORES INSTALADOS NO REJEITO DO LISÍMETRO 02.....	71

GRÁFICO 4.14 - COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS DE RETENÇÃO OBTIDA EM LABORATÓRIO E ADEQUADA. ....	72
GRÁFICO 4.15 - APRESENTAÇÃO DA UMIDADE CORRESPONDENTE PARA SUCCÃO DE 200KPA. ....	73
GRÁFICO 4.16 - VARIAÇÕES DE UMIDADE MODELADAS PARA UM PONTO DO “HEAP LEACH” E DO REJEITO. ....	73
GRÁFICO 4.17 - COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÕES DE CAMPO E MODELAGEM NUMÉRICA ADEQUADA PARA SENSORES INSTALADOS NO REJEITO DO LISÍMETRO 02. ....	74
GRÁFICO 4.18 - COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÕES DE CAMPO E MODELAGEM NUMÉRICA ADEQUADA PARA SENSORES INSTALADOS NO REJEITO DO LISÍMETRO 02. ....	74
GRÁFICO 4.19 - FLUXO DE ÁGUA QUE ATRAVESSA A SUPERFÍCIE DA COBERTURA. ....	75
GRÁFICO 4.20 - FLUXO DE ÁGUA QUE ATRAVESSA A INTERFACE COBERTURA/REJEITO. ....	75

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1- LISTA DE ALGUNS DOS PRINCIPAIS MINERAIS SULFETADOS ASSOCIADOS À DAM (FERGUSON; ERICSON, APUD EPA, 1994).....	4
TABELA 2.2- MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO DA SUCÇÃO .....	28
TABELA 2.3 - RESUMO DE ALGUMAS DAS EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA AJUSTE DE CURVAS DE SUCÇÃO (MONCADA, 2004) .....	30
TABELA 2.4 - MODELOS PARA FUNÇÃO DE PERMEABILIDADE NÃO SATURADA (DIAS, 2012).....	34
TABELA 3.1 -RESUMO DA CARACTERIZAÇÃO E ENSAIO DE COMPACTAÇÃO .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETG	Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
MFB	Mineração Fazenda Brasileiro
DAM	Drenagem Ácida de Mina
WCR	Water Content Reflectometer
RPM	Rio Paracatu Mineração
DAR	Drenagem Ácida de Rochas
APP	Acid Production Potential ou potencial máximo de produção de ácido
NP	Neutralization Potential ou potencial máximo de neutralização
ABA	Acid-Base Accounting - Ensaio estático para prever potencial de DAM
MABA	Modified ABA - Ensaio ABA modificado
NAG	Net Acid Generation - Ensaio estático para prever potencial de DAM
SNAG	Sequential NAG - Ensaio estático para prever potencial de DAM baseado no NAG
KNAG	Kinect NAG - Ensaio estático para prever potencial de DAM baseado no NAG
ABCC	Acid buffering Characteristics Curve - Ensaio para prever potencial de DAM
CRUS	Curva de Retenção de Umidade do Solo
ET	Evapotranspirativa
CP	Corpo de Prova

# 1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora está presente no cotidiano da sociedade, muitas vezes indiretamente, por meio do fornecimento de recursos essenciais para o desenvolvimento da qualidade de vida da humanidade em diversos setores como alimentício, transporte, energia, construção civil, indústria de eletrodomésticos, etc. A população tem pouca consciência de que construções, veículos e até mesmo os alimentos são constituídos por produtos da mineração ou são dependentes dos mesmos durante seu processo de produção. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2005), cada cidadão brasileiro consome anualmente 264 kg de minério de ferro; cerca de 56 kg de aço; 2,68 kg de alumínio; 166 kg de cimento; 1,29 kg de cobre, 37 kg de fertilizantes (fosfato, enxofre e potássio); e mais cerca de 22 kg de outros metais, além de algumas toneladas de brita, areia, argila, etc.

Apesar de todos os benefícios e avanços que a atividade mineradora traz à sociedade, a maior parte do material mineral explorado é transformada em resíduo, estéril e/ou rejeito. Estéril é a designação do material escavado que não contém o mineral desejado ou o contém porém em quantidade insuficiente para viabilizar sua exploração econômica. Em alguns casos, como em mineração de cobre e ouro, os rejeitos podem representar mais de 99% do minério (AMORIM, 2008).

Dentre os impactos ambientais causados pela mineração, sem dúvida destaca-se a drenagem ácida de mina (DAM). Atualmente, a DAM tem atraído o foco de atenção dos gestores ambientais das minas que possuem minerais sulfetados na composição dos seus minérios, rejeitos e resíduos, devido aos problemas ambientais de longo prazo provocados pela alteração química que ocorre nesse tipo de ambiente. Dada a gravidade dos efeitos da DAM, em minerações em que existem minerais sulfetados deve-se procurar isolar a superfície dos estéreis e/ou rejeitos de tal forma a evitar ou minimizar o contato dos minerais com o oxigênio e água. Uma das soluções mais usuais para executar o isolamento é realizada por meio da execução de coberturas construídas com solos.

O experimento de campo monitorado e analisado nessa dissertação foi construído em uma área da Mineração Fazenda Brasileiro (MFB), de propriedade da Yamana Gold, localizada no município de Teofilândia no estado da Bahia, que se dedica à produção de ouro a partir da lavra subterrânea de minério sulfetado e da lavra a céu aberto de minério oxidado. O sistema de disposição de resíduos da Usina Hidrometalúrgica da Mina de Ouro da Mineração Fazenda Brasileiro se encontra em operação desde 1988. O sistema atual compreende um conjunto de barramentos do vale, com a formação de lagos sequenciados, destinados à disposição de rejeitos (montante para jusante): Dique

de Desvio, Lago III, Dique III, Lago I, Dique I, Lago II, Dique II, Reservatório de Segurança e Dique de Segurança.

Esses rejeitos possuem compostos químicos em sua composição que requerem isolamento das condições atmosféricas e de contato com a água de forma a prevenir potenciais impactos nas áreas de entorno do reservatório. Para evitar o contato do rejeito com o meio ambiente, foi elaborado um projeto de cobertura. Para validar o dimensionamento proposto, foram construídos experimentos de campo em que se procurou simular coberturas de rejeito nas mesmas condições propostas pelo projeto. Os experimentos, chamados de lisímetros, tiveram por objetivo simular duas hipóteses distintas de coberturas evapotranspirativas associadas à barreira capilar.

### ***1.1 Objetivos***

Os principais objetivos deste trabalho foram os de construir e monitorar experimentos de campo em que se procurou simular sistemas de coberturas de rejeito para fechamento de reservatórios nas mesmas condições propostas em projeto. Com isso, seria possível estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos via modelagem numérica com auxílio do software VADOSE/W e as variações medidas nos experimentos de campo em escala real, durante o período de um ano.

Os objetivos específicos foram:

- Propor uma metodologia para construção de experimento de campo em escala real de sistemas de cobertura para reservatórios de rejeitos e como instrumentá-los.
- Propor uma metodologia para calibração de sensores de umidade (WCR - Water Content Reflectometer) em laboratório e em campo;
- Avaliar a funcionalidade e eficiência dos sistemas de cobertura propostos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Introdução*

O dimensionamento de experimentos de campo em escala real de sistemas de cobertura é recomendado por algumas metodologias adotadas em todo mundo. O'Kane e Barbour (2003) apontam que, geralmente, os lisímetros são utilizados para medir a percolação através da cobertura e na sua interface com o rejeito. Em diversos países, lisímetros foram testados e aprimorados (EUA, Canadá, Austrália, Peru) e precisam ser testados para os nossos solos tropicais nos diferentes climas existentes no Brasil.

Alguns estudos realizados para sistemas de cobertura foram desenvolvidos mais recentemente no Brasil. Gallato (2006) analisa a eficiência de coberturas secas para rejeitos de carvão mineral por meio de experimentos (lisímetros) em laboratório e em campo. Amorim (2008) avalia o desempenho de sistemas de cobertura para o caso específico da Mina Rio Paracatu Mineração (RPM), na cidade de Paracatu, MG a partir da montagem de um experimento de campo. Ribeiro (2011) desenvolveu a calibração e modelagem numérica do experimento da RPM construído por Amorim (2008). Duarte (2012) discute a respeito da influência dos parâmetros e das metodologias utilizadas no dimensionamento e no desempenho das coberturas.

Sistemas de coberturas executados com geotexteis ou solo são tecnologias utilizadas como solução para o fechamento de reservatórios de rejeito e estéril. No presente capítulo é apresentada uma breve revisão de sistemas de cobertura construídos com solo, metodologias para dimensionamento, e modelagem numérica.

### 2.2 *Drenagem Ácida de Mina*

A drenagem ácida de mina (DAM) tem atraído o foco de atenção dos gestores ambientais das minas que possuem minerais sulfetados na composição dos seus minérios, devido ao conhecimento dos problemas ambientais de longo prazo provocados pela alteração química que ocorre nesse tipo de ambiente. Conceitualmente, o termo Drenagem Ácida de Minas é utilizado para descrever a drenagem que é afetada pela oxidação de minerais sulfetados quando expostos à presença de oxigênio e água. Essa combinação dos três componentes ao mesmo tempo (sulfetos + água + oxigênio) é responsável pela geração de drenagem ácida de mina, com baixo pH e liberação de metais.

Conforme citado por Jennings et. al (2008), a drenagem ácida de rochas (DAR) é uma reação química natural, que pode ocorrer quando os minerais são expostas ao ar e a água. Drenagem ácida

é encontrada em todo o mundo, tanto como resultado de processos naturais como em atividades associadas com distúrbios no solo, tais como a construção de rodovias e mineração, onde os minerais formadores de ácidos são expostos na superfície da terra. Estas condições ácidas podem causar a dissolução de metais, o que pode levar ao comprometimento da qualidade da água.

A DAR pode ser potencializada através de processos de mineração e moagem, devido ao aumento da área de superfície exposta das rochas, permitindo excesso de geração de ácido além das capacidades de tamponamento naturais encontradas na rocha intacta e água. A drenagem ácida potencializada pelos processos de mineração é denominada Drenagem Ácida de Mina (DAM). A acidificação da água pode levar à liberação de poluentes de áreas de mineração que podem conter níveis relativamente elevados de substâncias tóxicas, como cianeto, sulfato e metais pesados potencialmente tóxicos (por exemplo, Pb, Zn, Cu, Cd, Fe, Mn e Al), que podem representar impactos adversos de longo prazo nos animais, na saúde humana e nos ecossistemas (CHOTPANTARAT., 2011).

A *U.S Environmental Protection Agency* (EPA, 1994) identifica que o potencial para uma mina produzir ácido e liberar contaminantes depende basicamente de três fatores:

- disponibilidade de água, oxigênio, íons férricos e bactérias para catalisar as reações de oxidação;
- neutralização do ácido produzido;
- hidrologia local, geologia e tipo de tecnologia minerária empregada.

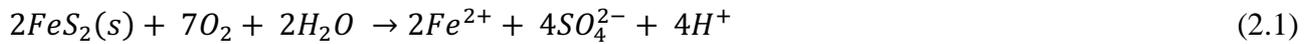
Alguns dos principais minerais envolvidos em processos sulfetados associados à formação de DAM estão listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Lista de alguns dos principais minerais sulfetados associados à DAM (FERGUSON; ERICSON, apud EPA, 1994)

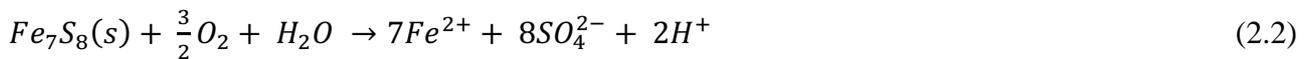
<b>Mineral</b>	<b>Composição química</b>
Pirita	FeS <sub>2</sub>
Marcasita	FeS <sub>2</sub>
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>
Calconita	Cu <sub>2</sub> S
Esfalerita	ZnS
Galena	PbS
Milerita	NiS
Pirrotita	Fe <sub>11</sub> S <sub>12</sub>
Arsenopirita	FeS <sub>2</sub> .FeAs
Cinabarita	HgS

As reações responsáveis pela produção da drenagem ácida de minas para a pirita podem ser expressas pelas equações estequiométricas 2.1 a 2.5 apresentadas a seguir conforme apresentado em EPA (1994):

Oxidação da pirita:



Oxidação da Pirrotita:



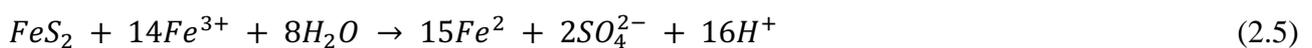
Oxidação do Ferro:



Precipitação do ferro:



Dissolução da Pirita pelo íon  $Fe^{3+}$ :



A oxidação da pirita é apresentada pela equação (2.1). Segundo EPA (1994), a equação (2.2) de oxidação do ferro depende do valor do pH, sendo que para baixos valores de pH, a reação ocorre mais lentamente, podendo também ser catalisada por bactérias. A precipitação do ferro, como mostra a equação (2.3), acontece devido ao fato de este elemento não se manter em solução com pH acima de 3. A dissolução da pirita pelo íon  $Fe^{3+}$ , equação (2.4), juntamente com a oxidação do ferro, equação (2.3), constituem o ciclo de dissolução da pirita.

Conforme pode ser observado nas equações (2.1) a (2.4), a oxidação de minerais sulfetados e a produção da DAM ocorrem devido à presença de dois constituintes básicos obrigatórios: oxigênio e água. O principal componente responsável pela oxidação dos sulfetos metálicos é o oxigênio

gasoso. A água de chuva, em abundância, é a responsável pela formação da drenagem ácida, através da solubilização dos produtos da oxidação. Para efeito de controle da drenagem ácida, alternativas são construídas de forma a minimizar a entrada de oxigênio e água de chuva para dentro do material reativo.

### **2.2.1 Métodos de Investigação do Potencial de Geração de DAM**

As metodologias mais utilizadas para verificação do potencial de geração de drenagem ácida são classificadas como testes estáticos ou cinéticos. Chotpantarat (2011) afirma que ensaios estáticos são geralmente mensurados ao longo de um curto período de tempo (horas ou dias) e possuem um custo relativamente baixo. Eles avaliam o equilíbrio entre a geração de ácido e a capacidade de neutralização do ácido de uma amostra. As principais técnicas de previsão de potencial de geração ácida determinam o potencial máximo de produção de ácido da amostra (APP - Acid Production Potential) e o seu potencial máximo de neutralização (NP - Neutralization Potential). Esses ensaios não são utilizados para prever a taxa de geração de ácido e nem de consumo de minerais, mas são utilizados apenas para a previsão de APP. Alguns dos ensaios mais comumente utilizados são o ABA (Acid-Base Accounting), MABA (Modified ABA), NAG (Net Acid Generation), SNAG (Sequential NAG), KNAG (Kinect NAG), ABCC (Acid Buffering Characteristics Curve).

Chotpantarat (2011) conclui que muitas técnicas de testes estáticos foram desenvolvidas, mas decidir qual é a mais adequada requer levar em consideração muitos fatores, incluindo a caracterização geoquímica e mineralógica das amostras coletadas nos sítios. Embora muitas técnicas tenham sido desenvolvidas, nenhuma é ideal ou perfeitamente precisa se utilizada isoladamente, é necessário avaliar cada uma em conjunto com outras de modo a se obter uma estimativa confiável do potencial de geração de ácido de uma amostra.

Os ensaios cinéticos simulam as condições de campo e são realizados por um período maior de tempo, por esse motivo são mais caros. Conforme apresentado por Duarte (2012), no Brasil os procedimentos para obtenção de extrato lixiviado e solubilizado de resíduos sólidos são apresentados, respectivamente, pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e NBR 10.006 (ABNT, 2004c) e os resultados são comparados com os limites apresentados pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

### **2.2.2 Remediação de DAM**

Johnson e Hallberg (2005) ressaltam que é melhor prevenir ou minimizar a formação de DAM do que remediá-la. Os autores resumiram as principais medidas de prevenção de acordo com o esquema apresentado na Figura 2.1.

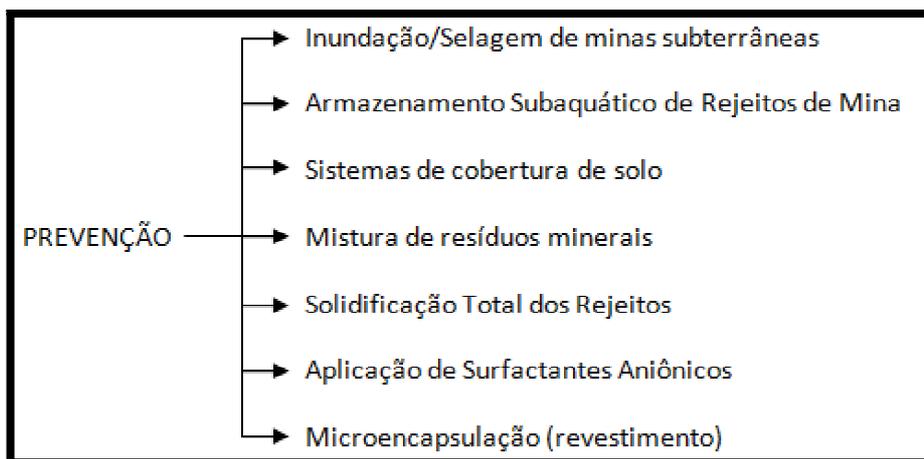


Figura 2.1- Principais medidas para prevenir DAM (adaptado de JOHNSON; HALLBERG, 2005)

Dadas as dificuldades práticas em inibir a formação de drenagem ácida, muitas vezes é preciso remediar a geração ácida. As práticas adotadas são geralmente divididas em "ativas" e "passivas" (Figura 2.2), sendo a primeira normalmente (não somente) relacionada à adição contínua de materiais alcalinos para neutralizar águas de mina ácidas e precipitar metais, e a última, relacionada ao uso de wetlands naturais ou construídas. A tradução de wetland para o português seria pântano, são ecossistemas de áreas úmidas sujeitos a inundações periódicas ou permanentes e na mineração podem ser construídos para tratamento da água. Sistemas passivos têm a vantagem de demandar relativamente menor manutenção (e custos associados) enquanto que sistemas ativos são caros e algumas vezes impraticáveis. Uma subdivisão mais usual para as tecnologias de remediação são aquelas que dependem de atividades biológicas ou de atividades abióticas.

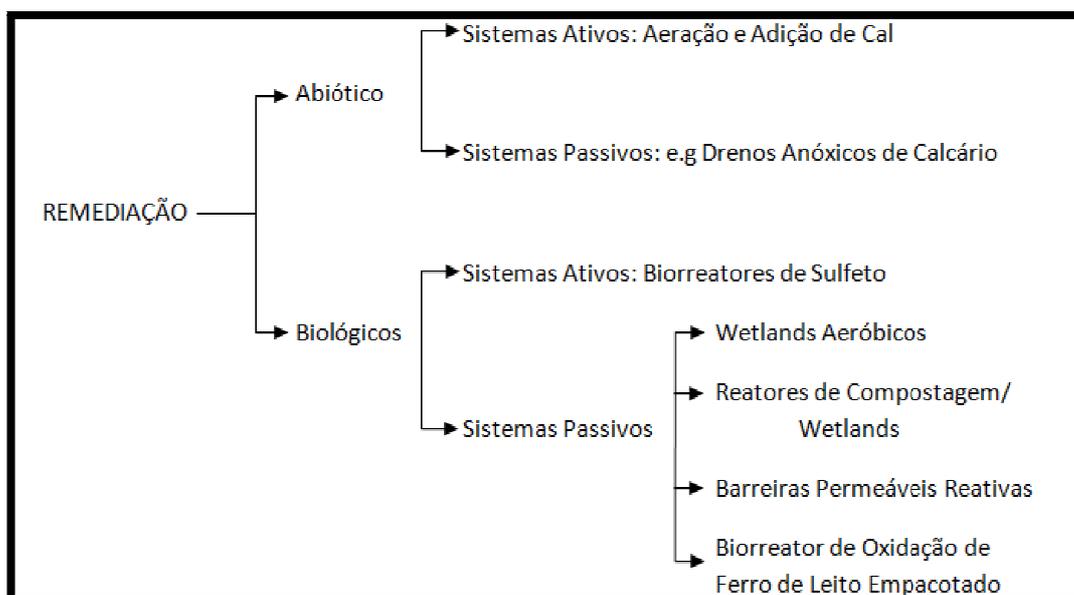


Figura 2.2 - Medidas de Remediação (adaptado de JOHNSON; HALLBERG, 2005)

### 2.3 Pilhas de Lixiviação (Heap Leach)

A lixiviação em pilhas é uma técnica de processamento de minerais usada em minério britado. Nessa técnica a lixiviação ocorre meio de aplicação de soluções químicas que extraem minerais valiosos. Alguns minérios de ouro não possuem teor alto o suficiente para serem economicamente tratados por processos gravíticos (partículas de diferentes densidades são separadas uma da outra por ação da força da gravidade ou força centrípeta), flotação ou tanques de lixiviação, e por isso são encaminhados para a etapa de lixiviação em pilhas. O minério pode ser britado e, em seguida, empilhado e lixiviado ou, após a detonação na mina, o minério é empilhado e lixiviado, sem passar pela etapa de britagem. O processo de lixiviação em pilhas é muito simples de ser executado, porém as suas variáveis operacionais e o cálculo da recuperação do ouro extraído ainda são temas complexos e de difícil compreensão (ROENICK, 2013). Na Figura 2.3 é apresentado de maneira esquemática um sistema de extração de ouro por lixiviação de pilhas.

Para a construção do experimento da presente dissertação, foi utilizado um material proveniente de pilhas de lixiviação desativadas. Esse material foi posteriormente neutralizado quimicamente e, nesta dissertação, foi chamado de “heap leach”.

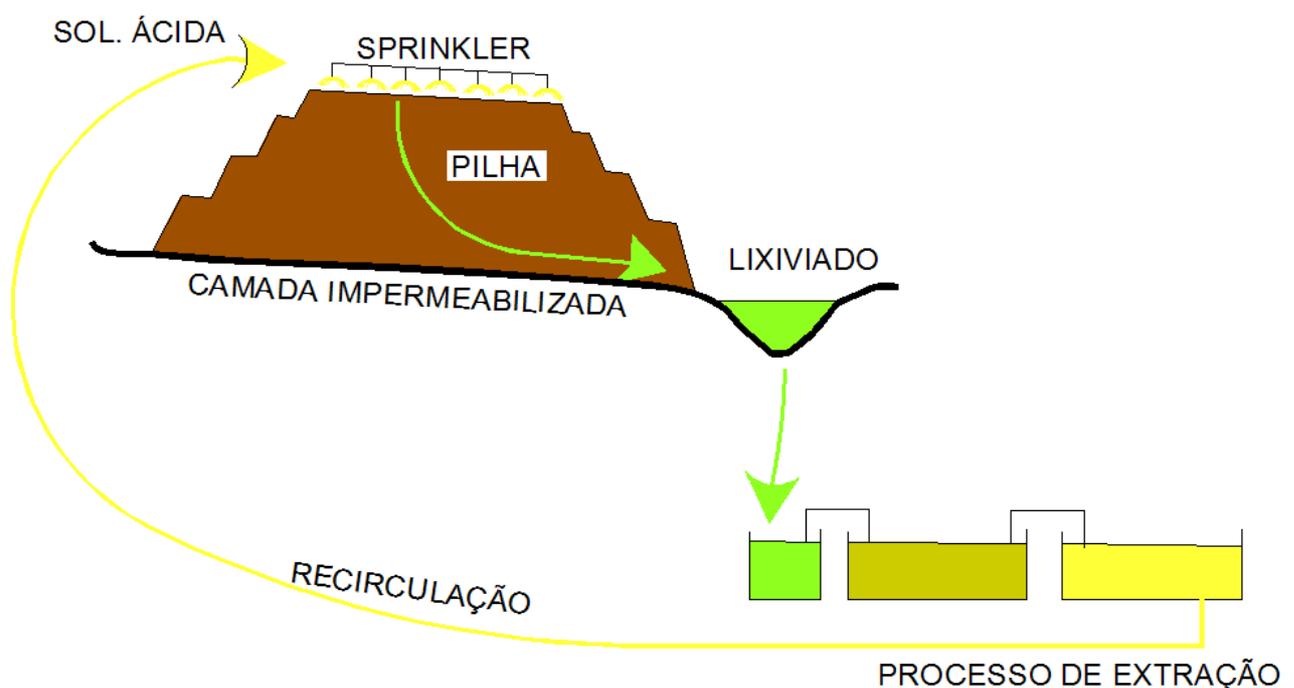


Figura 2.3 - Esquema típico de extração de ouro a partir de lixiviação de pilhas.

## **2.4 *Sistemas de Cobertura***

De acordo com o guia do International Network for Acid Prevention (INAP,2014), coberturas secas são tipicamente feitas com solo, com matéria orgânica ou materiais sintéticos. O termo cobertura "seca" é usado para diferenciar de coberturas úmidas (wet covers), que são aquelas em que o rejeito é coberto por água com o objetivo de reduzir o transporte de oxigênio. Além disso, coberturas secas também podem ser projetadas para fornecer uma zona adequada para a vegetação e reduzir a erosão.

O'kane e Barbour (2003) consideram que os principais objetivos de um sistema de cobertura são de controlar ou limitar o ingresso de oxigênio e água. E que os objetivos secundários podem ser: controle de movimento ascendente por capilaridade da água; reação de inibição (i.e. acrescentar calcário na superfície para reduzir a produção de ácido); consumo de oxigênio em caso de coberturas com materiais orgânicos. Ribeiro (2011) comenta que o uso de solos para a construção de coberturas não é recente, tendo sido estudado por diversos pesquisadores considerando diferentes solos e soluções.

## **2.5 *Tipos de Cobertura***

Conforme apresentado em INAP (2014), as coberturas "secas" podem ser apresentadas de acordo com as seguintes nomenclaturas:

- Coberturas Alcalinas: sistemas de cobertura projetados para liberar alcalinidade às águas de infiltração. A alcalinidade normalmente consiste em carbonatos dissolvidos derivados da dissolução do calcário.
- Coberturas Secas: camadas de revestimento de solo ou materiais sintéticos em contraste a coberturas úmidas.
- Coberturas Orgânicas: coberturas que são formadas por material orgânico que pode atuar como um redutor (doador de elétrons), que podem eliminar ou remover o oxigênio e possivelmente conduzir outras reações de redução, como por exemplo, a redução de sulfato.
- Coberturas com solo: camadas de cobertura construídas com materiais naturais (terra) que podem incluir rochas de mina.
- Coberturas de armazenamento e liberação: sistema de cobertura que é construído para reduzir a infiltração líquida, armazenando umidade durante os períodos de precipitação mais elevados e liberando umidade via evapotranspiração em períodos secos.
- Neutralização com sulfeto: material de cobertura que pode conter sulfetos minerais com excesso de potencial de neutralização para evitar a produção de ácido. Essa camada pode consumir o oxigênio e evitar um maior ingresso de mais oxigênio.

- Coberturas sintéticas: sistemas construídos com camadas sintéticas, como geossintéticos, diferentes tipos de plásticos ou betume.

Segundo Amorim (2008), os sistemas de cobertura com solo podem ser divididos em dois tipos principais: prescritivas (ou convencionais) ou evapotranspirativos (ou alternativos).

### 2.5.1 Coberturas Prescritivas

As coberturas prescritivas ou convencionais utilizam camadas com baixa condutividade hidráulica para minimizar a infiltração de água e são compostas por duas camadas principais:

- A camada superior (de proteção ou “top soil”), que fica em contato com a superfície, tem as funções de controlar a erosão na superfície e fixar a vegetação. Por isso, é normalmente executada com solo orgânico;
- A camada denominada "barreira hidráulica", sobreposta à camada superior, apresenta baixa condutividade hidráulica e tem a função de minimizar a infiltração de água.

Eventualmente, são inseridas camadas de drenagem de líquidos entre a barreira hidráulica e a camada de proteção e, algumas vezes, quando existe preocupação com produção gasosa dos resíduos, também são inseridas camadas de drenagem gasosa abaixo da barreira hidráulica. A camada de drenagem de líquidos tem dupla função, pois minimiza a carga hidráulica sobre a camada de barreira (minimizando, por consequência, a infiltração) e drena a água da camada de proteção, permitindo que esta absorva maior volume de água, reduzindo o escoamento superficial. Em casos em que os resíduos não apresentam boa capacidade de suporte, pode ser necessário executar uma camada de fundação para dar suporte às demais camadas.

Amorim (2008) afirma que a camada superficial de proteção não deve estar muito compactada e deve conter quantidade suficiente de matéria orgânica para fornecer as condições necessárias para o desenvolvimento de vegetação rasteira. A vegetação tem dupla função no sistema de cobertura, funcionando como agente de transpiração, reduzindo a umidade nas camadas superficiais, além de proteger contra processos erosivos ao reduzir o impacto da chuva e a velocidade dos ventos na superfície do solo. Em regiões áridas, a falta de vegetação pode ser um problema para sistemas de cobertura. Porém, para essas regiões, costuma-se usar cascalho como proteção à erosão.

Segundo Qian et. al.(2002), os materiais utilizados nas camadas de drenagem são solos não coesivos ( areias e cascalhos) e ou geossintéticos. Para os casos em que a camada de drenagem é feita de solo, recomenda-se que o solo tenha permeabilidade maior do que  $1 \times 10^{-2}$ (cm/s) e a camada tenha espessura e inclinação mínimos de 30 cm e 4%, respectivamente. O material que constitui a

camada drenante deve atender aos critérios de filtro, ou seja, ao mesmo tempo deve drenar e evitar a migração de partículas de solos adjacentes para seus vazios. Caso não haja disponibilidade de solos que atendam a estes critérios, faz-se necessária a utilização de geonets, geotêxteis ou geocompostos.

A camada de barreira hidráulica, conforme descrito anteriormente tem por principal função minimizar a percolação de água dada sua baixa condutividade, mas também apresenta a função secundária de aumentar o escoamento superficial, uma vez que permite maior armazenamento de água na camada de proteção. Caso essa camada mantenha-se saturada, minimiza a percolação de gases, apesar de frequentemente esse tipo de camada apresentar fissuras (trincas) causadas por ressecamento ou recalques diferenciais. EPA (1999) ressalta que a experiência tem mostrado que este tipo de cobertura pode apresentar vulnerabilidade e limitações, como: mau funcionamento causado pelo ressecamento e conseqüente fissuramento da camada barreira; grandes investimentos para a sua construção e manutenção; durabilidade, seu desempenho pode piorar com o tempo devido à degradação pela erosão superficial etc.

### **2.5.2 Coberturas Evapotranspirativas (ET)**

Conforme enumerado por Amorim (2008), os sistemas de cobertura evapotranspirativos ou alternativos são geralmente compostos de:

- Uma camada superior em contato com a superfície, com as funções de controlar a erosão e servir para o plantio da vegetação. Nesta camada, a evapotranspiração é promovida pela vegetação, principalmente em estação de crescimento das plantas;
- Uma camada de material pouco compactado, conhecida como camada de "armazenamento e liberação", posicionada abaixo da camada de proteção;
- Em alguns casos, uma camada de solo de granulometria mais grosseira, acrescentada abaixo da camada de armazenamento e liberação, denominada barreira capilar.

Analogamente às coberturas prescritivas, caso não exista capacidade de suporte para a execução da cobertura, pode se fazer necessária a execução de uma camada de fundação para dar sustentação à cobertura. Essas estruturas podem ser vantajosas em relação às prescritivas por funcionarem como estruturas naturais, possuírem maior vida útil, exigir menos manutenção e menor custo de implantação. Além dessas vantagens, quando essas coberturas pressupõem barreiras capilares, a espessura e o volume de solo necessários para a sua construção são menores quando comparados com os da cobertura convencional.

Enquanto o desempenho das coberturas prescritivas decresce com o tempo em consequência do ressecamento e erosão, o desempenho das coberturas evapotranspirativas tende a melhorar com o

tempo. Isto se deve ao fato de que, devido a menor compactação do solo, as raízes tendem a se desenvolver melhor horizontal e verticalmente, estabilizando a vegetação e incrementando a transpiração e proteção contra a erosão.

Langoni (2002) assinala que a expectativa de vida de uma cobertura evapotranspirativa é de milhares de anos, uma vez que elas simulam a natureza. Para o caso das coberturas convencionais, a vida útil estimada é incerta.

A camada de armazenamento e liberação deverá ser capaz de acumular a água infiltrada durante o período chuvoso e liberá-la para a atmosfera por evapotranspiração durante períodos de estiagem. O dimensionamento da espessura dessa camada deve ser realizado de modo a evitar que o acréscimo de umidade do período chuvoso alcance a base da mesma, para evitar que haja acréscimo de água no rejeito. A capacidade de armazenamento é função do tipo de solo, da espessura da camada e das condições meteorológicas locais.

Nos Estados Unidos, conforme apresentado em EPA (2002), para que haja aprovação do projeto de cobertura do tipo ET pelas agências reguladoras, é necessário avaliar e verificar se essa solução é equivalente quanto à eficiência contra a infiltração em comparação com uma cobertura convencional. A eficiência é dada quando a percolação gerada a partir da base da cobertura ET for menor ou igual àquela gerada pela cobertura convencional.

Amorim (2008) indica a utilização de equipamentos denominados lisímetros para medir a percolação pela cobertura. Os lisímetros são dispositivos elaborados para recolhimento e medição de vazão de água percolada pelos vazios dos solos por gravidade. Normalmente, possuem em sua parte mais baixa uma superfície impermeável, formando um recipiente. Deste modo, a água percolada por gravidade fica retida no recipiente impermeável para ser drenada (via geocomposto drenante ou material granular) para um medidor de vazão e recipiente de coleta.

Abichou et al. (2004) concluem que, na cobertura ET, a vegetação tem papel fundamental, uma vez que as raízes são as principais responsáveis por retirar parte da água armazenada nos solos destas coberturas. Esse princípio é representado na Figura 2.4.

Conforme exposto em Abichou et. al. (2004), o balanço hídrico de uma cobertura evapotranspirativa pode ser representado pela equação 2.5.

$$P_t = P - R - S - T - E - L \quad (2.5)$$

Em que:

$P_t$  – Percolação

P – Precipitação

R – Escoamento Superficial

S – Armazenamento de água no perfil

T – Transpiração

E – Evapotranspiração

L – Drenagem Lateral

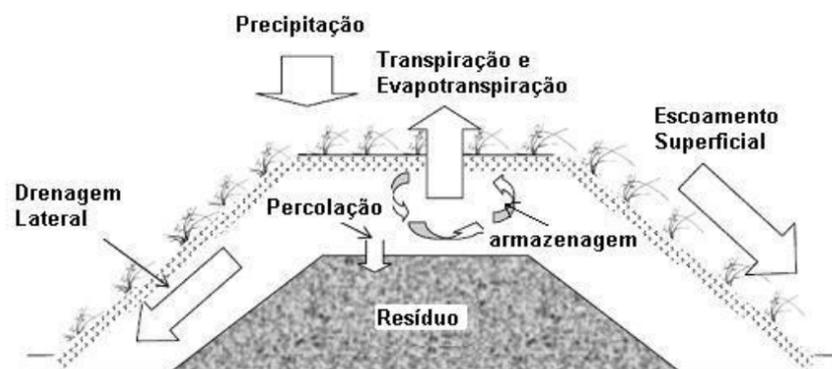


Figura 2.4 - Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa (adaptado de ABICHOU et al., 2004)

Esse tipo de cobertura ainda é dividido em dois subtipos: coberturas monolíticas e coberturas com barreiras capilares (Figura 2.5). As coberturas monolíticas são formadas por uma camada de solo para plantio de espécies vegetais, otimizando a transpiração, sobreposta à camada de armazenamento e liberação. As coberturas ET com barreira capilar são formadas por uma camada de solo para plantio na superfície, seguida logo abaixo por uma camada de armazenamento e liberação e uma terceira camada mais abaixo de material de granulometria grosseira para compor a barreira capilar.

Ao contrário do que pode ser erroneamente concluído, a camada de barreira capilar, apesar de ser constituída por material de granulometria grosseira, minimiza a percolação de água que possa vir a ocorrer da camada de armazenamento e liberação para o rejeito. Para ajudar a compreender esse fenômeno é apresentado um esquema de cobertura ET com barreira capilar na Figura 2.6.

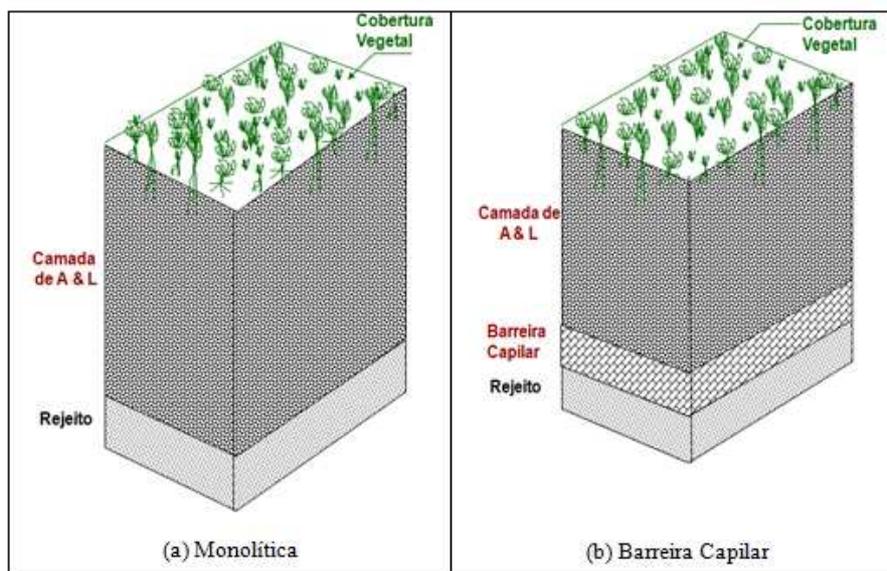


Figura 2.5 - Sistemas de cobertura ET monolítica e com barreira capilar.

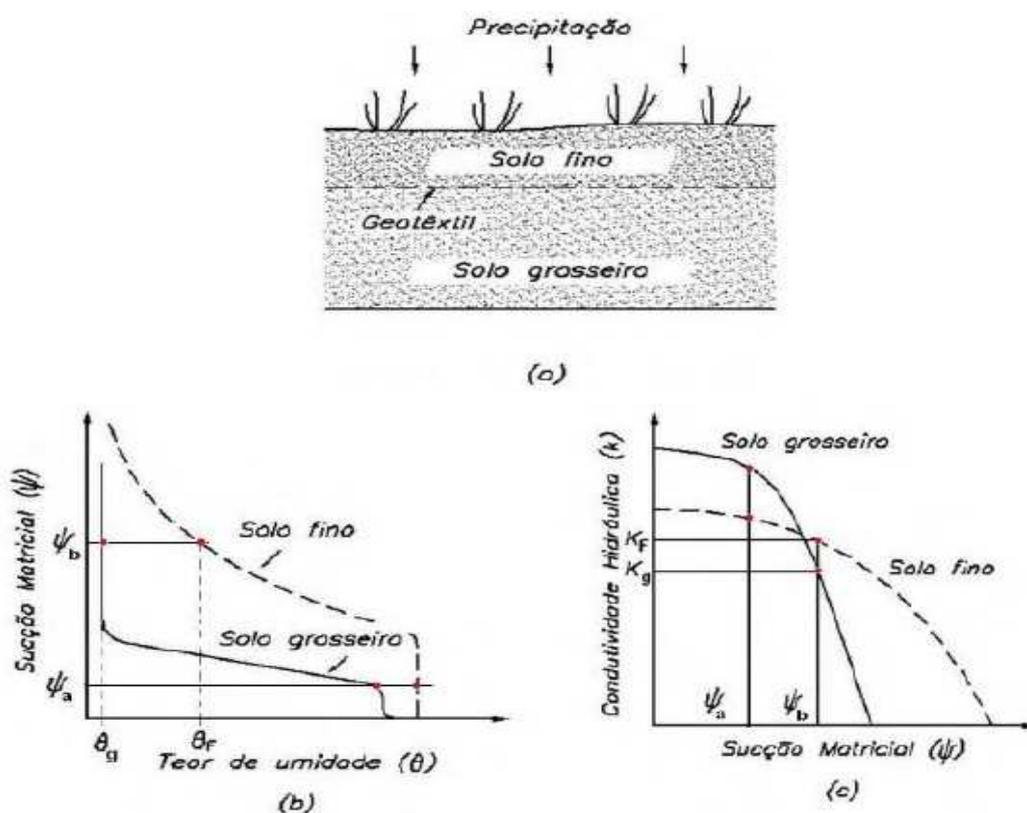


Figura 2.6 - Esquema de propriedades hidráulicas de materiais de uma cobertura ET típica  
 (a) Perfil esquemático de uma barreira capilar (b) Curvas de retenção de umidade de solo fino e granular (c) curvas de condutividade hidráulica de solo fino e granular.  
 (ABICHOU, 2003 apud AMORIM, 2008.)

Tendo em vista a Figura 2.6, imagina-se que um evento chuvoso seja capaz de umedecer um solo fino até o ponto  $\theta_F$  (curva de retenção (b)) que corresponde a uma sucção matricial  $\psi_b$ , na interface entre o solo grosseiro e o solo fino. De acordo com as curvas apresentadas em (c), para a sucção  $\psi_b$ , a condutividade hidráulica do solo fino ( $k_F$ ) é maior do que a do solo grosseiro ( $k_g$ ). Por este

motivo, a tendência é que a água percole menos da camada de solo fino para a camada de solo grosso. A medida que o solo grosso recebe lentamente a água percolada e aumenta a umidade volumétrica, chega a uma sucção matricial próxima à  $\psi_a$  e, então, o solo grosso passa a apresentar maior condutividade hidráulica do que o solo fino. Neste momento, a vazão percolada do solo fino para o solo grosso aumenta e acontece o fenômeno conhecido por "quebra" da barreira capilar.

Segundo Dwyer (2003) e Carlsson (2002), além da quebra da barreira capilar, ainda existem dois problemas importantes com relação ao uso de coberturas evapotranspirativas com barreira capilar:

- Deve-se evitar que o solo fino migre para os vazios do solo grosso da barreira capilar. O dimensionamento de um geotêxtil adequado pode ser a solução para este problema;
- Elevadas precipitações também poderão atrapalhar o perfeito funcionamento das coberturas evapotranspirativas, uma vez que a camada de solo superior poderá ganhar mais umidade do que a evapotranspiração consegue retirar do perfil.

Nyhan et al. (1990) relataram que a percolação numa barreira capilar construída abaixo de uma camada de argila siltosa é cerca de 11 vezes menor que a percolação que ocorre numa mesma barreira capilar construída acima de uma camada de silte. Ou seja, barreiras capilares têm melhor desempenho se o contraste entre a condutividade hidráulica da barreira capilar e da camada de armazenamento e liberação for maior.

Barreiras capilares são mais eficientes se o material grosso for uniforme. Stormont et. al. (1999) realizaram uma série de ensaios de infiltração em laboratório em barreiras capilares feitas com cascalho com finos e areia grossa. Os autores concluíram que a barreira formada pela areia grossa foi mais eficiente que a com cascalho e finos. Caso não ocorra a "quebra" da barreira capilar, essas camadas podem ser responsáveis pelo aumento da eficiência da camada de armazenamento e liberação ou mesmo pela redução da espessura da camada de armazenamento e liberação a ser utilizada.

De acordo com Zornberg et. al (2003), espera-se que coberturas ET tenham bom funcionamento em climas áridos mesmo que sejam utilizados solos com permeabilidade elevada. Foram realizadas análises numéricas para coberturas ET utilizando-se modelos de fluxo em meios não saturados para climas áridos do sul da Califórnia nos Estados Unidos. Os resultados demonstraram que esse tipo de cobertura é viável para uma vasta gama de condições de espessuras e tipos de materiais e que atenderam à rigorosos critérios de desempenho.

## **2.6 *Experimento de Campo x Equivalência Hidráulica***

Conforme observado por Benson et. al (2001), é necessário avaliar a equivalência hidráulica de um sistema de cobertura ET para que a alternativa seja aprovada pelas autoridades reguladoras norte americanas. Albright et. al (2004) mencionam que as regulamentações contidas na lei "Resource Conservation Recovery Act" preveem a utilização de coberturas evapotranspirativas desde que sejam hidráulicamente equivalentes às coberturas convencionais (i.e, a taxa de percolação da cobertura alternativa deve ser menor ou igual àquela resultante de uma cobertura convencional). Ainda segundo os autores, nos Estados Unidos, as coberturas ET têm recebido atenção considerável, pois as coberturas convencionais apresentam custo de implantação maior e problemas relacionados à durabilidade de longo prazo de camadas compactadas de material "fino". Quando um critério específico local não é estabelecido, o seguinte padrão deve ser aplicado em relação à taxa de percolação: coberturas com geossintéticos, <3mm/ ano; coberturas convencionais em climas úmidos, <30mm/ano; coberturas convencionais em climas áridos/semiáridos/ sub-úmidos, <10mm/ano. (Bolen et. al , 2001).

## **2.7 *Metodologias para Dimensionamento de Coberturas***

A quantidade de variáveis a ser considerada no dimensionamento de um sistema de cobertura é extensa e se faz necessário utilizar metodologias que apresentem uma sequência lógica de atividades para que os dados de projeto sejam devidamente adquiridos. É importante ainda que a configuração da cobertura projetada seja testada antes da construção final. Esta sequência de atividades de projetos de cobertura deve envolver a realização de ensaios geotécnicos específicos, utilização de modelos computacionais para simulações numéricas, construção de células teste, instrumentação e monitoramento de desempenho (DUARTE, 2012).

A metodologia apresentada pelo "Interstate Technology & Regulatory Council" (ITRC, 2003) consiste basicamente em cinco etapas: (1) seleção de critério de desempenho; (2) dimensionamento preliminar/conceitual; (3) caracterização de campo; (4) análise de sensibilidade/modelagem numérica; (5) dimensionamento final.

### **2.7.1 *Seleção de Critério de Desempenho***

Nesta etapa são adotados e definidos os critérios de desempenho esperados pelo sistema de cobertura. Os critérios de desempenho de uma cobertura seca devem ser analisados para cada caso, levando-se em consideração impactos de curto e longo prazo sobre o meio receptor de um sítio específico.

No Brasil não existe uma regulamentação que estabelece critérios de desempenho para um sistema de cobertura ET. Porém, alguns países, como os EUA, possuem regulamentações que sugerem a utilização de taxas de infiltração anual para diferentes tipos climáticos.

### **2.7.2 Dimensionamento Preliminar**

A seleção do conceito a ser utilizado pode ser direcionada a partir de indicadores locais tais como experimentos (lisímetros de coberturas) existentes próximos à região de estudo, ou mesmo, dados de sistemas de coberturas existentes nas proximidades. Esta etapa do dimensionamento, por razões práticas, normalmente é realizada de maneira rápida e sem grandes caracterizações do sítio. O conhecimento da capacidade de armazenamento do solo deve ser estimado, assim como as espessuras das camadas. O dimensionamento preliminar é realizado em três passos:

- Determinar a capacidade de armazenamento de água dos solos disponíveis. Esta quantidade representa a diferença de umidade volumétrica entre o ponto de murcha e a capacidade de campo. Ponto de murcha é o teor de umidade volumétrica abaixo do qual as plantas não conseguem mais extrair água do solo. Capacidade de campo é o teor de umidade do solo abaixo do qual a percolação vertical cessa, depois deste ter sido previamente saturado. Ou seja, é a maior quantidade de água que um solo pode armazenar sem que haja drenagem vertical. A diferença entre estes dois pontos representa a capacidade de armazenamento do solo;
- Estimar a quantidade de água a ser armazenada pela cobertura em períodos em que as precipitações são preponderantes em relação à evapotranspiração;
- Determinar a profundidade de solo necessária para armazenar a quantidade de água que constitui a diferença entre a precipitação e evapotranspiração. Isto é feito dividindo-se a quantidade de armazenamento de água necessária (profundidade da água) pela capacidade de armazenamento de água (profundidade de água por unidade de profundidade de solo). O resultado deste processo será uma profundidade calculada de solo e vai representar um ponto de partida aceitável para uma avaliação mais aprofundada de um sistema de cobertura ET.

### **2.7.3 Caracterização do Local**

A caracterização do local onde a cobertura pretende ser implantada compreende o conhecimento de uma gama de dados das condições climáticas, caracterização dos solos disponíveis para serem utilizados como cobertura e dos resíduos que serão cobertos e, por fim, das características da vegetação a ser implantada:

a) Características Climáticas

O conhecimento das características climáticas é de fundamental importância para a seleção do conceito de cobertura a ser implantado, bem como para o dimensionamento e modelagem da espessura das camadas da cobertura. Na Figura 2.7, ao cruzar informações climáticas (pluviometria anual, evapotranspiração, temperaturas médias, tipo de clima) é possível perceber de maneira gráfica a importância do clima na definição do conceito a ser adotado, onde pode se obter o tipo de cobertura indicado ao cruzar as informações de evapotranspiração, pluviometria, região latitudinal, temperatura média e clima.

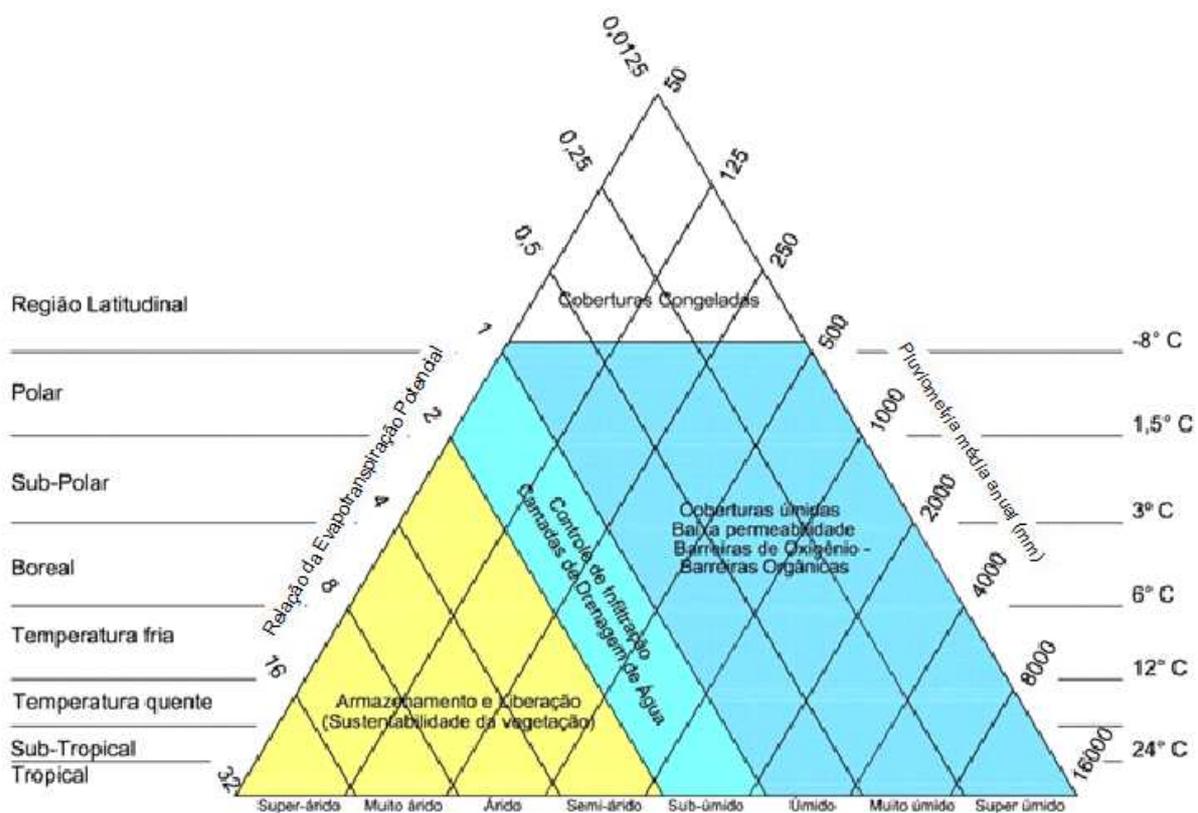


Figura 2.7 - Coberturas e Tipos Climáticos (adaptado de INAP, 2014)

Os dados climáticos específicos do local importantes para o desempenho de coberturas são os valores diários de precipitação, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar, total de radiação solar e velocidade dos ventos. O ITRC (2003) recomenda que os dados climáticos a serem considerados sejam selecionados de maneira conservadora, de modo que sejam simuladas as condições críticas possíveis de ocorrer.

b) Caracterização dos Solos

A caracterização dos solos disponíveis deve ser realizada por meio de ensaios de laboratório de granulometria, limites de Atterberg, compactação, permeabilidade saturada, permeabilidade não

saturada e curva de retenção de água (curva característica de sucção). Nesta etapa, também são analisadas as potenciais áreas de empréstimo, a partir do levantamento de volume e análise e viabilidade econômica de seu transporte.

### c) Vegetação

De acordo com o IRTC (2003), a transpiração da planta é o mecanismo primário de remoção de água da cobertura, já que sem a vegetação as coberturas dependeriam somente da evaporação para remover a água. O objetivo do plantio de espécies, em conjunto com as metas do fechamento da mina, é exigir pouca manutenção e sustentabilidade de longo prazo. Enquanto algumas pesquisas defendem o plantio de apenas espécies nativas, testes realizados com misturas de espécies nativas e não nativas têm provado ser muito eficazes na redução ou eliminação de água a partir do sistema de cobertura, como por exemplo Dwyer (1999) e EPA (2000). Uma grande variedade de espécies de plantas que se desenvolve tanto em estações frias e quentes possibilita a evapotranspiração ao longo de todo o ano.

#### **2.7.4 Análise de Sensibilidade a Partir da Modelagem Numérica**

Antes de se partir para o projeto final da cobertura, é recomendável que se faça a modelagem matemática do sistema de cobertura para verificar a sensibilidade do sistema frente à variação dos parâmetros utilizados no projeto (DUARTE, 2012). O IRTC (2003) alerta para o fato de que os modelos não são o que de fato existe, mas reproduzem certos aspectos da realidade de modo mais ou menos aproximado e controlado; mas suas limitações e precisões devem ser compreendidas e levadas em conta para se realizar previsões de desempenho de uma cobertura.

Após avaliar diferentes modelos numéricos e estudos comparativos entre eles, o corpo técnico que desenvolveu o guia global de drenagem ácida de rochas (INAP, 2003) chegou às seguintes conclusões:

- As previsões dos modelos não têm precisão suficiente para servir de base para regulamentação da cobertura;
- O fluxo não deve ser encarado como o único resultado da modelagem para o dimensionamento da cobertura. Os modelos numéricos devem ser utilizados principalmente para ganho de habilidade/criatividade em dimensionamento (na medida em que fornecem respostas físicas realistas para adição de recursos de projeto) e também para análise de sensibilidade;
- Modelos desenvolvidos com cautela na seleção dos parâmetros de entrada e conjunto de dados conservadores podem fornecer uma boa base teórica para avaliação de projetos de cobertura;

- A análise de sensibilidade é uma ferramenta valiosa e desenvolve a criatividade em projetar coberturas;
- A utilização de modelos de balanço hídrico simplificados pode ser justificada em alguns locais, com base na situação regulamentar, os objetivos de modelagem, e experiências em locais semelhantes. O projetista deve considerar as incertezas inerentes aos modelos aprovados;
- Modelos baseados em equações de Richards (1931) são recomendados para coberturas que fazem uso de barreiras capilares;
- Em alguns casos, a modelagem numérica pode ser considerada desnecessária e uma abordagem baseada em risco pode ser mais apropriada. Dados existentes do local (lisímetros/coberturas existentes) podem eliminar a necessidade da modelagem;
- O proprietário do empreendimento, projetista e agência regulatória devem estabelecer um modelo aceitável e os resultados desejados antes de iniciar a modelagem;
- Os dados de entrada da modelagem não devem ser mensais, devendo ser fornecidos valores diários ou a cada hora.
- A seleção de cenários climáticos tem um impacto significativo no desempenho da cobertura. O uso de geradores de clima é recomendável para locais onde não existem dados suficientes;
- A incapacidade de modelos de prever medições de campo com precisão é função da limitação de cada um e se deve à complexidade de diversos fatores, dos quais evapotranspiração, escoamento superficial e fluxo preferencial são normalmente os mais significantes;
- Há um aumento na precisão da modelagem, quando são utilizados parâmetros obtidos em laboratório (ou campo) para os materiais que compõem uma cobertura, ao invés de serem adotados parâmetros típicos encontrados na literatura.

### **2.7.5 Projeto Final**

Nesta etapa, o projetista deve realizar uma avaliação mais criteriosa das hipóteses modeladas. Esta fase deve servir para verificar e comprovar os parâmetros considerados e os resultados esperados.

A vegetação selecionada, as propriedades do solo, os valores de percolação estimados por modelos ou medidos em testes de campo, o comportamento do escoamento superficial devem ser analisados de maneira criteriosa nesta etapa final, seja via ensaios de grande escala em campo, seja via medições em locais próximos.

Existem várias maneiras de incrementar a precisão e qualidade dos dados obtidos nas etapas anteriores. Segundo o IRTC (2003), muitos pesquisadores e agentes reguladores, apesar de haver controvérsia, continuam a usar os testes de campo de cobertura como uma prova de desempenho

para avaliar projetos propostos de cobertura. Os testes de campo consistem basicamente em lisímetros que, de acordo com Benson et. al (2001), são definidos como recipientes enterrados com topo aberto com a finalidade de coletar e medir a água do solo.

Duarte (2012) apresenta de maneira resumida outras duas metodologias para dimensionamento de coberturas além daquela proposta pelo ITRC: as propostas por Junqueira et. al (2011) e por Ribeiro (2011). Junqueira et. al (2011) apresentam uma sequência lógica de atividades que direcionam o dimensionamento de um sistema de cobertura (Figura 2.8).

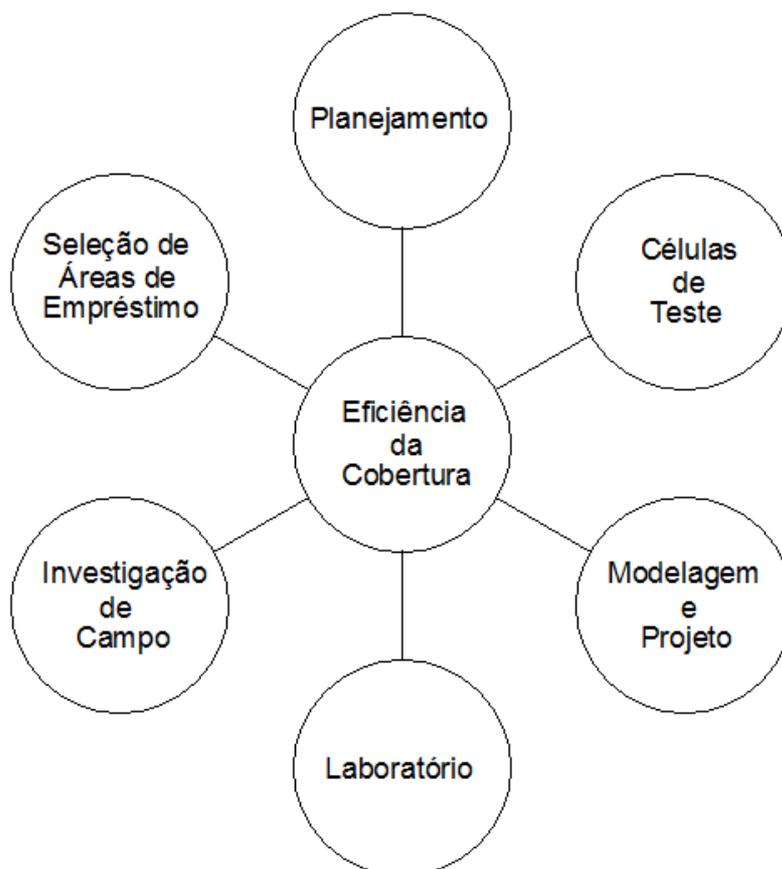


Figura 2.8 - Sequência de atividades propostas para elaboração de projetos de cobertura (JUNQUEIRA et. al., 2011)

Ribeiro (2011) recomenda uma metodologia baseada em resultados obtidos nos ensaios de campo realizados por Amorim (2008), que apresenta etapas semelhantes às das metodologias do IRTC (2003) e de Junqueira et. al. (2011), mas que define, porém, um perfil típico para coberturas composto por três camadas (camada superficial orgânica, camada de armazenamento e liberação e, por último, a barreira capilar).

## **2.8 Modelagem Numérica de Coberturas**

Junqueira et. al. (2011) apresentam uma gama de programas computacionais capazes de solucionar as equações que regem o fluxo de água em meios não saturados. Esses programas podem solucionar desde problemas unidimensionais (UN-SATH; LEACHM; SOILCOVER), bidimensionais (VADOSE/W; Hydros) até problemas tridimensionais (SVflux).

Segundo o IRTC (2003), existem três principais tipos de modelos, sendo dois deles relacionados ao balanço hídrico (simplificado e reforçado) e aqueles baseados nas equações de Richards (1931). O modelo simplificado consiste em uma abordagem simples, baseada em operações matemáticas triviais de balanço hídrico que contemplam as variáveis precipitação, irrigação, escoamento superficial e evapotranspiração. O modelo reforçado é bastante semelhante ao simplificado, porém contempla cálculos de previsão de escoamento superficial, gerador aleatório de condições climáticas e cálculos de evapotranspiração.

As equações de Richards (1931) são uma solução numérica complexa uni ou bidimensional para fluxo não saturado. Têm como dados de entrada a carga piezométrica, a condutividade hidráulica saturada e não saturada, a curva de retenção de água, a evapotranspiração e o tempo. Como resultados principais são apresentados variação de umidade e também o fluxo.

O programa VADOSE/W foi adotado nesta dissertação para auxiliar no dimensionamento dos sistemas de cobertura e também para permitir comparações com as medições realizadas no experimento. Este programa faz parte do pacote GeoStudio, versão 2007, desenvolvido pela GEO-SLOPE International, sediada no Canadá. Esta versão do programa faz uso das equações simplificadas propostas por Wilson (1990), utilizando o Método dos Elementos Finitos, conjugado com o Método das Diferenças Finitas para analisar o fluxo de água, vapor e calor em uma camada de solo não saturado variando com o tempo. O desempenho do VADOSE/W em análises numéricas de sistemas de cobertura foi verificado por Ribeiro (2011), que comparou os resultados numéricos com aqueles obtidos do monitoramento de experimento de campo, concluindo que existe boa concordância entre os dados de campo e os resultados fornecidos pelo programa.

As variáveis de entrada do programa são inúmeras e muitas vezes difíceis de serem obtidas. As propriedades geotécnicas e hidráulicas dos materiais a serem simulados são: densidade real dos grãos, índice de vazios, coeficiente de permeabilidade saturada, coeficiente de variação volumétrica, e as curvas de retenção de água e de condutividade hidráulica. As principais condições de contorno referem-se às condições climáticas diárias (temperatura mínima/ máxima, pluviometria, evaporimetria, umidade mínima/máxima, radiação solar, velocidade dos ventos) e parâmetros

referentes à vegetação. A vegetação tem grande importância na dinâmica do fluxo de água que percola pela cobertura. Duarte (2012) compara os resultados da modelagem de uma cobertura considerando vegetação e a mesma cobertura simulando ausência de vegetação. O autor verificou que a ausência de vegetação gerou maior percolação de água pela base da cobertura, concluindo que, de fato, a transpiração causada pela vegetação é importante para o bom funcionamento da cobertura.

Os principais parâmetros de entrada na modelagem numérica relacionados à vegetação são:

- Consumo de água devido à transpiração da planta;
- Profundidade das raízes;
- Índice de área foliar - relação entre a área das folhas e a área de solo que a mesma ocupa;
- Ponto de Murcha.
- Após a inserção dos dados de entrada, geometria e condições de contorno, o problema é calculado e o software gera uma quantidade grande de dados de saída, sendo destacados os principais: Percolação de água pela base da cobertura;
- Balanço hídrico: volume acumulado ao longo do tempo da precipitação, evaporação, transpiração, escoamento superficial, percolação e água acumulada no perfil;
- Perfil de umidade: variação da umidade pela profundidade ao longo do tempo.
- Perfil de saturação: variação do grau de saturação pela profundidade ao longo do tempo;
- Variação da sucção em pontos especificados ao longo do tempo.

## ***2.9 Conceitos Básicos da Mecânica dos Solos Não Saturados***

Fredlund e Rahardjo (1993) apontam que grande parte dos solos naturais do planeta Terra (cerca de 60%) estão situados em áreas de climas semiáridos e pouco úmidos, onde o nível d'água é encontrado a mais de 20 metros de profundidade. Mesmo em regiões de clima úmido, existem os períodos de estiagem que são suficientes para secar o solo da superfície. As obras de engenharia com solos compactados compreendem grande parte das obras feitas com terra, como estradas, barragens de terra, todas executadas com solos não saturados. Dada a importância da compreensão do comportamento dos solos não saturados para os problemas de engenharia geotécnica, nas últimas décadas o assunto vem sendo amplamente difundido por comitês internacionais criados para se dedicarem ao estudo de solos não saturados e também diversos seminários e congressos focados nesse tema.

O conhecimento dos mecanismos de transporte de umidade, calor e dos gases em solos não saturados é essencial para o entendimento do funcionamento de sistemas de cobertura e também dos modelos numéricos disponíveis no mercado. Em seguida, apresentam-se, de maneira resumida, alguns conceitos considerados essenciais para a compreensão da mecânica dos solos não saturados e, mais especificamente, do transporte de calor, gases e umidade por esses solos.

### 2.9.1 Fases do Solo

Lambe e Whitman (1969) consideram o solo não saturado como sendo um sistema trifásico, isto é, é constituído de três fases: líquida (água), gasosa (ar) e sólida (partículas de minerais). Já Fredlund e Morgenstern (1977), postulam que se deve considerar uma quarta fase independente, a interface ar-água, conhecida também como membrana contrátil (Figura 2.9). Essa membrana contrátil pode influenciar no comportamento do solo desde que a fase gasosa seja contínua, uma vez que a mesma funciona como uma membrana elástica devido à tensão superficial que existe na superfície da interface entre a fase líquida e gasosa. A tensão superficial ocorre devido à propriedade que o líquido tem de manter suas moléculas unidas (devido às interações intermoleculares), formando uma espécie de membrana elétrica.

De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), dada a existência de água intersticial ou bolhas de ar oclusas no solo, o meio multifásico não é mais considerado contínuo e pode ser analisado como um sistema bifásico, desde que seja admitido que um fluido compressível preencha os poros. Esse comportamento bifásico é formado por partículas de solo e a membrana contrátil que são duas fases que entram em equilíbrio e outras duas fases que fluem (ar e água) ao ser aplicado um gradiente de tensão.

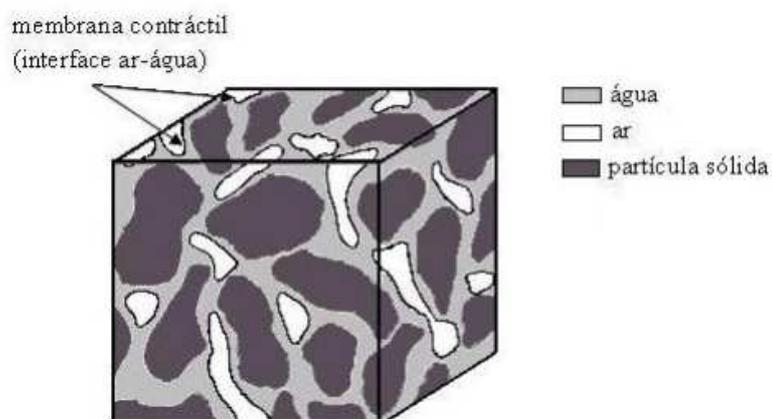


Figura 2.9 - Elemento de solo não saturado (adaptado de FREDLUND; MOGENSTERN, 1977)

De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), dada a existência de água intersticial ou bolhas de ar oclusas no solo, o meio multifásico não é mais considerado contínuo e pode ser analisado como um

sistema bifásico, desde que seja admitido que um fluido compressível preencha os poros. Esse comportamento bifásico é formado por partículas de solo e a membrana contrátil que são duas fases que entram em equilíbrio e outras duas fases que fluem (ar e água) ao ser aplicado um gradiente de tensão.

### 2.9.2 Sucção

A região do solo situada acima do nível d'água é dado o nome de zona vadosa, que pode ser dividida em duas partes. A primeira fica logo acima do nível d'água e compreende a porção que permanece saturada (saturação próxima de 100%) e a segunda parte que fica logo acima da primeira e corresponde à porção não saturada do solo. Porém ambas as partes da zona vadosa apresentam uma pressão de água negativa nos poros conhecida como sucção.

Marinho (1997) define a sucção como sendo “a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz como que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação”. Em outras palavras, a sucção é uma tensão usada para avaliar a capacidade do solo de reter água.

Lee e Wray (1995) apontam que quando ocorre fluxo da água livre num solo não saturado, a mesma poderá ser retida ou adsorvida por ele. Neste caso, é necessária a aplicação de uma força externa para desprendê-la. Tal energia aplicada por unidade de volume de água é a sucção. A energia disponível para realizar esse trabalho é chamada de potencial total ( $\Phi_t$ ) e pode ser representado pela equação apresentada por Aitchison (1965):

$$\Phi_t = \Phi_o + \Phi_m + \Phi_g + \Phi_a + \Phi_p \quad (2.6)$$

onde:

$\Phi_o$  = Potencial Osmótico ou de soluto (associado à pressão osmótica da água no solo);

$\Phi_m$  = Potencial Mátrico (resultante das forças capilares ou de adsorção);

$\Phi_g$  = Potencial Gravitacional (elevação de acordo com um nível de referencia);

$\Phi_a$  = Potencial Pneumático (pressão da fase gasosa);

$\Phi_p$  = Potencial de adensamento (associado a sobrecarga transmitida pela água intersticial);

Para efeito de simplificação, a parcela referente ao potencial gravitacional pode ser considerada desprezível, assim como o potencial de adensamento também pode ser desconsiderado quando não

há adensamento. Se for considerado que os poros do solo estão interligados à atmosfera, a pressão na fase gasosa também pode ser desconsiderada e a equação 2.6 pode ser reescrita:

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m \quad (2.7)$$

Reescrevendo a equação 2.8 em termos de pressões equivalentes obtêm-se a equação para a Sucção Total ( $S_t$ ):

$$S_t = S_o + S_m \quad (2.8)$$

onde:

$S_o$  = Sucção Osmótica (equivalente ao Potencial Osmótico) está associada a pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre.

$S_m$  = Sucção Mátrica (equivalente ao Potencial Mátrico) pode ser definida como a pressão negativa da água intersticial devido aos efeitos da capilaridade e das forças de adsorção. O termo matricial se refere a matriz do solo, isto é, aos tipos de partícula e arranjo do solo.

Após a realização de ensaios triaxiais com sucção controlada, Edil et. al (1981) comprovou que apenas a sucção mátrica afeta o comportamento do solo. Outros autores, como Fredlund (1979) e Alonso et. al (1987) também chegam a conclusão de que somente a componente de sucção mátrica seria suficiente para descrever o comportamento mecânico do solo não saturado.

### 2.9.3 Curva de Retenção de Umidade do Solo ou Curva Característica

A curva de retenção de umidade do solo (CRUS), ou curva característica de sucção do solo, consiste na relação entre a sucção e a quantidade de água presente, a qual pode ser definida pelo grau de saturação, umidade gravimétrica ou umidade volumétrica do solo. Na Figura 2.10 é apresentado um exemplo de CRUS. O ponto onde a sucção é nula representa a saturação do solo.

Conforme pode ser observado na Figura 2.10, à medida que a sucção aumenta a partir do ponto de saturação, a umidade volumétrica permanece em um patamar praticamente constante até que a umidade volumétrica começa a decrescer. Este trecho da CRUS é correspondente à zona capilar do solo também conhecida como franja capilar, onde o solo apresenta-se quase saturado, porém sob efeito de pressão de água negativa (sucção).

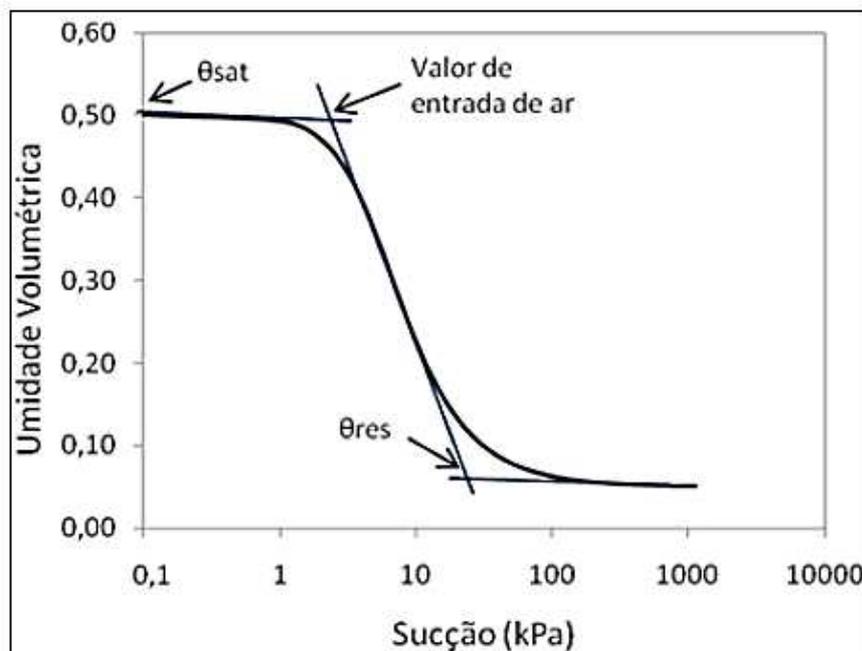


Figura 2.10 - Exemplo de uma curva de retenção de umidade do solo (GUIZELINI, 2011)

O local apontado na Figura 2.10 como "Valor de Entrada de Ar" refere-se ao ponto em que a umidade volumétrica apresenta queda brusca com o acréscimo de sucção e pode ser interpretado também como ponto para o qual a diferença entre a pressão de ar e a sucção atinge o valor necessário para causar a drenagem do maior poro do solo. Com o aumento da sucção a partir desse ponto, a umidade decresce com o aumento da sucção (região funicular) até atingir um valor residual de umidade volumétrica ( $\theta_r$ ).

A forma da curva de retenção de umidade do solo depende de diversas características, como a composição mineralógica, a distribuição granulométrica, a textura, a estrutura e o índice de vazios, entre outros. A distribuição granulométrica do solo é um dos fatores que afeta a relação sucção-umidade. De acordo com Fredlund et. al. (1994), normalmente, quanto maior a quantidade da fração argila maior será o teor de umidade para um mesmo valor de sucção. Isso se deve ao fato dos solos mais argilosos possuírem vazios muito pequenos, o que aumenta o efeito da capilaridade. Também se pode atribuir este efeito à maior superfície específica apresentada pelos grãos menores, o que implica num aumento das forças de adsorção (DUARTE, 2012).

Na Figura 2.11 são apresentadas curvas típicas de areia, silte e argila e suas diferenças. Segundo Lopes (2006), a uniformidade dos poros de solos argilosos fazem com que a relação entre sucção e quantidade de água retida seja gradual. Por outro lado, para solos arenosos e siltosos essa relação acontece de maneira mais abrupta, pois os poros são maiores e mais conectados.

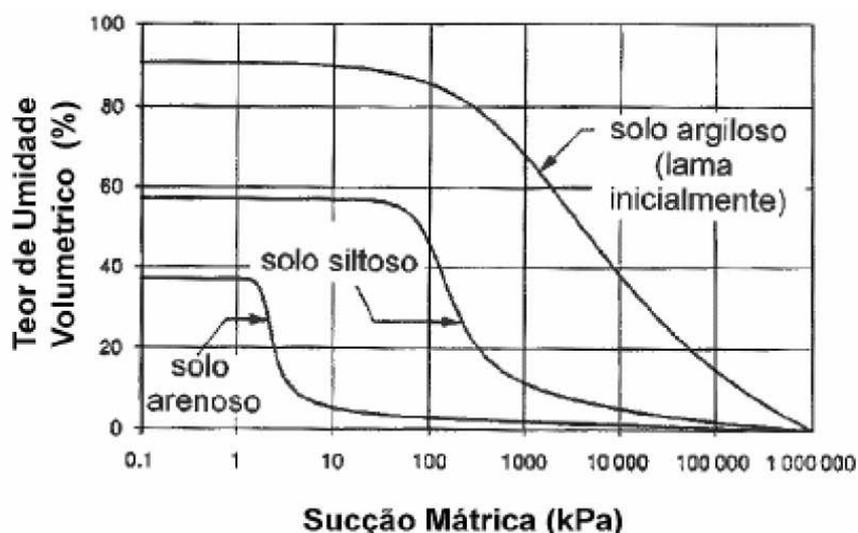


Figura 2.11 - Curvas de Retenção de Umidade Típicas para areias, siltes e argilas (adaptado de FREDLUND et. Al, 1994).

### 2.9.4 Métodos Para Medir a Sucção

Conforme descrito nos itens anteriores, o conhecimento da sucção é essencial para compreensão dos mecanismos de solos não saturados. Por esse motivo foram criados diversos procedimentos para medir a sucção. Os métodos criados podem ser classificados em medições diretas (medição da energia da água nos poros) ou indiretas (são feitas correlações de outros parâmetros com a sucção no solo através de calibrações).

Marinho (1997) apresenta diversas técnicas utilizadas para a medição de sucção nos solos, tais como psicrômetro, papel filtro com e sem contato, bloco poroso, sensor de condutividade térmica, placa de sucção, placa de pressão, tensiômetro padrão, tensiômetro osmótico e tensiômetro tipo Imperial College. Alguns desses principais métodos foram esquematizados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2- Métodos Experimentais para determinação da Sucção  
(MASROURI et. al., 2008)

Técnica		Sucção Determinada	Medida ou Controle de Sucção através de	Intervalo de Sucção (kPa)
Determinação da Sucção	Tensiômetro	Mátrica	Pressão de Água Negativa	0 -100
	Sensor de Condutividade térmica/elétrica	Mátrica	Condutividade Térmica	10-4000
	Papel Filtro	Mátrica e Total	Umidade do Papel Filtro	100-3000
	Psicrômetro	Total	Umidade do Vapor	100-100000
Controle da Sucção	Placa de Pressão	Mátrica	Pressão de ar	10-15000
	Coluna de Solo	Mátrica e Total	Pressão de água Negativa	0-100
	Centrífuga	Mátrica	Força Centrífuga	10-15000

Para a obtenção das curvas características de sucção dessa dissertação foram utilizados os métodos de papel filtro e centrífuga. Os mesmos são descritos a seguir.

a) Método do Papel Filtro

O método do papel filtro baseia-se no princípio de que um solo, ao ser colocado em contato com um material poroso com capacidade de absorver água, tende a perder água para o material poroso até atingir o equilíbrio. No caso específico deste método, um solo com certa umidade é colocado em contato com um papel filtro com umidade reduzida e o papel absorve água até que o sistema entre em equilíbrio de pressão.

Existem dois tipos de método de papel filtro, com contato e sem contato. O primeiro tipo mede a sucção mátrica. No segundo caso, a transferência é dada a partir do vapor de água, medindo-se a sucção total. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do papel filtro, ou seja, a curva de calibração, a sucção do solo pode ser obtida. O estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém conteúdos de umidade diferentes. Portanto, determinando-se a umidade do papel filtro, pela sua curva de calibração obtém-se a sua sucção que é igual à do solo. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para a obtenção da correta sucção (MARINHO, 1994).

Existem várias curvas de calibrações obtidas para diferentes tipos de papel filtro. No caso dessa dissertação foi utilizado o papel filtro do tipo Whatman N° 42 e na Figura 2.12 estão apresentadas algumas das principais curvas de calibração para este papel.

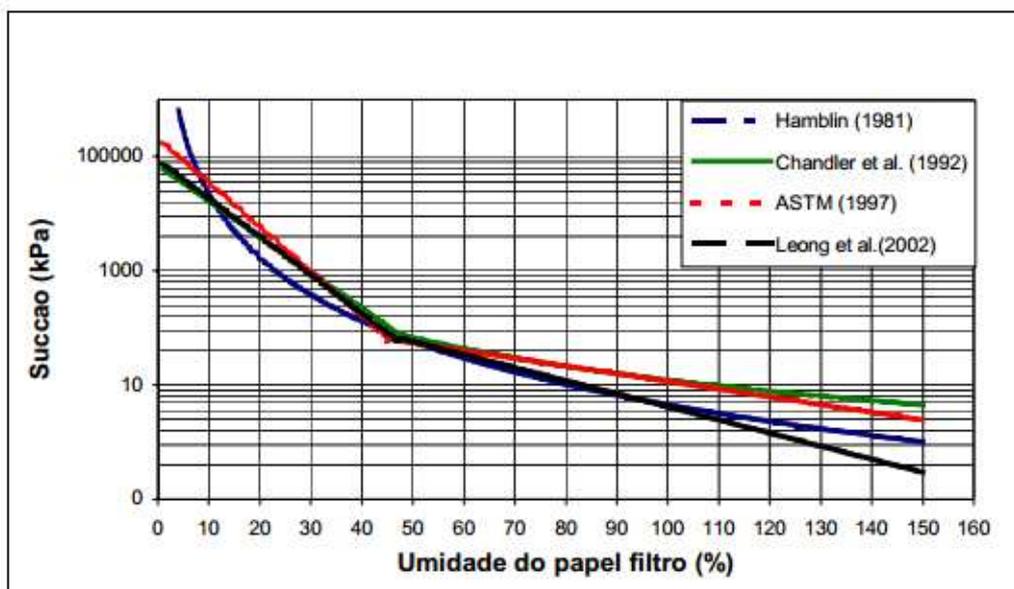


Figura 2.12 - Curvas de Calibração para o papel Filtro Whatman N° 42 (MONCADA, 2004).

b) Método em Centrífuga de Pequena Escala

De acordo com Reis et al. (2011), o método consiste em colocar amostras em uma pequena centrífuga e aplicar a elas diferentes velocidades de rotação. A centrífuga foi adaptada para comportar quatro amostras de solo e a sucção aplicada às amostras varia proporcionalmente com a velocidade de rotação aplicada na centrífuga. A cada velocidade imposta à máquina é obtida uma sucção equivalente. De tempo em tempo, a centrífuga é parada e as amostras inicialmente saturadas são pesadas para verificação da condição de equilíbrio. Deste modo são obtidos pares de sucção-umidade que ajudam a formar a curva de retenção de umidade do solo.

Para estimar uma espessura inicial da cobertura, foi necessário obter CRUS de maneira mais rápida, e o método da centrífuga foi inicialmente utilizado no presente estudo. Posteriormente, o método de papel filtro foi também utilizado.

### 2.9.5 Ajuste dos Pontos Obtidos em Ensaio

Os ensaios para a obtenção das CRUS fornecem pares de pontos de umidade volumétrica e sucção. Após inserir os pontos em um gráfico, é preciso ajustar a curva e, para tal, foram desenvolvidos alguns métodos empíricos, conforme apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Resumo de algumas das equações utilizadas para ajuste de curvas de sucção (MONCADA, 2004)

Autor	Equação	Parâmetros do Solo
Gardner, 1958	$w = \frac{W_s}{1 + \left(\frac{\psi}{a_g}\right)^{n_g}}$	$a_g, n_g$
Van Genuchten (1980)	$w = \frac{W_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_{vg}}\right)^{n_{vg}}\right]^{m_{vg}}}$	$a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}$
Mualem, 1976	$w = \frac{W_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_m}\right)^{n_m}\right]^{m_m}}$	$a_m, n_m, m_m=1/(1-n_m)$
Burdine, 1953	$w = \frac{W_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_b}\right)^{n_b}\right]^{m_b}}$	$a_b, n_b, m_b=2/(1-n_b)$
Fredlund and Xing, 1994	$w = C(\psi) \frac{W_s}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f}\right)\right]^{m_f}}$	$a_f, n_f, m_f, C(\psi)$

Na TAB. 2.3 os parâmetros do solo  $a$ ,  $n$  e  $m$  são parâmetros de ajuste que dependem do tipo de solo e  $w_s$  é o teor de umidade correspondente a saturação de 100%. A seguir são apresentadas de maneira mais detalhada as equações de Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994).

a) Van Genuchten (1980)

Van Genuchten (1980) propôs a equação 2.9 da variação da sucção com teor de umidade volumétrica.

$$\theta = \theta_r \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (2.9)$$

Em que:

$\theta$  - teor de umidade volumétrico;

$\theta_r$  - teor de umidade volumétrico residual;

$\theta_s$  - teor de umidade volumétrico do solo saturado;

$\psi$  - Sucção (kPa);

$a, n, m$  - parâmetros de ajustes da curva

Os parâmetros de ajustes são obtidos a partir das equações 2.11 a 2.14.

$$S_p = \frac{1}{\theta_r + \theta_s} \left| \frac{d\theta}{d(\log \psi)} \right| \quad (2.10)$$

$$m = 1 - \exp(-0,8S_p) \quad (0 < S_p \leq 1) \quad (2.11)$$

$$m = 1 - \frac{0,5755}{S_p} + \frac{0,1}{S_p^2} + \frac{0,025}{S_p^3} \quad (S_p > 1) \quad (2.12)$$

$$n = \frac{1}{m-1} \quad (2.13)$$

$$a = \frac{\psi_p}{\left(\frac{1}{2m-1}\right)^{1-m}} \quad (2.14)$$

Em que:

$\psi_p$  - valor que a tangente da curva corta o eixo da sucção (kPa);

$S_p$  - inclinação da curva tangente à curva

b) Fredlund e Xing (1994)

Fredlund e Xing (1994) utilizam a distribuição granulométrica do solo para obter a equação da variação da sucção com o conteúdo de umidade volumétrica. Eles consideram como premissa que o valor de sucção correspondente ao teor de umidade nulo é igual a  $1 \times 10^6$  kPa.

A equação obtida por Fredlund e Xing (1994) é dada como:

$$w_{(\psi,a,n,m)} = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left( e + \left( \frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right) \right]^{m_f}} \quad (2.15)$$

onde:

$$C(\psi) = \frac{-\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left[ 1 + \left( \frac{1.000.000}{\psi_r} \right) \right]} + 1; \quad (2.16)$$

$\theta_s$  - Umidade Volumétrica correspondente À saturação de 100%;

$\psi_r$  - Sucção correspondente ao valor de umidade volumétrica residual;

O parâmetro “a”, que tem unidades em kPa, é o ponto de inflexão da função do teor de umidade volumétrico e, geralmente, é ligeiramente maior do que o valor de entrada de ar. O parâmetro “n” controla a inclinação desta função e o parâmetro “m” controla o teor de umidade residual. Os parâmetros de ajuste da curva podem ser obtidos com auxílio de procedimentos gráficos conforme mostrado na Figura 2.13.

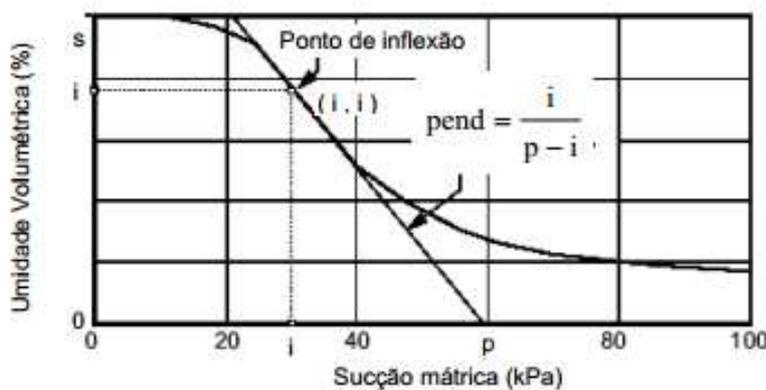


Figura 2.13- Procedimentos Gráficos para obter os parâmetros a, n, m e  $\psi_r$  (adaptado de FREDLUND;XING, 1994)

Os parâmetros a, n, m e s são apresentados por meio das equações 2.17 a 2.20 e :

$$a = \psi_i \quad (2.17)$$

$$m = 3,67 - \ln \left( \frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (2.18)$$

$$n = \frac{1,31^{m+1}}{m\theta_s} 3,72s\psi_i \quad (2.19)$$

$$s = \frac{\theta_1}{\psi_p - \psi_i} \quad (2.20)$$

Em que:

$\psi_i$  - valor de sucção no ponto de inflexão (kPa);

$\psi_p$  - intercepto da linha tangente no eixo da sucção matricial (kPa);

$\theta_i$  - teor de umidade volumétrica no ponto de inflexão;

$\theta_s$  - teor de umidade volumétrico no ponto inicial;

$s$  - inclinação da linha tangente à função que passa pelo ponto de inflexão.

### 2.9.6 Função de Permeabilidade Não Saturada

Fredlund e Rahardjo (1993) ressaltam que a permeabilidade do solo não saturado é função da variação da quantidade de água que o solo apresenta em seus poros. Essa quantidade é refletida pelo grau de saturação ou teor de umidade volumétrico do solo e se relaciona com a sucção por meio da curva de retenção de umidade do solo. A função que descreve a variação do coeficiente de permeabilidade com o teor de umidade volumétrico do solo é chamada função de permeabilidade e depende da forma como o solo retém água.

Foram desenvolvidos vários métodos para determinação da função de permeabilidade com base na teoria envolvendo o fluxo em solos não saturados e em dados empíricos. Os métodos desenvolvidos podem ser classificados em experimentais (laboratoriais ou de campo) e preditivos. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993) os modelos preditivos envolvem relações empíricas entre a função condutividade e a curva de retenção de umidade do solo (CRUS) ou suas propriedades volume-massa.

McCartney e Parks (2009) apontam que apesar de diversos ensaios experimentais (ensaio de coluna, fluxo de saída, permeâmetro centrífugo e vários outros) terem sido criados, os mesmos não são utilizados com grande frequência (exceto no meio acadêmico). Isto seria decorrente do fato de que estimativas confiáveis da permeabilidade não saturada são especialmente difíceis de obter, em parte devido à variabilidade em campo e ao tempo e custos altos que a medição deste parâmetro envolve. Na Tabela 2.4 são apresentados de maneira resumida, alguns dos principais modelos para obtenção da função de permeabilidade não saturada. O modelo preditivo mais utilizado na prática é obtido pela substituição do modelo de Van Genuchten (1980), para a CRUS, no modelo de Mualem (1976), para a função de condutividade (DIAS, 2012).

Tabela 2.4 - Modelos Para Função de Permeabilidade Não Saturada (DIAS, 2012)

<b>Autores</b>	<b>Equação do Modelo</b>	<b>Parâmetros</b>
Richards (1931)	$k(\psi) = a\psi + b$	a e b: parâmetros de ajuste
Gardner (1958)	$k(\psi) = K_{sat}e^{-a\psi}$	a: parâmetro de ajuste (relacionado ao inverso do valor da entrada de ar)
Brooks e Corey (1964)	$k(\psi) = K_{sat}$ , para $\psi \leq \psi_b$ $k(\psi) = K_{sat} \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{-n}$ , para $\psi \geq \psi_b$	$\psi_b$ : valor de entrada de ar n: parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$k(\psi) = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}}\right)^n$	n: parâmetro de ajuste
Van Genuchten (1980) Baseado no modelo de Mualem (1976)	$k(\psi) = K_{sat} \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{\frac{m}{2}}}$	$\alpha$ , m, n: parâmetros de ajuste $m = 1 - \frac{1}{n}$
Van Genuchten (1980) Baseado no modelo de Burdine (1953)	$k(\psi) = K_{sat} \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-2} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{2m}}$	$\alpha$ , m, n: parâmetros de ajuste $m = 1 - \frac{2}{n}$

### 2.9.7 Fluxo de Calor

O fluxo de calor no solo ocorre por meio de três mecanismos: condução, convecção e calor latente:

- condução : transporte de calor entre as partículas de solo através dos fluidos dos poros. Independe do transporte de massa;
- convecção: transporte do calor por meio de transferência de massa nas fases de ar e de vapor e líquida da água;
- calor latente: transporte de calor devido à energia desprendida ou absorvida nas mudanças de fase da água seja de líquida para vapor ou o inverso.

Wilson (1990) simplificou o fluxo de calor em uma equação diferencial, tomando por base a lei de Fourier ( Lei de condução Térmica), obtendo a equação 2.21.

$$\zeta \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_V \frac{\partial m_{IPF}}{\partial t} \quad (2.21)$$

em que:

T - temperatura;

$\lambda$  - condutividade térmica;

$L_V$  - calor latente de vaporização;

$\frac{\partial m_{IPF}}{\partial t}$  - equação geral de continuidade da fase ar

### 2.9.8 Fluxo de Umidade em Solo Não Saturado

O fluxo de umidade é uma combinação do transporte de ar, vapor e água no solo. Conforme apresentado por Ribeiro (2011), para desenvolver as formulações das equações diferenciais de continuidade das fases de ar e de vapor de água se faz o uso da primeira lei de Fick (Equação 2.22).

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial y} \quad (2.22)$$

Esta lei estabelece que a quantidade de material que atravessa uma área unitária perpendicular à direção na qual tem lugar a difusão por unidade de tempo, descrita como "J", é proporcional ao gradiente de concentração  $n$ . O coeficiente de difusão representado por "D" é característico do material em difusão e do meio em que a difusão se processa.

Já as equações diferenciais de continuidade da fase líquida podem ser descritas pela lei de Darcy (Equação 2.23).

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] \quad (2.23)$$

Em que:

$V_w$  - Volume de água que atravessa uma unidade de área;

$K_w$  - Coeficiente de Permeabilidade como uma função da sucção mátrica ( $u_a - u_w$ );

$u_a$  - pressão de ar nos poros;

$u_w$  - Pressão de água nos poros

$h_w = Y + \frac{u_w}{g \cdot \gamma_w}$ ;

Y - Carga de elevação;

$\gamma_w$  - Massa específica da água.

O fluxo de vapor de água é uma resposta a gradientes de pressão na fase ar e são dois os mecanismos responsáveis pelo transporte de vapor na fase ar: difusão e advecção. O mecanismo de difusão de moléculas de água é causado por um gradiente na pressão do vapor de água e é análogo à difusão de um soluto químico em água sob um gradiente de concentração. O mecanismo de advecção é causado por um gradiente de pressão total que provoca o fluxo de ar na estrutura dos poros e pode ser comparado a advecção de um produto químico em água corrente sob um gradiente hidráulico.

Deve-se observar que o fluxo de moléculas de vapor de água não é restrito ao ar contido nos poros do solo não saturado. Moléculas de vapor de água também podem fluir para ou da fase líquida contida nos poros do solo não saturado. Esse fluxo que se dá através da película contrátil (ou menisco) é definido como fluxo de interface e deve ser considerado juntamente com os mecanismos de difusão e advecção (RIBEIRO, 2011).

Tomando por base as leis descritas pelas equações 2.22 e 2.23 e considerando difusão, advecção, fluxo de vapor de água, fluxo através da interface (membrana contrátil) e transpiração da vegetação, é possível obter as equações gerais de continuidade das fases ar e líquida. Para descrever o fluxo transiente de água líquida, vapor de água e calor no solo é preciso resolver simultaneamente quatro equações de continuidade referentes a fase líquida, fase ar e fluxo de calor. Esta resolução é trabalhosa e exige a utilização de parâmetros difíceis de serem obtidos. Portanto, Wilson (1990) simplificou a descrição do fluxo transiente em apenas duas equações diferenciais acopladas (2.24 e 2.25). Wilson (1990) propôs duas hipóteses para minimizar a complexidade das equações. A primeira hipótese é do ar nos poros do solo ser contínuo. Neste caso sua pressão é constante e igual à pressão atmosférica. A segunda hipótese consistiu em desprezar o fluxo na interface água líquida-vapor e considerar a variação da pressão nos poros igual à variação da pressão de vapor.

- Fluxo de Umidade

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w^1 \frac{\partial}{\partial y} \left( k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + C_w^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (2.24)$$

em que:

$D_v$  - coeficiente de difusão do calor;

$P_v$  - pressão do vapor de água;

$$C_w^1 = \frac{1}{(\gamma_w)^2 g m_w^2};$$

$g$  - aceleração da gravidade;

$m_2^w$  – inclinação da curva de retenção de umidade;

$$C_w^2 = \frac{(P+P_V)}{P(\gamma_w)^2 g m_2^w};$$

P = pressão de ar na fase gás.

- Fluxo de Calor

$$C_V \gamma_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_V \left( \frac{P+P_V}{P} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left( D_V \frac{\partial P_V}{\partial y} \right) \quad (2.25)$$

onde:

$C_V \gamma_s$  - calor específico volumétrico

T - temperatura do solo;

$\lambda$  - condutividade térmica;

$L_V$  - calor latente de vaporização (J/kg).

### 2.9.9 Cálculo de Evaporação e Transpiração

Penman (1948) propôs um método de cálculo de evaporação baseado no balanço de energia do solo. Este método é bastante prático, pois necessita apenas de parâmetros meteorológicos rotineiros, tais como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Segundo Ribeiro (2011), apesar da vantagem referente à facilidade na obtenção dos parâmetros, o método possui uma limitação considerável, uma vez que calcula o potencial de evaporação máximo assumindo que o solo está saturado e, portanto, superestima a evaporação de solos não saturados.

Wilson (1990) apresentou uma adaptação ao método de Penman (1948) a partir do conhecimento da umidade relativa na superfície do solo não saturado e obteve a equação 2.26.

$$E = \frac{\Gamma Q + E_a v}{\Gamma + v A} \quad (2.26)$$

em que:

$$E_a = f(u) e_a (B - A);$$

$$f(u) = 0.35(1 + 0.15 U_a);$$

$U_a$  - velocidade do vento;

$e_a$  - pressão de vapor no ar acima da superfície do solo;

$$A = \frac{1}{h_r};$$

$h_r$  - umidade relativa na superfície do solo;

$$B = \frac{1}{h_a};$$

$h_a$  - umidade relativa do ar (%)

A parcela da energia absorvida pelas plantas pode ser considerada para reduzir a evaporação apresentada na equação 2.26 e resulta na equação 2.27.

$$E = \frac{\Gamma Q + E_a v}{\Gamma + v A} \exp(-0,4 \cdot IAF) \quad (2.27)$$

Na equação 2.27, a sigla IAF representa o índice de área foliar.

A transpiração real proposta por Wilson et al. (1994) é calculada conforme apresentado na equação 2.28.

$$T_r = \frac{2[E(-0,21+0,7\sqrt{IAF})]}{R_t} \left(1 - \frac{y}{R_t}\right) A_n FPM \quad (2.28)$$

em que:

$R_t$  - espessura total da zona de raiz

$y$  - profundidade do ponto em questão;

$A_n$  - área de contribuição do ponto em questão

FPM - função que relaciona a capacidade da planta retirar água do solo com a sucção do solo

O fluxo de água é definido pela diferença entre precipitação e a evapotranspiração, calculada pela soma das equações 2.27 e 2.28. Se esse balanço for negativo, um fluxo negativo (evaporativo) é aplicado na superfície. Se o balanço for positivo, um fluxo positivo (infiltração) é aplicado na superfície, o problema é resolvido e as cargas de pressão na superfície são calculadas. Ainda no mesmo intervalo de tempo, o problema volta a ser resolvido, só que com a condição de cargas de pressão prescritas na superfície ao invés de fluxo prescrito. Nessa condição, o fluxo na superfície é calculado e a solução é repetida até que a carga de pressão aplicada gere um fluxo igual à infiltração. Quando isso ocorre, o escoamento superficial é calculado igual à precipitação, menos a soma da evapotranspiração com a infiltração, e a solução prossegue para um novo intervalo de tempo (RIBEIRO, 2011).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram construídos experimentos de campo em escala real com o objetivo de avaliar o desempenho de coberturas evapotranspirativas para o reservatório de rejeitos, visando um cenário futuro do fechamento da mina (MFB). Esses experimentos consistem em três sistemas de cobertura que simulam duas soluções distintas, para serem aplicadas futuramente sobre a superfície do reservatório de rejeitos. O monitoramento dos experimentos foi realizado por meio de sensores medidores de umidade para meios porosos, e medidores de vazão, tanto para o escoamento superficial, quanto para a água percolada através da cobertura. Após o monitoramento dos experimentos durante aproximadamente um ano, passando por estações chuvosas e de estiagem, os resultados medidos em campo foram analisados e comparados aos resultantes da modelagem numérica computacional realizada com auxílio do software VADOSE/W.

O experimento apresentado nesse estudo foi construído dentro das dependências da Mineração Fazenda Brasileiro (MFB), localizada no estado da Bahia ao norte do município de Barrocas e a oeste do município de Teofilândia. A mina fica a uma distância aproximada de 250 km de Salvador, conforme apresentado na Figura 3.1. O acesso é feito pelas rodovias BR-324 partindo da capital baiana e BR-116 até a cidade de Teofilândia, onde existe uma estrada não pavimentada de aproximadamente 12 km que leva até a MFB.

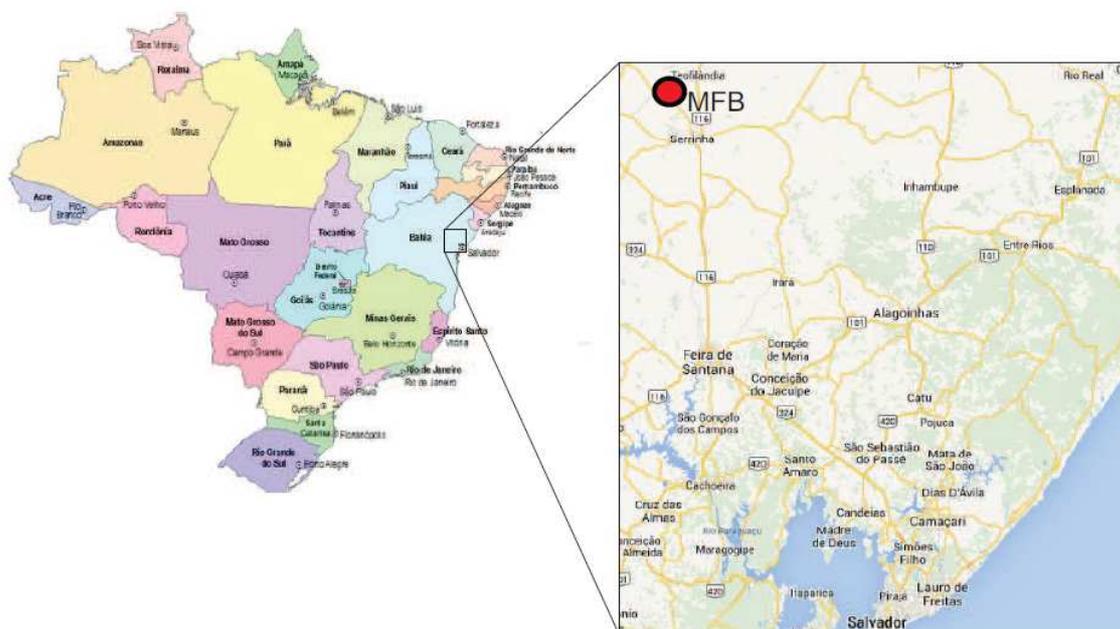


Figura 3.1 - Localização da Área do Experimento (adaptado de Baixar Mapas, 2013).

A MFB se dedica à produção de ouro a partir da lavra subterrânea de minério sulfetado e da lavra a céu aberto de minério oxidado. O sistema de deposição de resíduos da usina hidrometalúrgica da

mina de ouro da MFB está em operação desde 1988 e atualmente é de propriedade da empresa Yamana Gold.

O reservatório é formado por um conjunto de barramentos sequenciados em vale, que originaram três lagos nomeados de montante para jusante como: lago 3, lago 1, lago 2. Todos os reservatórios foram impermeabilizados com geomembranas na época de sua implantação, para evitar ou reduzir o contato do rejeito com o solo natural e, conseqüentemente, a contaminação do lençol freático. A área de implantação dos experimentos está a uma distância aproximada de 40m do reservatório de rejeitos, conforme apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Localização do experimento e do reservatório de rejeitos. (adaptado do Google Earth Mapas, 2014)

A metodologia adotada consiste basicamente no dimensionamento de um sistema de cobertura evapotranspirativa em solo por meio de modelagem numérica e experimentos de campo. A metodologia pode ser resumida em cinco etapas: reconhecimento e caracterização da área de estudo, modelagem numérica preliminar, concepção dos experimentos e seus instrumentos de monitoramento, construção do experimento, monitoramento e avaliação dos dados. Nos subitens seguintes são descritas detalhadamente as etapas da metodologia que resultou no dimensionamento do sistema de cobertura.

### ***3.1 Reconhecimento das Características Locais e Caracterização da Área de Estudo***

A caracterização da área de estudo fornece dados primordiais para a definição dos tipos de sistema de cobertura mais adequados a serem adotados. A partir de alguns dados iniciais é possível esboçar

soluções e criar sensibilidade quanto às espessuras das camadas por meio de modelagem numéricas preliminares. De posse dos dados obtidos nessa etapa é possível avaliar a viabilidade técnico/financeira das soluções consideradas, e planejar a construção de experimentos.

O ponto de partida do estudo foi uma visita inicial à mina com o objetivo de compreender o panorama geral do funcionamento do sistema de disposição de rejeitos. Foi realizado um reconhecimento superficial do sítio por meio de inspeção visual, para identificação de potenciais áreas de material de empréstimo para ser utilizado na construção da cobertura dos rejeitos. Após o reconhecimento tátil-visual dos materiais disponíveis, foram definidos pontos de coleta de amostras deformadas para realização de ensaios de caracterização dos solos.

Ao se percorrer a região das barragens, foi possível verificar que o rejeito depositado nas "praias" nos lagos 2 e 1 apresentavam-se secos e com capacidade de suporte aparentemente suficiente para tráfego de pessoas e máquinas. Além disso, foram coletadas amostras deformadas de rejeito em alguns pontos do reservatório para realização de ensaios de laboratório.

O entendimento do sítio e de suas características peculiares é essencial para a definição da cobertura e, por esse motivo, todas as informações existentes foram analisadas como, por exemplo, estudos anteriores referentes à hidrologia, hidrogeologia, investigações geotécnicas, estudo de impacto ambiental, mapas topográficos, etc.

### **3.1.1 Materiais Disponíveis**

Conforme apresentado no estudo de impacto ambiental (NATRON Consultoria e Projetos, 1986), a superfície da região da mina é formada por uma camada de solo coluvionar silto argiloso de pequena espessura (0,1m a 3,0m). Imediatamente abaixo dessa camada ocorre um solo de alteração de rocha, com espessura variável entre quase inexistente até 8m de profundidade, com textura areno siltosa e que preserva parte da estrutura da rocha matriz. Apenas o solo da camada superior foi considerado adequado para ser utilizado como cobertura, uma vez que o material existente abaixo dessa camada é um solo residual jovem com preservação da estrutura da rocha matriz. A pequena espessura de camada de solos na região pode ser considerada como um reflexo do baixo grau de intemperização causado pela condição climática árida.

A indisponibilidade de solo com características adequadas (parcela significativa de "finos") para a execução do sistema de cobertura foi identificada como um problema na área da mina e seu entorno. A camada de solo silto argiloso existente resultaria em um volume reduzido e insuficiente

para cobrir o reservatório da barragem. Nas proximidades (raio de 50 km aproximadamente), não existem áreas de empréstimo para solo com percentual argiloso significativo.

Foram identificadas pilhas de lixiviação desativadas na área da mina e o levantamento volumétrico do mesmo foi disponibilizado pela mineradora. O material é chamado de "heap leach" pelos funcionários da mineradora e nesta dissertação. Foi possível observar por meio de análise tátil-visual que o material, apesar de conter pedregulhos, também apresentava uma fração considerável de silte e argila. Foram então coletadas amostras deformadas para realização de ensaios geotécnicos de laboratório.

Além do rejeito e do "heap leach", também foi possível identificar a disponibilidade de material rochoso depositado em pilhas de estéril. Esse material foi identificado como potencialmente útil na construção de camadas de material pedregulhoso para construção de barreira capilar.

Com as amostras coletadas no reservatório da barragem de rejeito e nas pilhas de lixiviação, foram realizados ensaios de caracterização (distribuição granulométrica, massa específica dos sólidos, limites de Atterberg), ensaios de compactação, ensaios para obtenção de permeabilidade saturada e ensaios para a determinação das curvas de retenção de água (papel filtro e centrífuga). Os resultados obtidos em laboratório para a caracterização do "heap leach" e do rejeito foram resumidos na Tabela 3.1 e estão apresentados nos Gráficos 3.1 a 3.4.

Tabela 3.1 -Resumo da Caracterização e Ensaio de Compactação

MATERIAL	CARACTERIZAÇÃO							COMPACT.	
	Lim. Liq. (%)	Lim. Plast. (%)	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Granulometria (%)				$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>ótima</sub> (%)
				Pedregulho	Areia	Silte	Argila		
Heap Leach	32,09	16,76	2,83	30	45	15	10	19,58	10,5
Rejeito	NP	NP	2,91	0	62,2	35,8	2,0	17,12	18,0

Os ensaios para obtenção das curvas de retenção de água foram realizados por meio dos métodos de papel filtro e centrífuga. O ajuste da curva de retenção de umidade foi obtido com a utilização do método de Van Genuchten (1980).

A partir dos resultados obtidos do ensaio de permeabilidade saturada e de posse das curvas de retenção, foi possível obter as funções de permeabilidade não saturada em função da sucção utilizando o modelo de Van Genuchten (1980). Os resultados obtidos para as propriedades hidráulicas do rejeito e do "heap leach" podem ser visualizados no Gráfico 3.5 e no Gráfico 3.6.

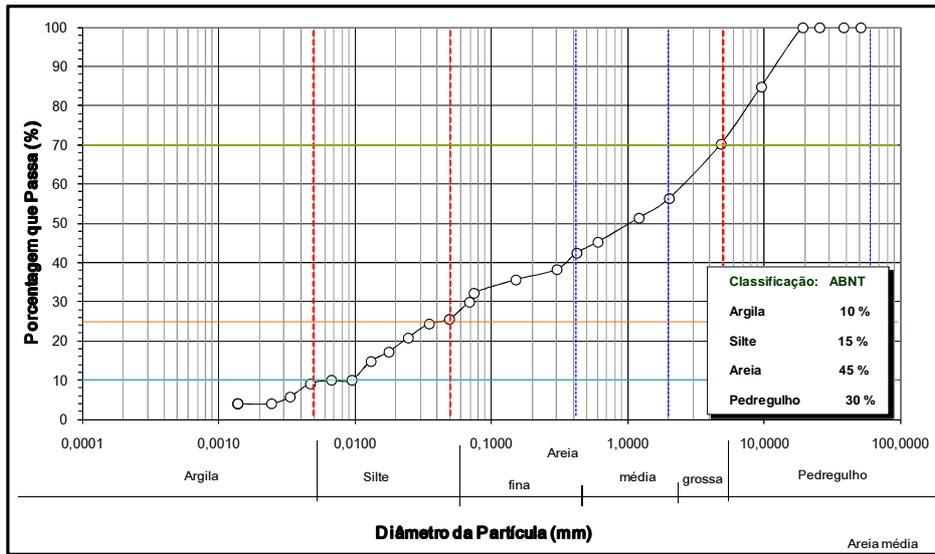


Gráfico 3.1 - Curva granulométrica do “heap leach”

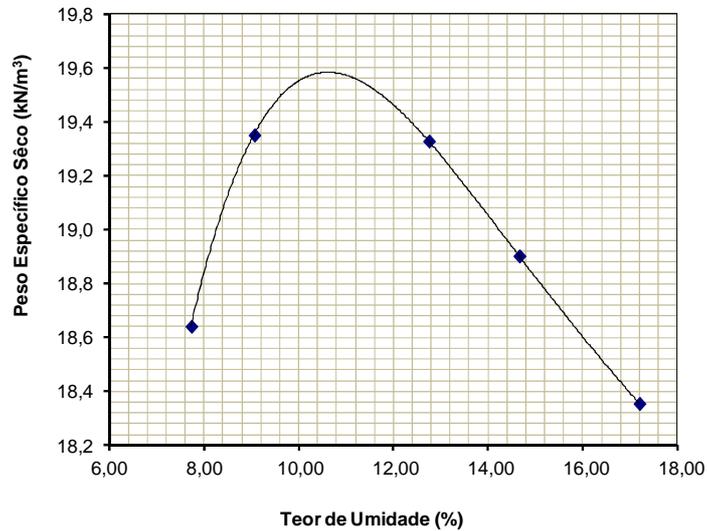


Gráfico 3.2 - Curva de compactação do “heap leach”

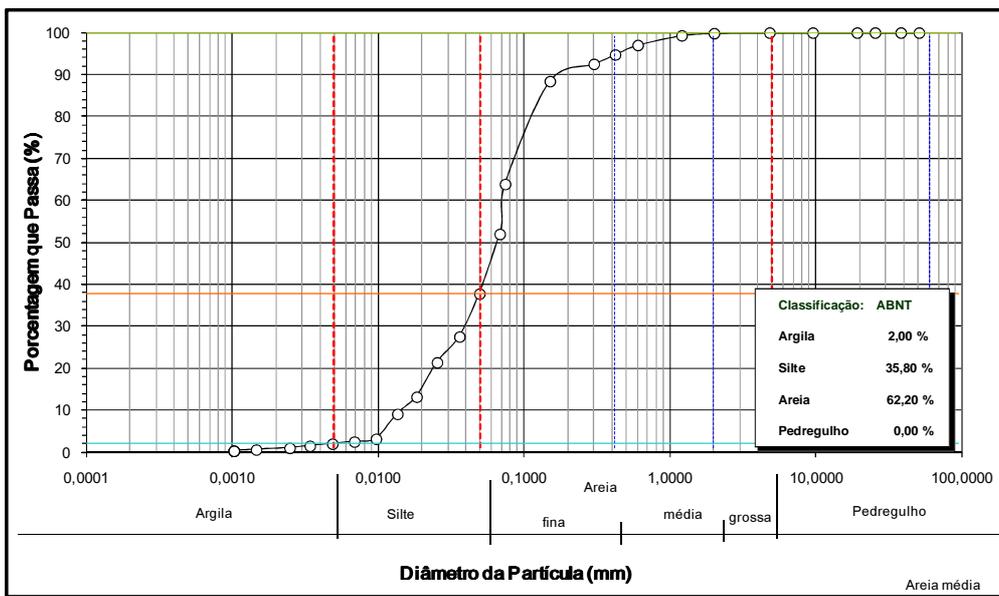


Gráfico 3.3 - Curva granulométrica do rejeito.

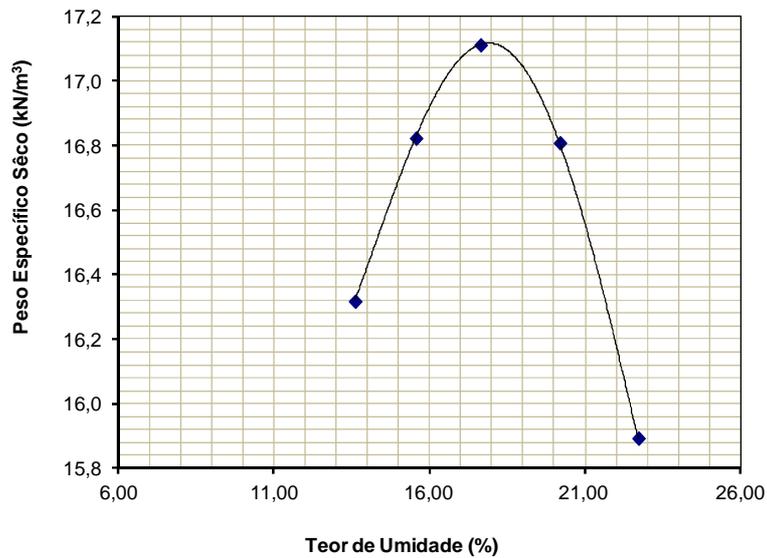


Gráfico 3.4 - Curva de compactação do rejeito.

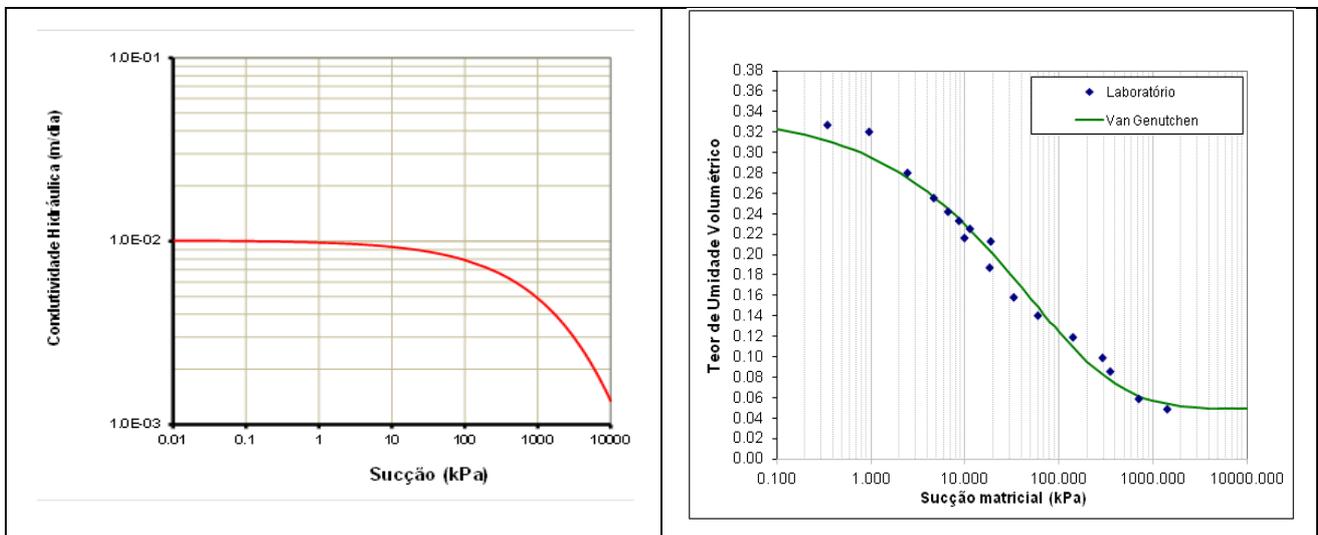


Gráfico 3.5 - Resultado dos ensaios para determinação das propriedades hidráulicas, curvas de condutividade hidráulica e retenção de água do "heap leach".

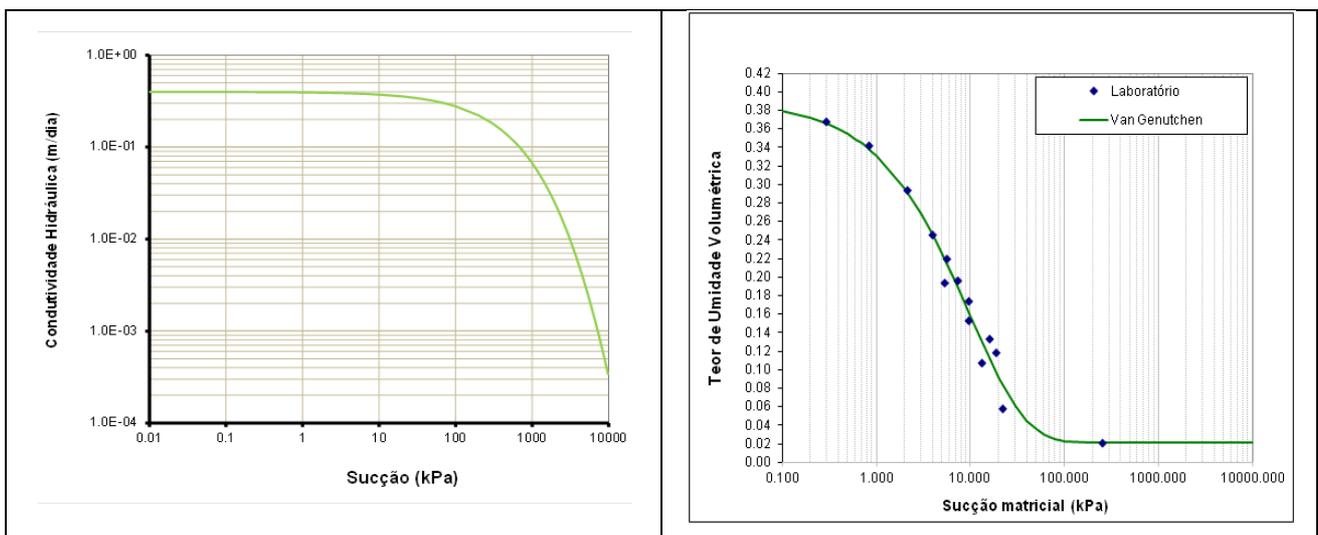


Gráfico 3.6 - Resultado dos ensaios para determinação das propriedades hidráulicas, curvas de condutividade hidráulica e retenção de água do rejeito.

O material rochoso das pilhas de estéril da MFB foi considerado para utilização como material da barreira capilar. O estéril se apresenta na mina com granulometria variada e para a utilização como barreira capilar, foi britado se transformando em um material pedregulhoso do tipo brita 01 (variando de 9,5mm a 19 mm). Para esse material não foram realizados ensaios para obtenção de características hidráulicas, tendo sido adotados valores do banco de dados do VADOSE/W para materiais semelhantes.

### 3.1.2 Clima

Os dados meteorológicos disponibilizados pela MFB compreendem o período de 1992 a 2012, a partir dos quais foi possível identificar a tendência de a evaporação média anual ser superior à pluviometria anual. Conforme pode ser observado na Figura 3.2, a estação meteorológica instalada nas dependências da MFB fica localizada próxima à área dos escritórios e distante cerca de um quilômetro do experimento.

O clima da região pode ser classificado como semiárido, apresentando valores típicos de pluviometria média anual de 650 mm (calculada entre os anos de 1992 a 2011) e evaporação média anual de 1580 mm. Para o período meteorológico disponibilizado, o ano de 2010 apresentou a maior média de pluviometria e os valores medidos para o mesmo ano foram apresentados no Gráfico 3.7.

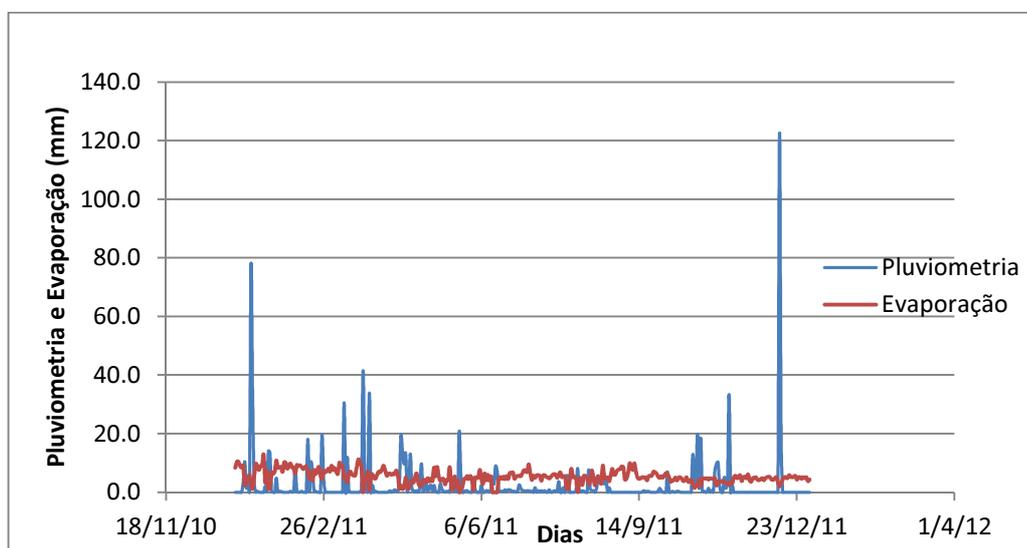


Gráfico 3.7 - Pluviometria e Evaporação registradas no ano de 2010 na estação da MFB.

### 3.1.3 Vegetação

As vegetações nativas, identificadas em NATRON CONSULTORIA E PROJETOS (1986), possuem raízes muito profundas, consideradas não adequadas para o sistema de cobertura. Em uma segunda visita realizada ao sítio, foi identificada uma vegetação exótica rasteira que havia se

disseminado na região da barragem. A profundidade de suas raízes foram medidas em campo e atingiam valores de até 30 cm de profundidade. Essa vegetação é chamada localmente de "capim-burro", tem o nome científico de *Cynodon Dactylon* e foi adotada como cobertura vegetal para o experimento.

### **3.2 Modelagem Numérica Preliminar**

Após a caracterização do sítio, foi possível definir alguns conceitos considerados adequados ao clima e a quantidade de material disponível. Conforme observado no item 2.5.2 e na Figura 2.7, para climas semiáridos as coberturas evapotranspirativas (ET) são consideradas mais adequadas e eficientes. Por esse motivo, coberturas do tipo ET foram adotadas como a solução mais viável para cobrir o reservatório de rejeito em estudo.

Dada a escassez de solo disponível na região, o "heap leach" foi adotado como o material para a construção da camada de armazenamento e liberação da cobertura. O volume disponível era suficiente para executar uma camada de aproximadamente 50 cm de espessura no reservatório da barragem. Para potencializar a capacidade do sistema de cobertura, o material rochoso identificado no sítio foi utilizado como barreira capilar.

Foram previstos dois conceitos de cobertura para o experimento, o primeiro deles (conceito 01) é composto basicamente por duas camadas, a superior com 40 cm de espessura, era formada pelo "heap leach" medianamente compactado, de modo a possibilitar o armazenamento e a liberação de água. Subjacente à camada do topo, propôs-se a execução de uma camada de barreira capilar formada pelo estéril rochoso britado. Devido ao reduzido volume de solo orgânico disponível no sítio, não se considerou a utilização de uma camada desse tipo de material para disseminação de vegetação na superfície da cobertura. Apesar disso, o "heap leach" se mostrou em campo capaz de servir de substrato para vegetações rasteiras.

O segundo sistema de cobertura (conceito 02) proposto é um misto de cobertura com solo e geomembrana. A necessidade da concepção dessa solução surgiu devido à possibilidade de redução do volume de "heap leach" disponível na MFB. No passado, dada a escassez de solo para construção, o "heap leach" foi utilizado para construir barramentos e acessos. Existe a possibilidade de esse material continuar a ser utilizado no futuro como material de construção na mina. A solução consiste em uma camada de "heap leach" menos espessa, totalizando 25 cm de espessura, e abaixo da mesma foi concebida uma camada de barreira capilar com 15 cm de espessura. Devido à pequena espessura da camada de armazenamento e liberação, foi proposta a utilização de uma

geomembrana entre a barreira capilar e o rejeito com o intuito de barrar a passagem de água para o rejeito.

Foram modelados no software VADOSE/W os dois conceitos de cobertura propostos. Os dados de entrada que alimentam o programa são apresentados a seguir:

### **3.2.1 Dados Climáticos**

O ano de 2010 foi o ano com maior média pluviométrica anual no período analisado e, por este motivo, seus dados pluviométricos foram utilizados para alimentar a modelagem numérica. Além da pluviometria e evaporimetria diária (mm/dia), também são dados de entrada diários as temperaturas máxima e mínima (°C), a velocidade média dos ventos (km/h), a radiação solar [MJ/(m<sup>2</sup>/dia)] e as umidades relativas do ar máxima e mínima (%). Todos os dados foram fornecidos pela estação meteorológica da MFB, com exceção da radiação solar, que é estimada automaticamente pelo VADOSE/W, de acordo com a latitude do local.

### **3.2.2 Dados Relacionados à Vegetação**

Os dados relativos à vegetação foram adotados entre aqueles do banco de dados do software VADOSE/W, dada a dificuldade de sua obtenção para a vegetação estabelecida. Os parâmetros relativos à vegetação são: período de crescimento da vegetação ao longo do ano; ponto de murcha (kPa); índice de área foliar; profundidade da raiz (cm). A profundidade da raiz do "capim-burro" foi medida em campo, por meio da escavação de uma pequena trincheira, tendo-se obtido um valor aproximado de 30 cm.

### **3.2.3 Propriedade dos Materiais**

As propriedades dos materiais foram obtidas por meio dos ensaios de laboratório para o "heap leach" e para o rejeito. As propriedades inseridas no VADOSE/W como dados de entrada foram:

- Curva de Retenção de Umidade: definidos em laboratório;
- Permeabilidade Saturada x Sucção: obtida por meio do método de Van Genuchten (1980) a partir da curva de retenção e da permeabilidade saturada;
- Propriedades Térmicas (Condutividade Térmica x Teor de Umidade Gravimétrica e Calor Específico Volumétrico x Teor de Umidade gravimétrica): adotadas funções típicas do banco de dados do programa VADOSE/W ou valores típicos para materiais semelhantes apresentados em Geo-Studio (2008).

### 3.2.4 Modelagem da geometria e Condições de Contorno

Ambas as soluções foram modeladas com geometria em colunas e discretizadas em elementos finitos retangulares, de modo a proporcionar uma análise unidimensional da cobertura conforme apresentado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Malha de elementos finitos da modelagem numérica com nós representados como pontos vermelhos.

Foram modeladas colunas verticais com 1,0m de largura e os elementos infinitesimais retangulares com 1,0m de largura e 0,025m de altura. Acredita-se que a modelagem unidimensional obtida represente adequadamente os lisímetros, pois a área a ser coberta é muito superior a espessura da cobertura. Foram impostas algumas condições de contorno como dados climáticos na superfície (temperatura, precipitações, evaporação, etc.) e carga hidráulica (poropressão) igual a zero na base do rejeito.

O resultado da modelagem inicial para os sistemas de cobertura foram considerados adequados para a simulação das condições climáticas observadas em 2010. Com base nos valores encontrados, foi possível observar que houve variação de umidade na camada de “heap leach” (armazenamento e liberação) ao longo do ano simulado, porém a umidade do rejeito manteve-se inalterada no mesmo período. Na Figura 3.4 encontram-se as variações observadas.

A partir dos resultados obtidos para a solução proposta, foi possível elaborar um projeto para os experimentos de campo.

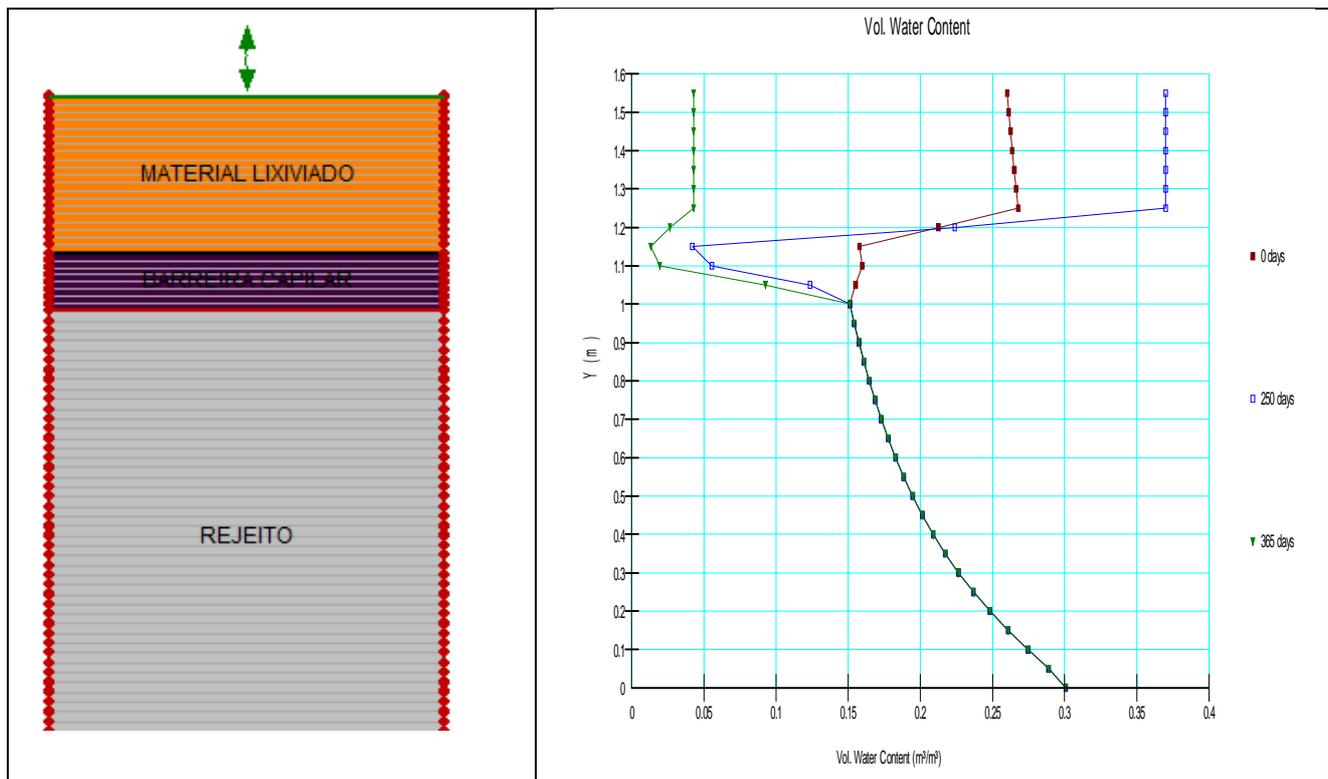


Figura 3.4 - Variação da umidade na cobertura durante a simulação do ano de 2010

### 3.3 *Concepção de Experimento de Campo em Escala Real*

Foram construídos três experimentos em escala real para avaliar o comportamento dos dois conceitos de coberturas propostos (item 3.2) frente às condições climáticas reais do sítio. A quantidade de experimentos é maior do que o número de soluções analisadas porque em dois deles foi adotado o mesmo conceito de cobertura, porém com condições de contorno diferentes, conforme será explicado adiante.

#### 3.3.1 *Apresentação dos Experimentos*

Foram concebidos três sistemas de cobertura experimentais, posicionados lado a lado e próximos à barragem de rejeitos existente. Cada experimento funcionou como um sistema de cobertura isolado, sendo separados um do outro na superfície por meio de leiras. Os lisímetros foram numerados de 01 a 03, conforme mostrado no esquema das Figuras 3.5 e 3.6.

Cada lisímetro é uma grande bacia escavada e impermeabilizada com geomembrana PEAD com 1,5 mm de espessura que, posteriormente, foi preenchido com rejeito no fundo e sistemas de coberturas no topo. Cada lisímetro tem área da base de 120 m<sup>2</sup> (12m x 10m) e área do topo de aproximadamente 205 m<sup>2</sup>.

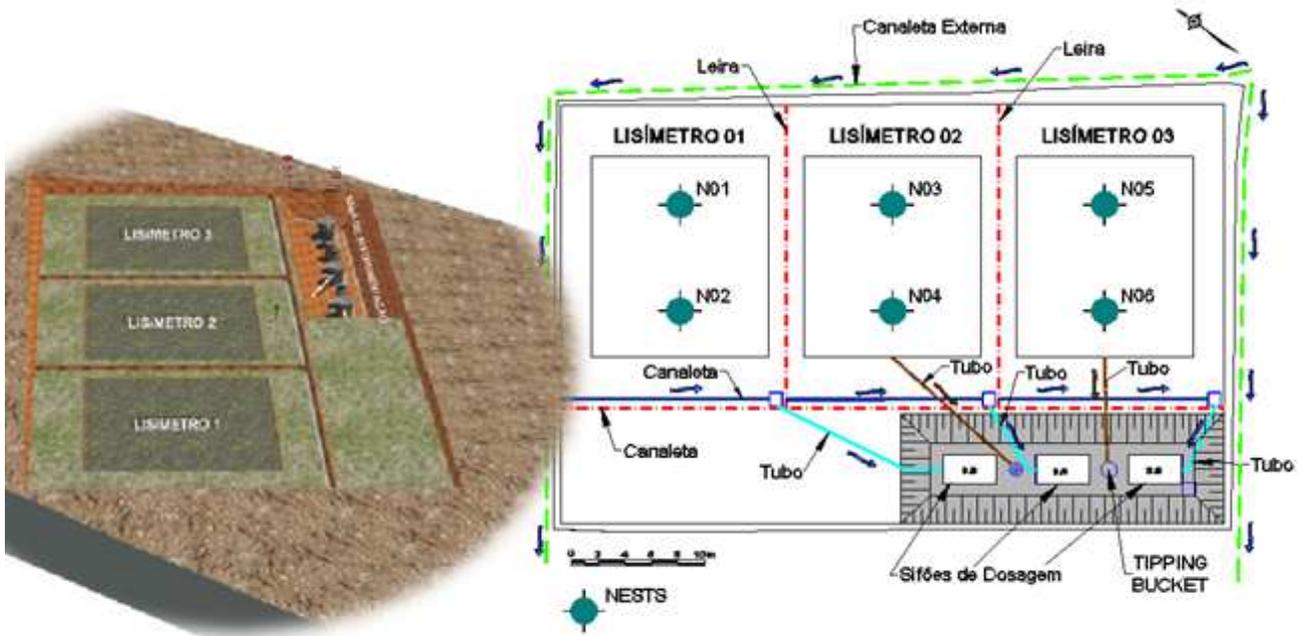


Figura 3.5 - Esquema do Experimento

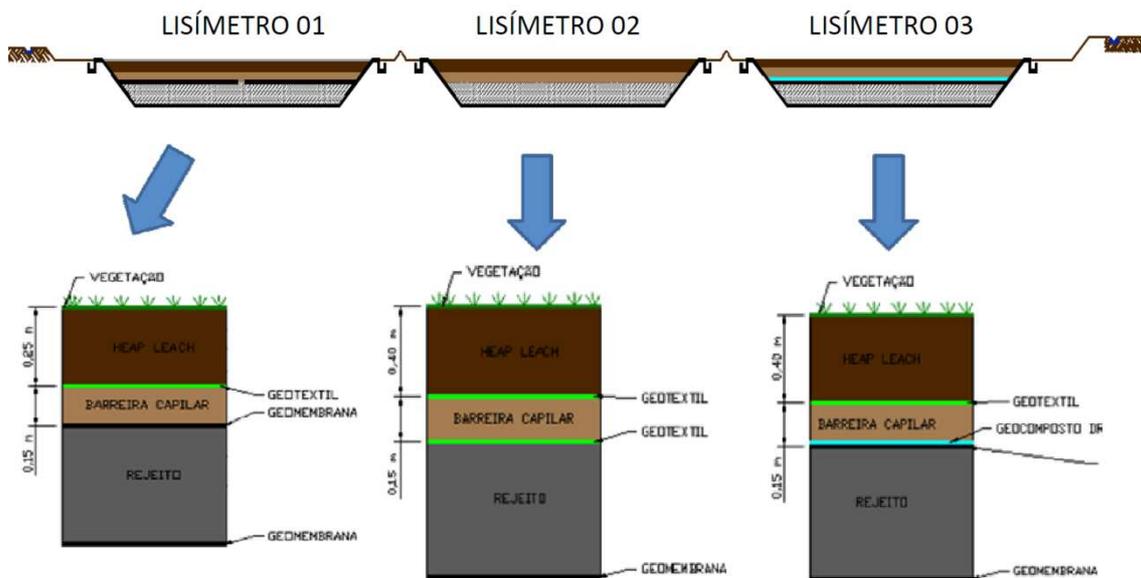


Figura 3.6 - Seção Transversal e perfis esquemáticos dos lisímetros.

No lisímetro 01 foi adotada a concepção de um sistema de cobertura misto, conforme o segundo conceito 02 apresentado no item 3.2. De acordo com o esquema ilustrado na Figura 3.7, a cobertura é composta por uma camada de 25 cm de espessura de “heap leach” medianamente compactado no topo, seguida logo abaixo por uma camada de barreira capilar.

Devido à espessura reduzida da camada de solo, foi concebida e implantada uma geomembrana de PEAD de 1,5mm de espessura entre a barreira capilar e o rejeito. Furos e falhas podem ocorrer em geomembranas e, de acordo com Forget et al. (2005), a incidência varia de 5 a 25 furos por hectare para a espessura de 5 mm. Foram feitos dois furos intencionais nessa geomembrana com o intuito

de simular eventuais falhas que poderiam acontecer, caso esse sistema fosse aplicado ao reservatório de rejeito da mina.

Foi colocado um geotextil de separação na interface entre a camada de “heap leach” e a barreira capilar para evitar que partículas finas do solo migrassem para a barreira capilar e a colatassem.

Os lisímetros 02 e 03 representam o mesmo conceito de cobertura (citado em 3.2 como conceito 01), composta pela camada de armazenamento e liberação (“heap leach”) no topo, sobrejacente à barreira capilar. Como o lisímetro 03 tem a função principal de coletar a água de percolação na base da cobertura, foram colocados um geocomposto drenante e uma geomembrana na interface entre a cobertura e o rejeito. Deste modo, no lisímetro 03, a água que chega à base da cobertura é coletada pelo geocomposto drenante e direcionada para um medidor de vazão. Apesar de nesse lisímetro ser possível medir a vazão que passa para o rejeito, a geomembrana instalada juntamente com o geocomposto drenante não permite a interação entre o rejeito e a cobertura. Com a ausência dessa interação não é possível avaliar o fluxo de umidade ascendente do rejeito para a cobertura e, para solucionar esse problema, foi concebido o lisímetro 02, no qual não há a coleta de percolado na interface cobertura rejeito. Na Figura 3.8 encontra-se o perfil esquemático das camadas de ambos os lisímetros. A espessura da camada de “heap leach” para esses experimentos é maior do que aquela proposta para o lisímetro 01, e mede cerca de 40 cm. Assim como foi feito para o lisímetro 01, foi incluído um geotextil entre as camadas de heap leach e barreira capilar.

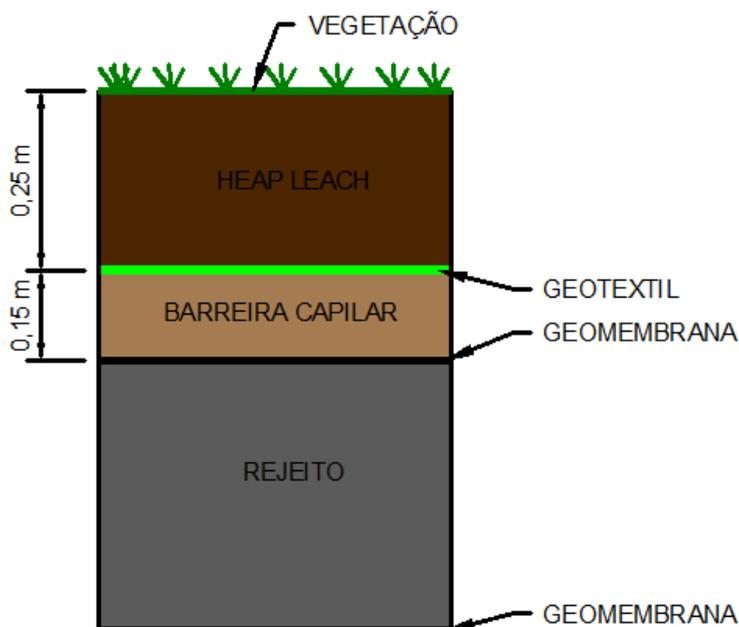


Figura 3.7 - Perfil esquemático contemplando as camadas do Lisímetro 01.

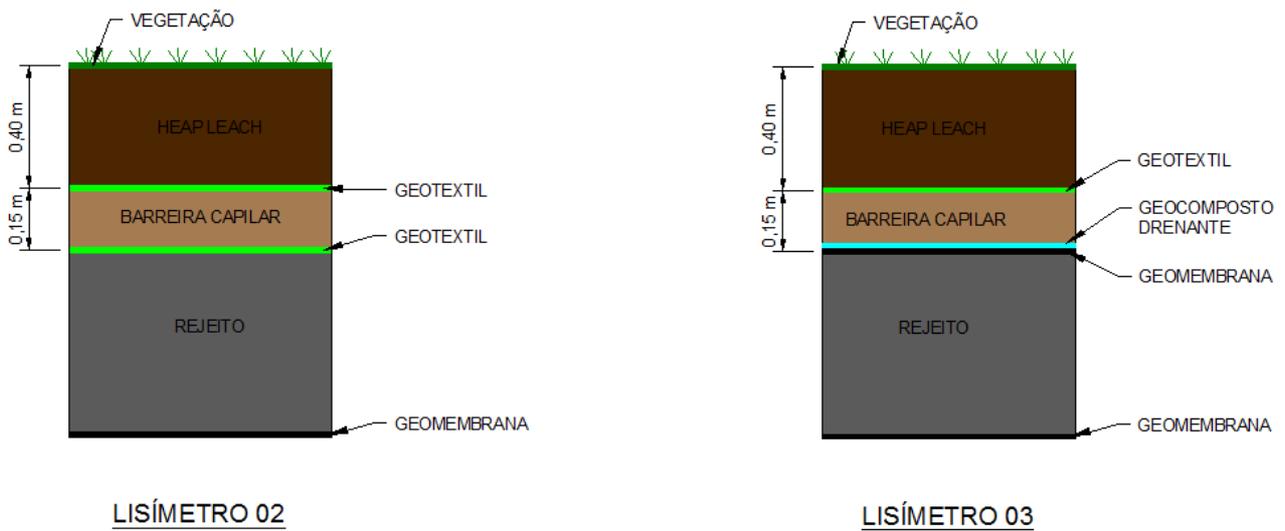


Figura 3.8 - Perfis esquemáticos dos lisímetros 02 e 03.

A superfície dos lisímetros possui inclinação de aproximadamente 3% para favorecer o escoamento superficial e representar a declividade que se espera aplicar ao reservatório de rejeito quando de seu fechamento. O fundo dos lisímetros e as camadas que os compõem também apresentam declividade de 3% (Figura 3.9). Canaletas periféricas foram instaladas a montante da área dos experimentos e nas laterais com o intuito de coletar as águas de escoamento superficial externas ao experimento e desviá-las. O sistema de canaletas periféricas e as leiras são responsáveis por isolar as áreas de contribuição para escoamento superficial do lisímetro. Cada lisímetro tem uma área de contribuição de drenagem superficial de aproximadamente 400 m<sup>2</sup>.

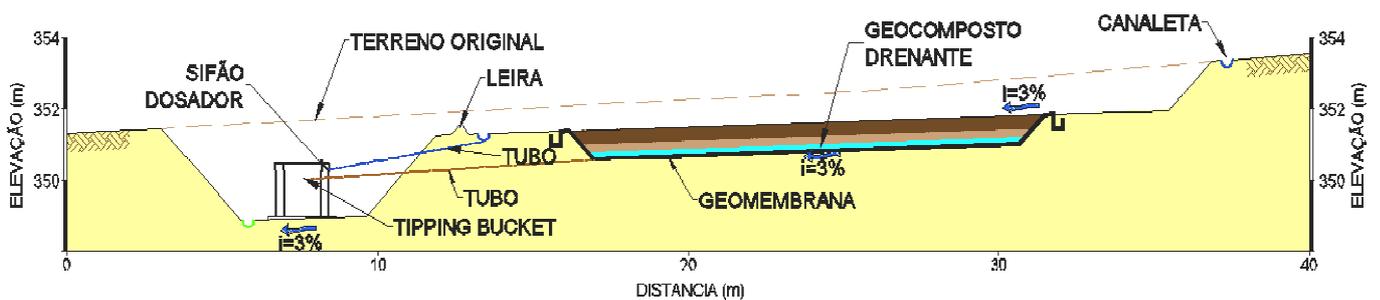


Figura 3.9 - Seção transversal do lisímetro 3

### 3.3.2 Instrumentação

A instrumentação instalada nos experimentos pode ser dividida em dois grupos, sendo eles os medidores de vazão e os medidores de umidade.

## 1) Medidores de Umidade

Os sensores de umidade utilizados, chamados de Water Content Reflectometer (WCR), são aparelhos que determinam indiretamente a umidade do meio poroso no qual estão inseridos. O princípio de funcionamento do sensor se dá pela emissão de um pulso eletromagnético que é propagado ao longo das hastes a uma velocidade que depende da permissividade dielétrica do meio em que o sensor está inserido. A permissividade é determinada pela habilidade de um material de se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado. Deste modo, com o aumento da umidade volumétrica, a velocidade de propagação reduz, pois a polarização das moléculas de água leva mais tempo. O sinal viaja pelas hastes e ao chegar ao seu fim é refletido e volta para sua base. Quando o sinal retorna à base, um novo pulso é emitido e assim se forma um ciclo. O período é o tempo medido entre o envio do pulso e o retorno do sinal, portanto quanto maior a umidade volumétrica do solo, mais lento é o pulso e maior é o período. Para cada período lido é possível associar um teor de umidade volumétrico.

A permissividade dielétrica não depende apenas da umidade, mas também da mineralogia e estrutura do solo. Por isso, conforme informado no manual do equipamento Campbell Scientific Inc. (2014), os WCRs requerem calibração para os solos em que serão inseridos. O modelo utilizado no experimento é formado por duas hastes metálicas de 300 mm de comprimento e 3,2 mm de diâmetro presas a uma base rígida, conforme apresentado na Figura 3.10.

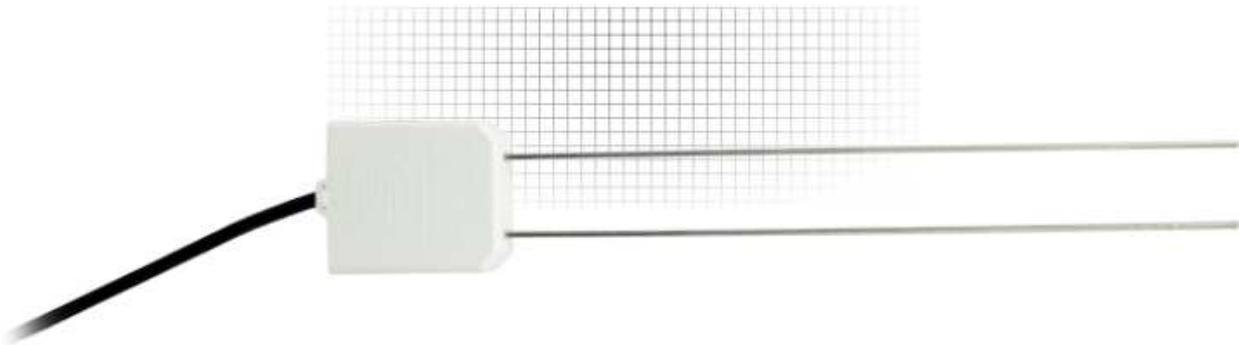


Figura 3.10 - Sensor de Umidade WCR. (adaptado de Campbell Scientific Inc, 2014)

Em cada lisímetro foram instalados WCRs em duas colunas verticais, nas quais os aparelhos foram cravados em diferentes profundidades. Essas colunas foram numeradas de N01 a N06, conforme mostrado na Figura 3.5. Foram propostas duas colunas por lisímetro para permitir a comparação da variação de umidade em uma mesma profundidade no mesmo experimento, tendo em vista possíveis incoerências nos dados coletados. No total, foram instalados 32 sensores dispostos em cada lisímetro, conforme apresentado na Figura 3.11.

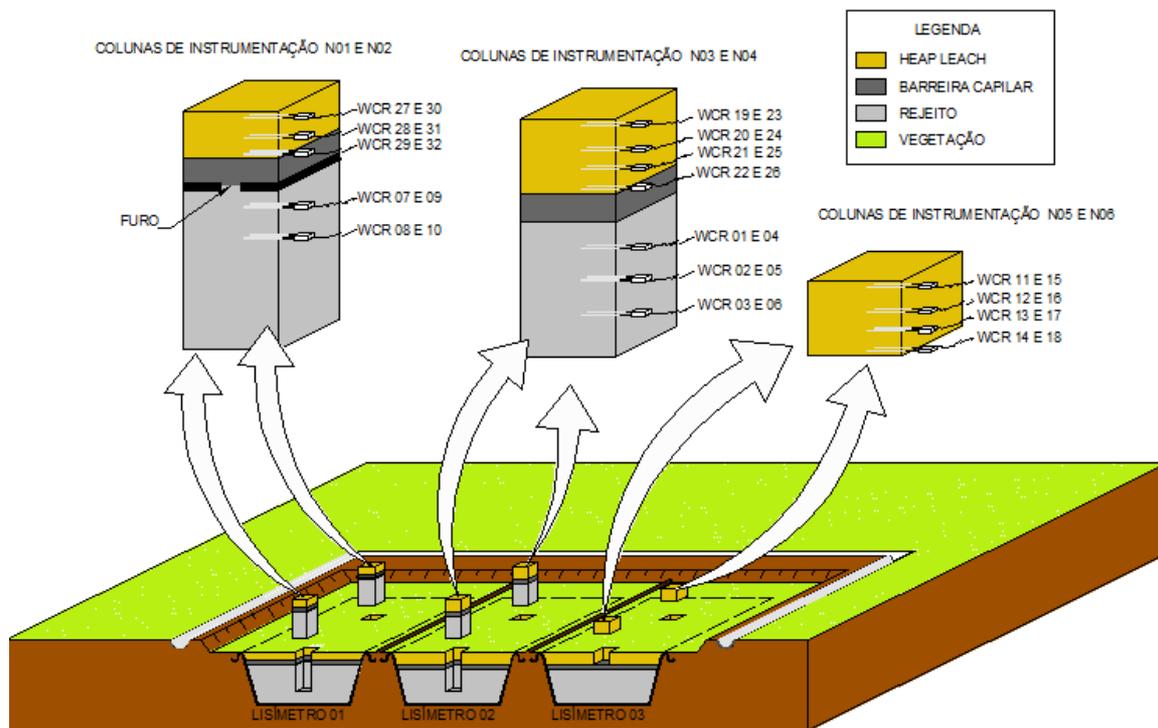


Figura 3.11 - Distribuição dos sensores de umidade em cada coluna

## 2) Medidores de Vazão

Foram instalados dois tipos de medidores de vazão, sendo um deles para medir pequenas vazões e o outro capaz de medir vazões maiores. Todos eles foram implantados em uma vala escavada, em uma cota altimétrica inferior àquela em que se encontram os lisímetros, para que as águas fossem direcionadas por gravidade.

O medidor de pequenas vazões tem o nome de "tipping bucket" e foi instalado apenas no lisímetro 03, com o objetivo de medir o fluxo de água nas camadas de cobertura. A água coletada pelo geocomposto drenante era direcionada até uma conexão entre a geomembrana e um tubo de PVC, que conduzia o líquido até a entrada do "tipping bucket".

O aparelho possui dois compartimentos adjacentes ligados um ao outro, abertos em sua parte superior para receber a água coletada. A água é depositada em um compartimento por vez. Quando é atingido um volume conhecido em um deles, o centro de gravidade do conjunto se altera de tal maneira que o conjunto gira para um lado e esvazia o compartimento. Após girar, a entrada de água é direcionada ao outro compartimento que também se enche até atingir o mesmo volume conhecido e gira o conjunto para a posição inicial. A cada vez que o conjunto gira, é enviado um sinal a um sistema de aquisição de dados, podendo-se, portanto, obter o fluxo de água no tempo. Um esquema típico do funcionamento do instrumento é apresentado na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Instrumento de medição de pequenas vazões - Tipping Bucket (adaptado de Hydrological Services, 2012)

O outro medidor de vazão, denominado sifão dosador, foi instalado com o objetivo de medir o volume de água proveniente do escoamento superficial, coletado pelas canaletas e direcionado aos tanques localizados na vala de instrumentação. O sifão de dosagem mede a vazão de maneira descontínua. Quando o nível de água dentro do recipiente (tanque) em que o sifão está instalado atinge uma determinada elevação, o sifão entra em funcionamento e despeja a água para fora do tanque. Após despejar a água, o nível de água dentro do tanque retorna ao seu nível mínimo de funcionamento. A cada vez que a água é despejada, uma boia acusa o movimento e um sinal é enviado para o sistema de aquisição de dados que registra o número de vezes que o sifão entrou em funcionamento. Para evitar que sedimentos provenientes do escoamento superficial comprometessem o funcionamento do sifão de dosagem, foi elaborado um sistema de dois tanques interligados: o primeiro servia para coletar os sedimentos e, no segundo, foi instalado o sifão. Como esses tanques deveriam permanecer constantemente cheios com água, foram tampados para evitar evaporação de seu conteúdo. Na Figura 3.13, é apresentado um desenho esquemático do sistema de sifão de dosagem.

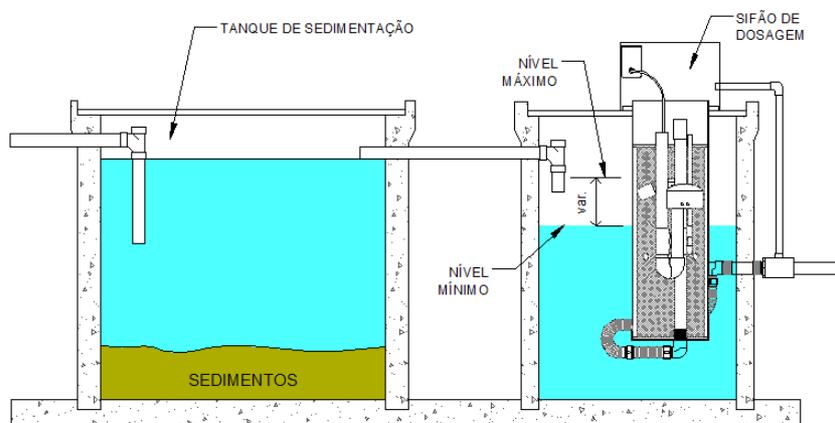


Figura 3.13 - Sistema de medidor de vazão para drenagem do escoamento superficial.

### 3.3.3 Construção do Experimento

A construção do experimento foi iniciada ao final do mês de setembro de 2012 e finalizada em fevereiro de 2013. Foram realizadas algumas visitas ao longo do período de construção para verificar se a obra estava de acordo com o projeto. A obra foi executada por uma construtora contratada pela MFB e a locação das estruturas foi realizada com o auxílio de ferramentas de topografia (Estação Total) para garantir que os experimentos fossem realizados conforme projeto.

Inicialmente, foi realizado um trabalho de limpeza da área dos experimentos seguida da locação do projeto. Os serviços de terraplanagem compreenderam a escavação de um platô com inclinação de superfície constante de 3%, escavação da vala de instrumentação e das três bacias que deram origem aos lisímetros (Figura 3.14).

As três bacias escavadas foram revestidas com geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura para isolar os lisímetros e evitar o contato do rejeito com o terreno natural. As geomembranas foram soldadas pelo método de termofusão e foram realizados testes de estanqueidade, conforme ilustrado na Figura 3.15. Foram escavadas valas de ancoragem no perímetro dos lisímetros para fixar as geomembranas.



Figura 3.14 - Escavação de bacia

Após a conclusão do revestimento do fundo dos três lisímetros, os rejeitos dos lagos 01 e 02 foram transportados até a área do experimento e depositados no fundo de cada bacia. Atingido o volume em cada lisímetro, a superfície foi nivelada manualmente de maneira a garantir a declividade especificada. Nos lisímetros 01 e 03, foi inserida a geomembrana entre o rejeito e a barreira capilar, conforme ilustrado na Figura 3.16. Especificamente para o lisímetro 03, foi realizada uma adaptação na geomembrana intermediária para que se pudesse ligar um tubo de PVC a ela. No lisímetro 02, entre a barreira capilar e o rejeito foi aplicado um geotextil para separação.



Figura 3.15 - Impermeabilização dos experimentos com geomembrana.



Figura 3.16 - Detalhes de instalação da geomembrana entre a barreira capilar e o rejeito

A camada de estéril britado de 15 cm de espessura foi depositada e nivelada nos três experimentos para formar a barreira capilar. Acima da barreira capilar, foi colocado o geotextil para separação do “heap leach”, o qual foi compactado em camadas de aproximadamente 15 cm de espessura com utilização de sapo mecanizado. O controle de qualidade de compactação foi realizado de maneira visual.

Para evitar o ingresso da água de escoamento superficial da área externa para os experimentos, foram executadas canaletas periféricas do tipo "meia-cana" com revestimento em concreto. Essas canaletas ficam externas à área dos lisímetros, fora do platô escavado.

Após a execução das camadas de cobertura dos lisímetros, a superfície do terreno foi nivelada (com declividade constante de 3%), formando uma superfície única. Foram executadas leiras para separação da drenagem de escoamento superficial de cada lisímetro. Canaletas dentro do platô foram executadas a jusante de cada lisímetro, para coletar a drenagem de escoamento superficial e direcionar à tubos de PVC que conduzam as águas até os tanques de sedimentação dos sistemas de sifão de dosagem.

Uma vez que as camadas dos lisímetros foram executadas e compactadas, os sensores de umidade foram instalados. Foram escavados poços de aproximadamente 1,0 m<sup>2</sup>, para possibilitar a entrada de uma pessoa para cravar os sensores horizontalmente no perfil da cobertura e do rejeito. Na Figura 3.17 estão ilustrados o momento da instalação e um poço escavado com sensores já instalados. Ao se escavar o poço do lisímetro 01, foi produzida uma abertura na geomembrana intermediária, com cerca de 20 cm x 20 cm, para instalar os sensores no rejeito. No intuito de simular eventuais falhas, a abertura não foi lacrada após a instalação dos WCR. Todos os poços foram reaterrados após a instalação da instrumentação.



Figura 3.17 - Instalação dos sensores de umidade.

Os tanques, executados com manilhas de concreto, foram impermeabilizados para evitar perda de água. Os sistemas de sifão de dosagem foram instalados na vala de instrumentação e as tubulações foram ligadas a eles. O “tipping bucket” foi instalado dentro de uma manilha tampada para protegê-lo do sol e evitar que a água da chuva afetasse suas medições.

A vegetação foi implantada apenas em junho de 2013, e apesar de ter se fixado à superfície do experimento, não se desenvolveu muito em decorrência do clima da região. Na Figura 3.18 pode ser visto como ficou o experimento após a construção e instalação dos instrumentos.



Figura 3.18 - Vista geral dos experimentos.

### 3.3.4 Calibração dos Sensores de Umidade

Conforme citado no item 3.5.2, os WCRs precisam ser calibrados para os solos nos quais eles serão instalados. O objetivo da calibração dos sensores é de obter uma função de segundo ou primeiro grau que converta a frequência lida pelo WCR em umidade volumétrica do solo. Os instrumentos foram calibrados duas vezes, sendo a primeira em laboratório e a segunda em campo.

#### 1) Calibração de Laboratório

A calibração de laboratório foi realizada antes da instalação dos sensores nos lisímetros. As hastes dos WCR têm comprimento de 30 cm e devem ser totalmente cravadas no corpo de prova para possibilitar a calibração. Por esse motivo, a forma utilizada para a moldagem dos corpos de prova (CP) era cilíndrica com 30 cm de altura e 15 cm de diâmetro.

As amostras indeformadas do “heap leach” e rejeito utilizadas para os ensaios de caracterização no laboratório foram reaproveitadas para a calibração dos sensores. As amostras de solo foram preparadas por meio de peneiramento e secagem em estufa. Foram moldados corpos de prova com densidades secas semelhantes, porém com umidades diferentes, conforme ilustrado na Figura 3.19. A moldagem do corpo de prova foi realizada compactando-se cinco camadas de solo com soquete padronizado e quantidade de golpes conhecida. A moldagem foi realizada de modo a se obter densidades secas semelhantes àquelas que se pretendia executar em campo.

Os sensores foram ligados ao sistema de aquisição de dados e um mostrador digital apresentava o valor da frequência de cada WCR, medida a cada 30 s. Conforme indicado em Campbell (2014), os sensores medem valores típicos ao serem totalmente imersos em água de torneira. Para verificar se todos os instrumentos estavam em bom funcionamento, os mesmos foram imersos em água e apresentaram valores dentro da faixa de 40 +/- 0,4 microssegundos (conforme apresentado no manual).



Figura 3.19 - Preparação dos corpos de prova

Cada WCR, devidamente etiquetado, foi cravado em CPs apresentando diferentes umidades e os respectivos períodos (microsegundos) lidos foram registrados. Após cravar todos os sensores, os corpos de prova foram desmoldados, as amostras retiradas imediatamente, e levadas à estufa para a determinação do teor de umidade. A partir da umidade obtida para cada CP foram formados pares de umidade gravimétrica do solo (%) e período medido pelos sensores ( $\mu\text{seg}$ ). Os pares obtidos foram organizados em gráficos, tendo sido plotado um para cada sensor. Foram traçadas linhas de tendência por regressão e as equações resultantes para cada linha de tendência foram obtidas. Dessa forma, a calibração foi realizada para cada sensor, obtendo-se equações de umidade volumétrica em função do período lido pelos sensores. Um exemplo de curva de calibração determinada para o rejeito é apresentada no Gráfico 3.8, em que a linha de tendência é uma equação de segundo grau com três coeficientes de calibração (0,0725; -3,9334; 59,774).

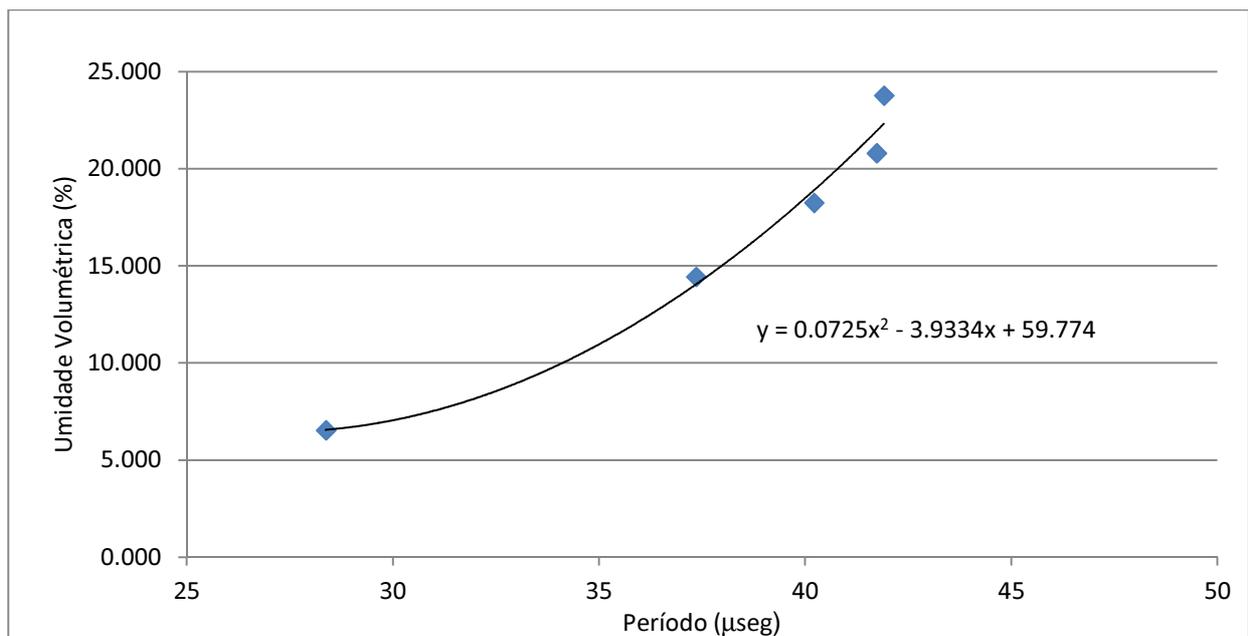


Gráfico 3.8 - Curva de calibração de um sensor para o rejeito.

A calibração para o “heap leach” é uma tarefa mais complexa de se realizar. Como o “heap leach” possui uma quantidade elevada de pedregulho, cravar os sensores no CP se torna complicado, pois a maior parte das tentativas de cravar toda a haste dos WCRs era interrompida pela presença de algum pedregulho. Por esse motivo, foram cravados sensores em apenas três corpos de prova, tendo-se obtido apenas três pares de período *versus* umidade volumétrica. Uma curva de calibração típica obtida para o “heap leach” está apresentada no Gráfico 3.9 e, como pode ser observado, é bastante diferente daquela apresentada para o rejeito.

O resultado da calibração de laboratório foi a obtenção de três coeficientes de calibração para cada sensor, os quais foram implementados no software do sistema de aquisição de dados.

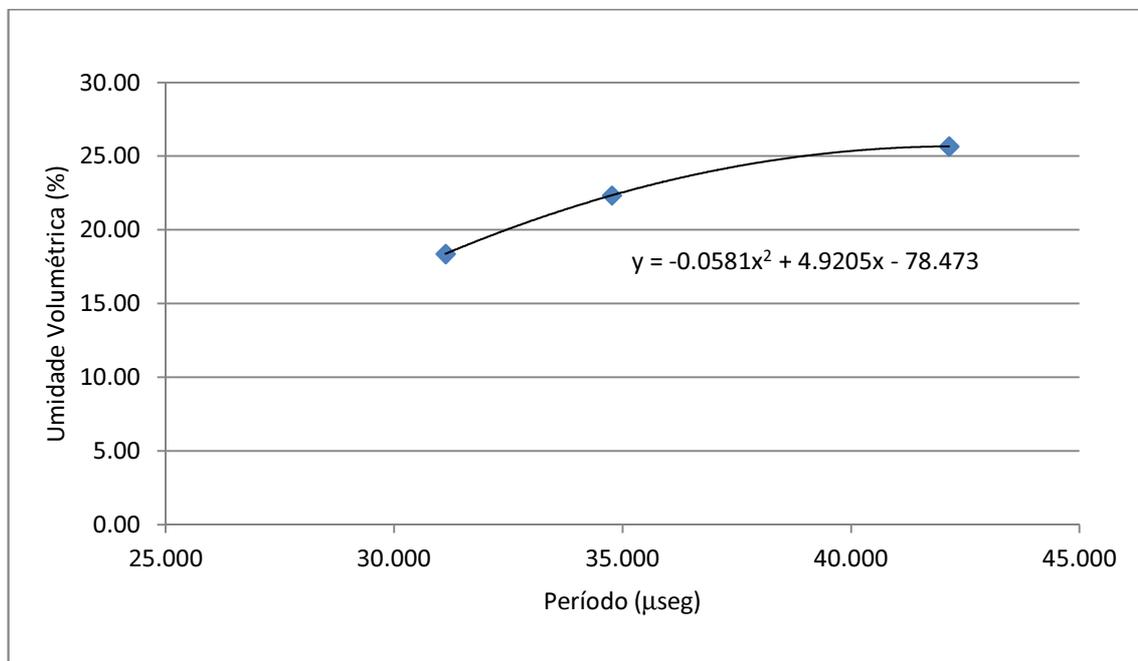


Gráfico 3.9 - Curva de calibração de um sensor para o “heap leach”

## 2) Calibração de Campo

Após a instalação dos instrumentos em campo, foi observado que algumas leituras de umidade volumétrica apresentavam valores incoerentes, sendo muito baixas e até mesmo negativas, principalmente para os sensores instalados no “heap leach”. Esses valores podem ser atribuídos à pequena amplitude de umidade ensaiada na calibração de laboratório (entre 18% a 26% de umidade volumétrica) devido à dificuldade em cravar os sensores em corpos de prova pouco úmidos. Para valores de umidade fora da amplitude simulada em laboratório, a equação de calibração não

representa bem a umidade observada em campo. Além da limitação da calibração de laboratório, acredita-se que a diferença entre a compactação simulada em laboratório e aquela executada em campo também pode ter contribuído para leitura de valores inesperados.

Com o intuito de corrigir as incoerências observadas, foi realizada uma nova calibração dos sensores instalados no “heap leach”, porém dessa vez realizada *in loco*. Antes de iniciar a calibração dos sensores, foram medidas as densidades "in situ" para cada lisímetro por meio do ensaio de frasco de areia. Foram obtidos os pesos específicos aparentes secos de 16,1 kN/m<sup>3</sup> para o lisímetro 01.; 17,3 kN/m<sup>3</sup> para o lisímetro 02; e 17,4 kN/m<sup>3</sup> para o lisímetro 03. A densidade com a qual os corpos de prova utilizados na calibração de laboratório foram compactados foi de 1,95 kN/m<sup>3</sup>.

Foram feitos dois furos com trado manual de 150 mm de diâmetro, em cada um dos três lisímetros. Ao se atingir a barreira capilar, a execução dos furos, localizados próximos às colunas de instrumentação, onde os WCRs estavam instalados, era interrompida. Em cada furo foram coletadas amostras nas mesmas profundidades em que os sensores foram instalados. Essas amostras foram levadas ao laboratório da MFB e secadas em estufa para obtenção de suas umidades. Deste modo, foram obtidos dois valores de umidade para uma mesma profundidade em cada lisímetro.

Como o sistema de aquisição de dados dos WCRs registram o período a cada 30 segundos, foi possível obter os valores de período dos pulsos eletromagnéticos lidos no mesmo horário em que as amostras de cada profundidade foram coletadas. Foram obtidos pares de umidade e períodos medidos pelos WCRs, para cada dupla de sensores instalados em uma mesma profundidade, em um mesmo lisímetro. Para cada dupla de sensores equivalentes foi vinculada uma umidade medida em laboratório.

Para realizar a calibração, é necessário obter, no mínimo, outro ponto por dupla de WCRs para traçar retas e obter equações para umidade em função do período. Para resolver o problema, ao final do mesmo dia em que as amostras foram coletadas e os furos foram reaterrados, foi despejado o volume de um caminhão pipa de água em cada lisímetro de modo a simular uma chuva crítica. Cada caminhão descarregou um volume de seis mil litros de água e no dia seguinte, ao amanhecer, foram realizados dois novos furos por lisímetro e o processo foi repetido.

Como resultado, foram obtidas curvas de calibração diferentes para 22 sensores instalados no “heap leach”. O Gráfico 3.10 ilustra a comparação entre a calibração de laboratório e de campo. Pode-se notar que a calibração de campo associa valores de umidade menores para um mesmo período lido.

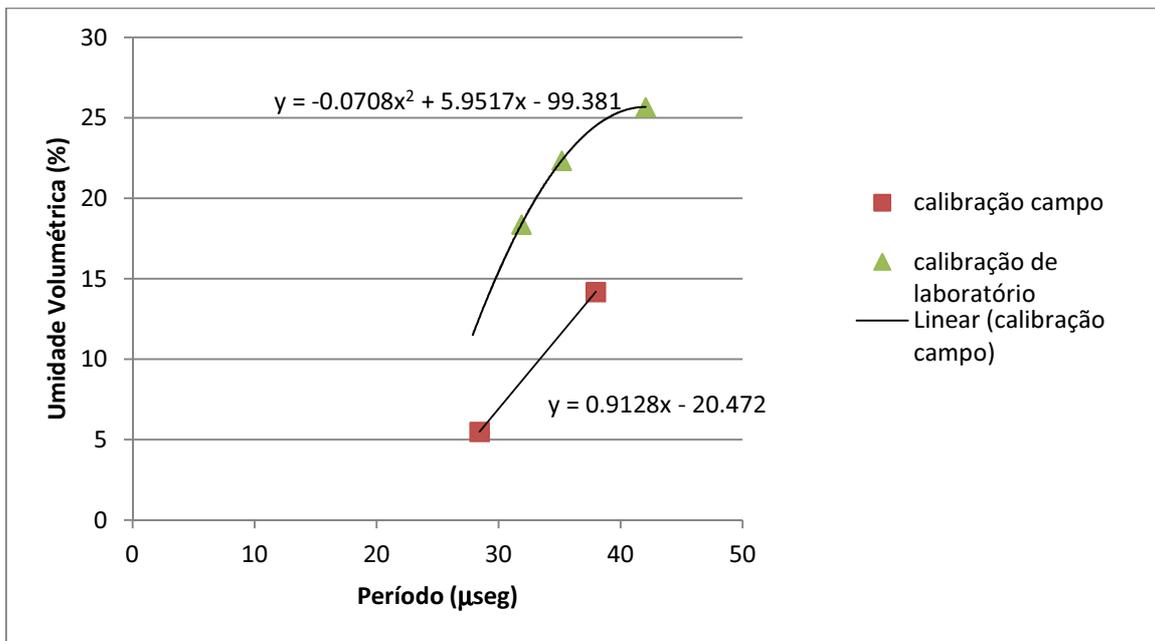


Gráfico 3.10 - Calibração de campo x calibração de laboratório.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados Obtidos Pelos Sensores de Umidade

A variação da umidade das camadas dos três lisímetros, ao longo do período monitorado de 393 dias, foi organizada em gráficos para facilitar a visualização e o entendimento. De um modo geral, os sensores instalados na camada de armazenamento e liberação (“heap leach”), apresentaram variação em suas umidades ao longo do ano. Esses sensores foram mais sensíveis às chuvas e estiagens enfrentadas ao longo do monitoramento, conforme ilustrado nos Gráficos 4.1 e 4.2.

Os sensores instalados no rejeito (lisímetro 2 e 3, apenas) não apresentaram variação significativa ao longo do período monitorado. Apenas os sensores instalados no rejeito na coluna 3 do lisímetro 02 apresentaram uma pequena variação de umidade em dois eventos ao longo de todo o período. O Gráfico 4.3 ilustra essa situação, em que apenas o WCR 01 registrou umedecimento em dois eventos enquanto o WCR 04 permaneceu sem variação da umidade. Os gráficos da variação de todos os pares de sensores de umidade estão apresentados no anexo.

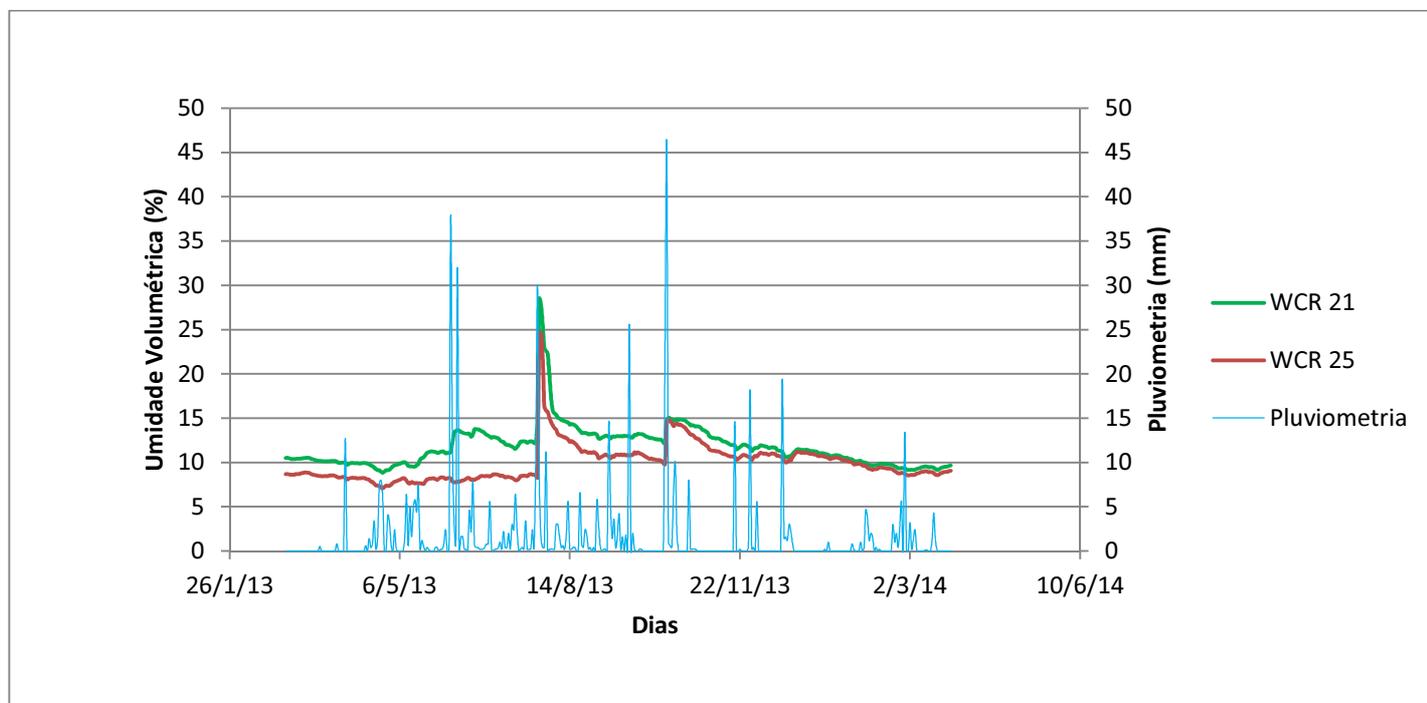


Gráfico 4.1 - Variação de umidade dos sensores instalados no lisímetro 02 a uma profundidade de 25 cm abaixo da superfície.

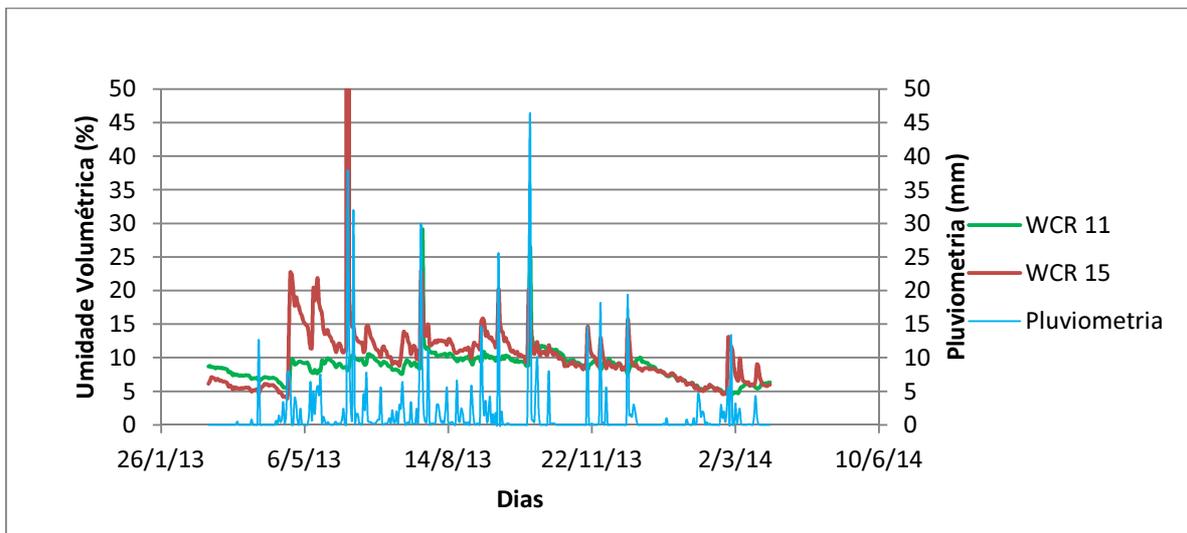


Gráfico 4.2 - Variação de umidade dos sensores instalados no lisímetro 03 a uma profundidade de 5cm abaixo da superfície

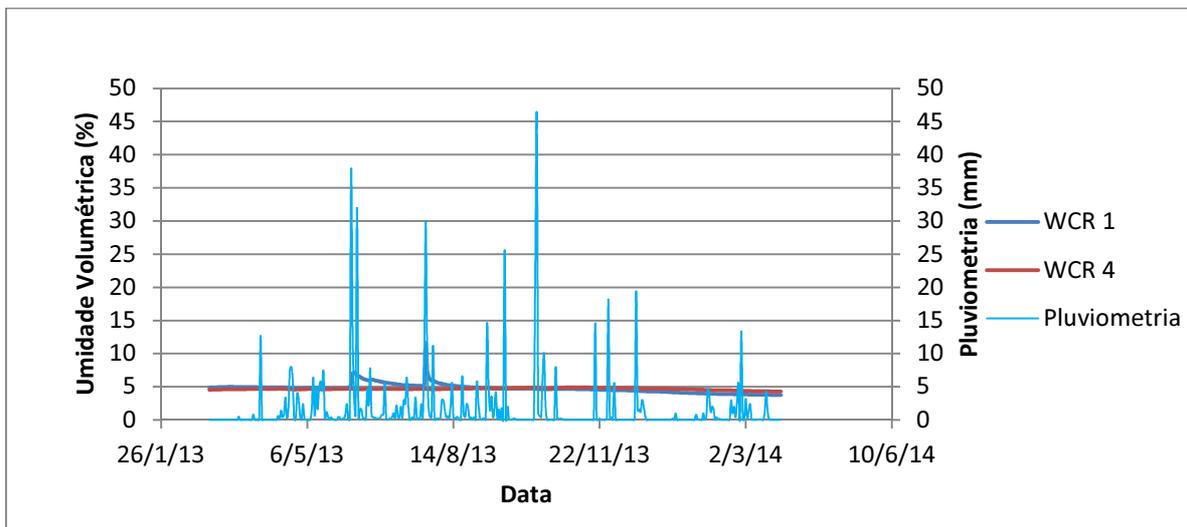


Gráfico 4.3 -Variação na umidade nos sensores instalados na porção superior da camada de rejeito no lisímetro 02.

#### 4.1.1 Comparação entre lisímetros por meio da variação da umidade

Os lisímetros 02 e 03 apresentaram comportamento semelhante ao longo do período monitorado, apesar de no lisímetro 02 haver interação entre a cobertura e o rejeito, e no lisímetro 03 essa interação ser interrompida pela geomembrana. Para ilustrar essas observações, foram traçados gráficos comparando as respostas dos sensores instalados nas mesmas profundidades em cada um dos lisímetros. Conforme pode ser observado nos Gráficos 4.4 ao 4.7, a variação é bastante semelhante entre os dois lisímetros, porém o lisímetro 02 apresenta umedecimento maior em duas ocasiões para os sensores instalados a 25 e 35 cm de profundidade.

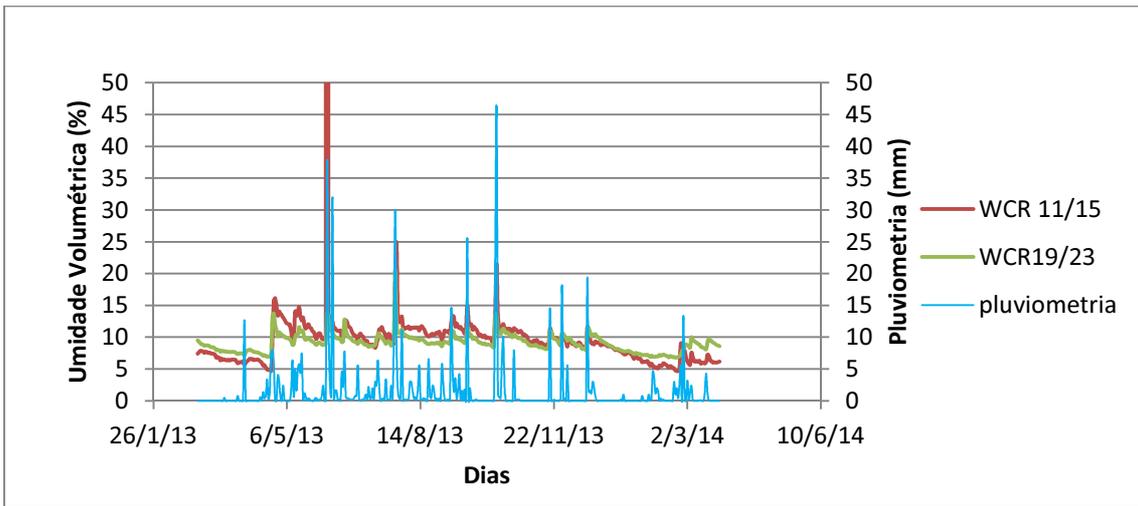


Gráfico 4.4 - Comparação da variação de umidade dos sensores instalados 5cm abaixo da superfície nos lisímetros 02 e 03.

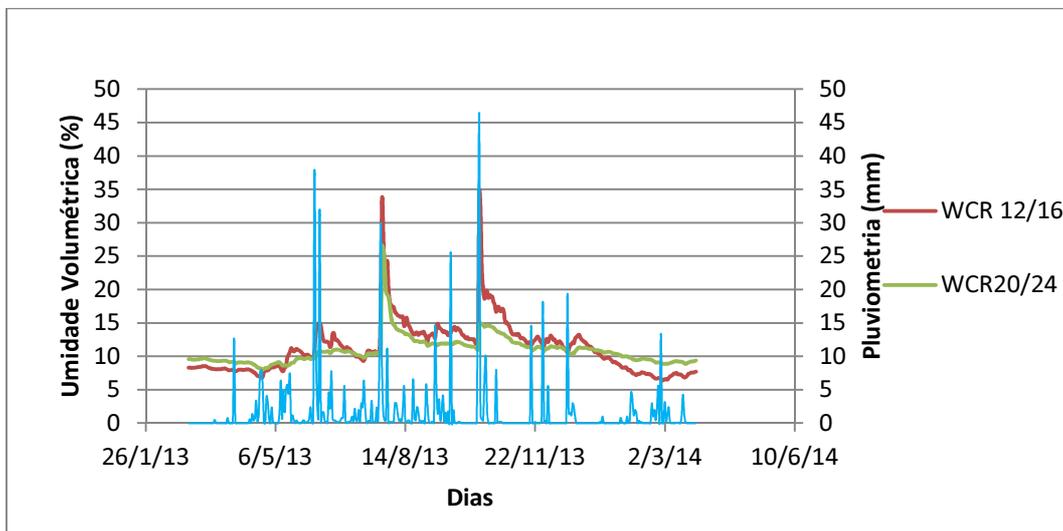


Gráfico 4.5 - Comparação da variação de umidade dos sensores instalados 15cm abaixo da superfície nos lisímetros 02 e 03.

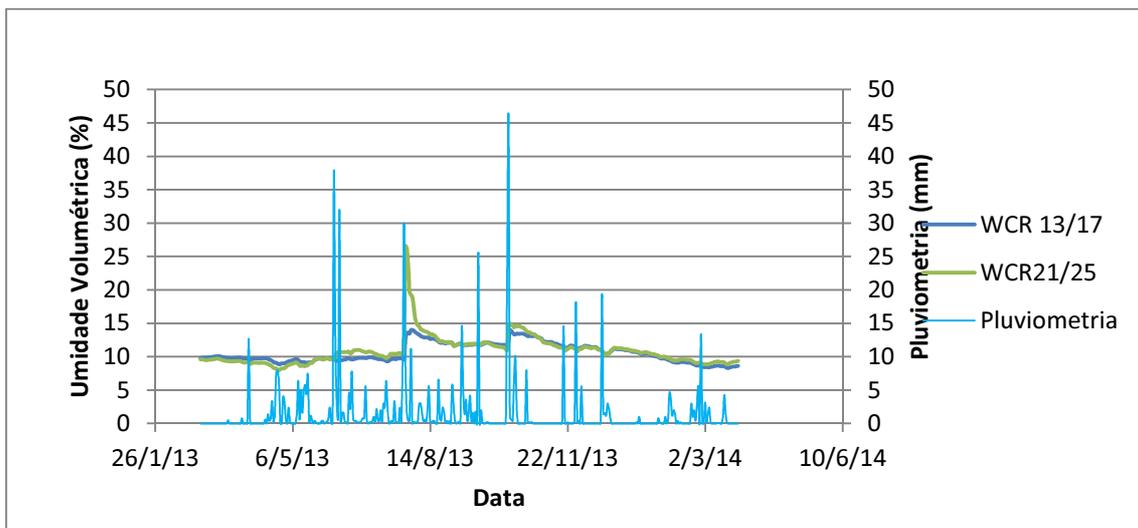


Gráfico 4.6 - Comparação da variação de umidade dos sensores instalados 25cm abaixo da superfície nos lisímetros 02 e 03.

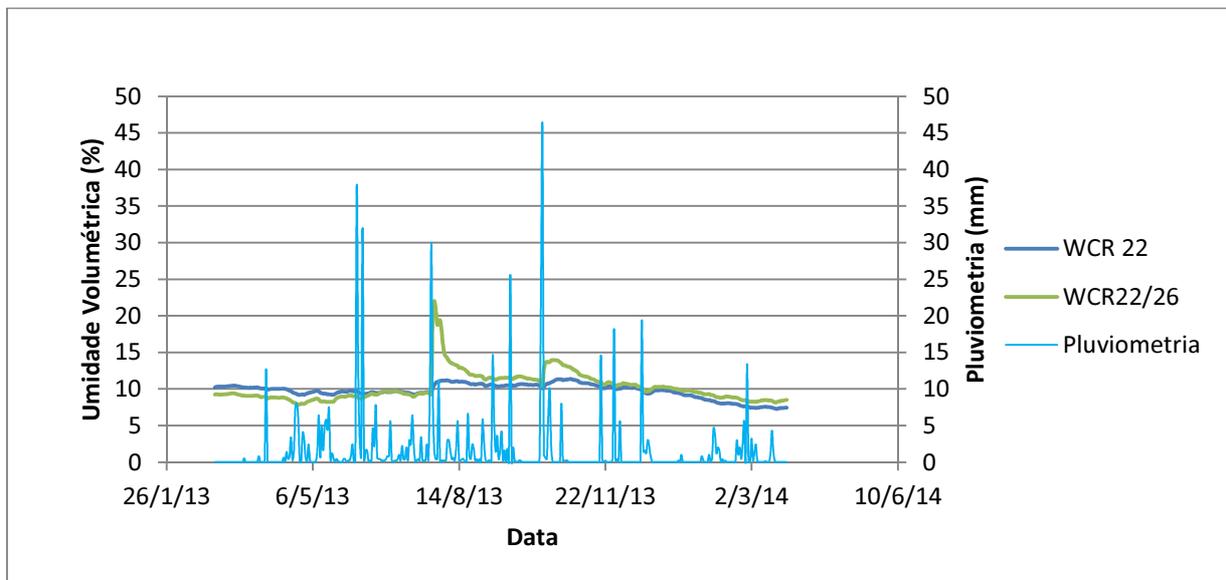


Gráfico 4.7 - Comparação da variação de umidade dos sensores instalados 35cm abaixo da superfície nos lisímetros 02 e 03.

O lisímetro 01 teve como objetivo verificar o funcionamento de um sistema de cobertura misto e também o de avaliar a variação da umidade no material abaixo dos furos realizados propositadamente na geomembrana. No Gráfico 4.8, apresenta-se uma comparação entre a variação da umidade na camada mais profunda do “heap leach” dos lisímetros 01, 02 e 03, que se mostrou semelhante nos três.

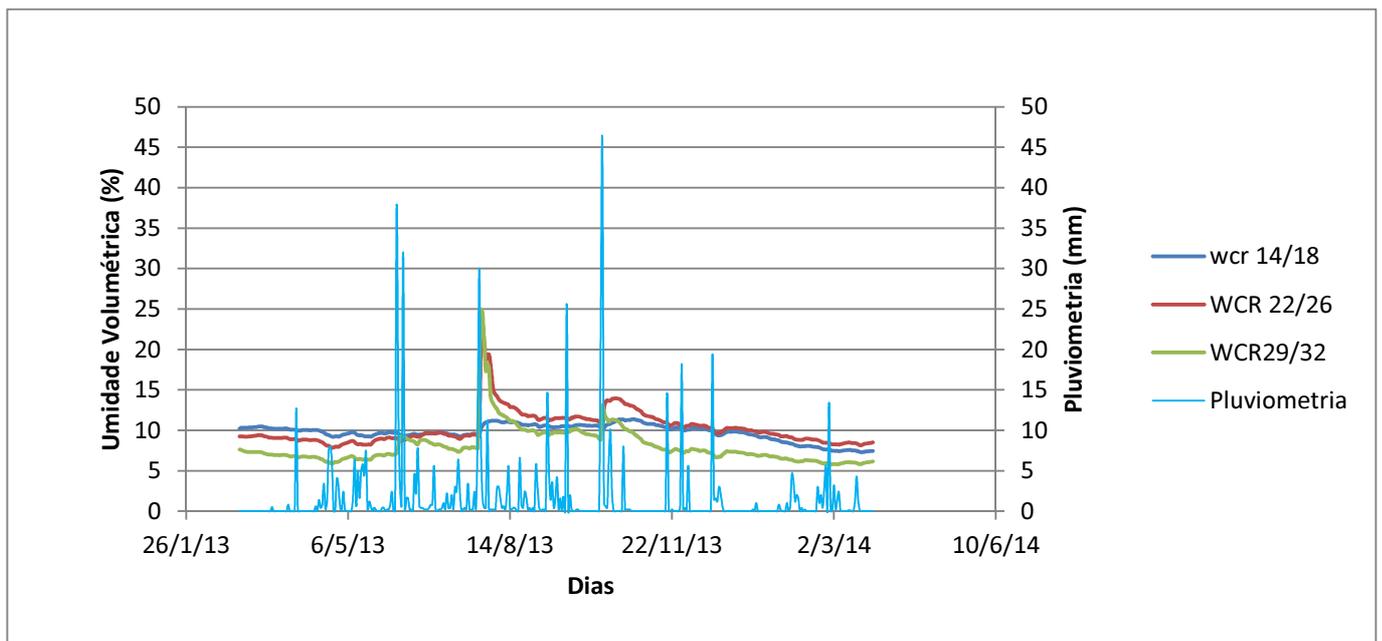


Gráfico 4.8 - Comparação da variação da camada mais profunda do heap leach dos três lisímetros.

## **4.2 - Resultados Obtidos pelos Medidores de Vazão**

Os instrumentos responsáveis pela medição da vazão do escoamento superficial são os sifões de dosagem. Esses instrumentos não medem vazões contínuas, são medidas cumulativas de volume. Cada vez em que o sifão é acionado significa que o nível de água dentro do tanque em que ele está inserido atingiu a cota de acionamento e que o mesmo irá despejar 80 litros. Existe um contador digital que registra cada vez em que a água é jogada para fora.

Foi instalado um sistema de sifão de dosagem por lisímetro, responsável pela drenagem do escoamento superficial de aproximadamente 400m<sup>2</sup> de área. Os volumes de escoamento medidos em cada lisímetro estão apresentados nos Gráficos 4.9 a 4.11. O somatório de vazão de escoamento superficial medido em cada lisímetro foi de 2640dm<sup>3</sup>, 3920dm<sup>3</sup> e 4880dm<sup>3</sup>, respectivamente, para os lisímetros 01,02 e 03, no período de monitoramento. Existe uma grande diferença no volume de água medido no lisímetro 01 em comparação ao dos demais. Essa constatação foi atribuída a uma falha imediatamente a montante das canaletas de drenagem superficial, que provocou o aprisionamento de água na região do lisímetro, formando poças e reduzindo o volume direcionado aos instrumentos de medição.

Com base nos gráficos das medições de escoamento superficial (Gráficos 4.9 a 4.11) é possível notar que eventos chuvosos isolados de pequena intensidade não são capazes de acumular volume suficiente para acionar os sifões de dosagens. Porém, é possível observar que a concentração de pequenos eventos chuvosos com pequeno espaçamento de tempo podem acionar os sifões.

Conforme descrito no item 3.3.2, o sistema formado pelo tanque de sedimentação acoplado ao tanque em que o sifão está instalado deve estar sempre cheio de água e tampado para evitar evaporação. No caso do tanque de sedimentação, o nível de água deve estar sempre na cota da saída da tubulação que o liga ao tanque do sifão, para garantir que cada acréscimo de vazão que adentrar provoque igual acréscimo no tanque do sifão. Foi possível notar, durante a realização de algumas visitas, que apesar de o interior dos tanques ter sido impermeabilizado e as tampas terem sido colocadas, ainda assim houve perda de água por evaporação e ou por pequenos vazamentos através das paredes das manilhas de concreto que formam os tanques.

Além dos medidores de vazão de água superficial, foi instalado um medidor para pequenas vazões (“tipping bucket”) no lisímetro 03. Esse instrumento é capaz de medir volumes mínimos de aproximadamente um litro, o que equivaleria a menos de 0,5% do volume de uma chuva de 1 mm. Durante o período monitorado, não foram registradas medições de vazões no instrumento.

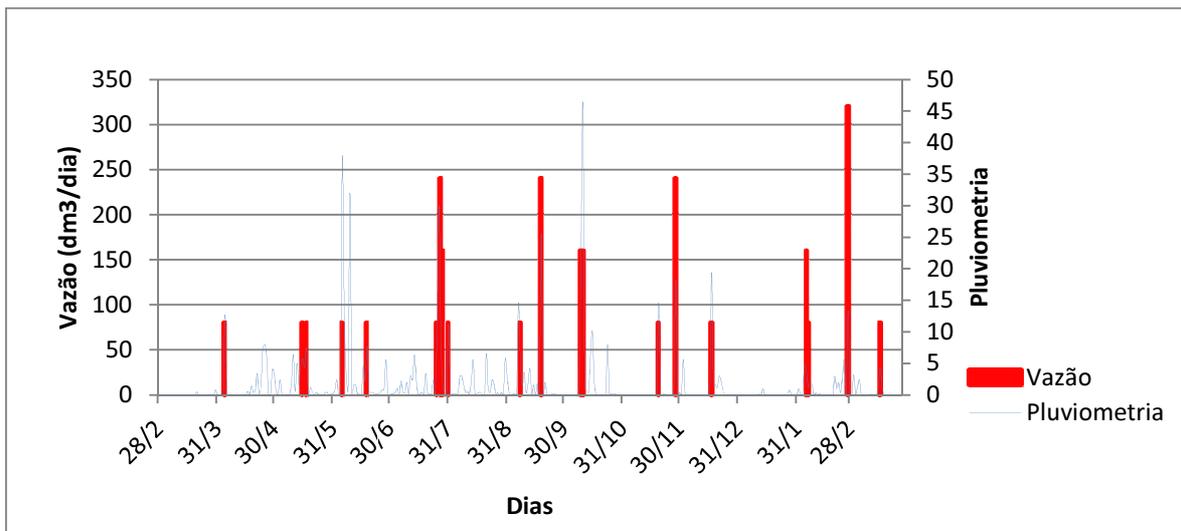


Gráfico 4.9 - Escoamento superficial medido no lisímetro 01

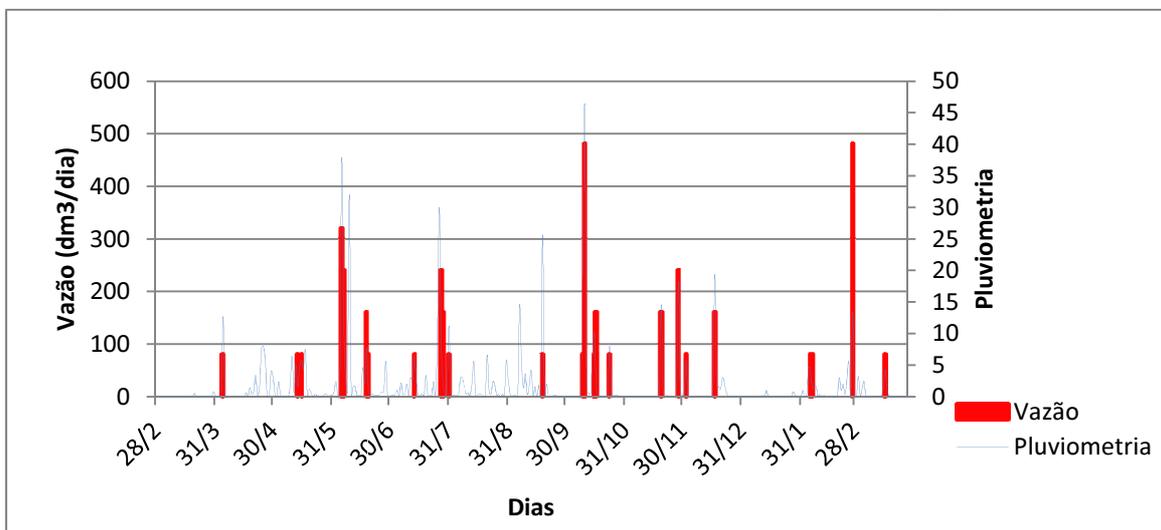


Gráfico 4.10 - Escoamento Superficial Medido no lisímetro 02

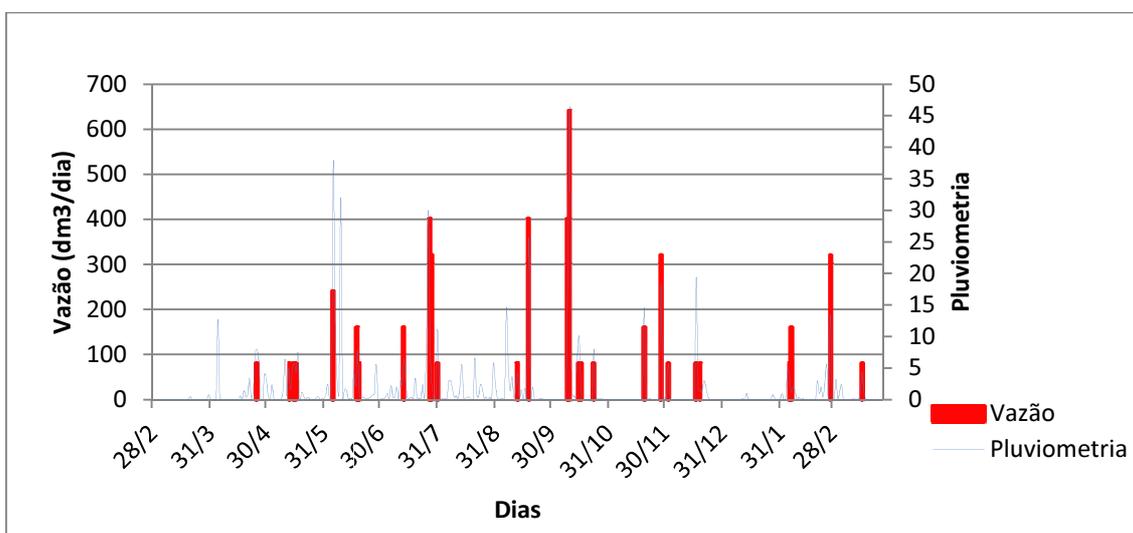


Gráfico 4.11 - Escoamento Superficial medido no Lisímetro 03

### **4.3 Comparação da Modelagem Numérica com dados de campo**

A partir da organização de todos os dados coletados durante o período de monitoramento, foram modeladas colunas unidimensionais utilizando o software Vadose, com o intuito de realizar comparações entre os dados obtidos na modelagem numérica e os resultados medidos pelas instrumentações. Inicialmente, foram realizadas modelagens inserindo-se como dados de entrada do modelo os parâmetros dos materiais obtidos em laboratório e, no contorno superior do modelo, foram aplicadas as variações climáticas medidas ao longo do período de monitoramento. As condições iniciais foram aplicadas de modo a considerar o fundo dos lisímetros com poropressão nula.

Um dos resultados gerados pelo programa Vadose é a variação de umidade volumétrica do perfil da coluna, ao longo do tempo. Foram selecionados alguns pontos no perfil modelado para verificar a variação de umidade. Para facilitar a comparação do modelo com os dados medidos em campo, estes pontos foram escolhidos nas mesmas profundidades em que os sensores de umidade foram instalados em campo. Um exemplo do resultado obtido é apresentado no Gráfico 4.12, no qual é possível observar a variação da resposta de dois WCRs instalados a mesma profundidade, em um mesmo lisímetro, comparada aos resultados obtidos na modelagem numérica, para a mesma profundidade.

Em todos os lisímetros, para os sensores instalados na camada de armazenamento e liberação (“heap leach”), notou-se que as variações de umidade da modelagem numérica e as medidas em campo apresentam a mesma tendência, porém com picos de amplitude diferentes. Tanto na modelagem quanto nos WCRs, passados poucos dias com ausência de chuva, o solo seca até atingir um patamar mínimo de umidade. A maior diferença observada se refere ao valor para o qual esses patamares mínimos se desenvolvem. De acordo com o Gráfico 4.12, por exemplo, foram atingidos patamares de umidade volumétrica de aproximadamente 9% e 5% para os sensores e para modelagem numérica respectivamente. Tanto as respostas dos sensores instalados no rejeito como os valores obtidos na modelagem numérica indicaram que o rejeito não apresentou variação de umidade considerável. Entretanto, a umidade volumétrica determinada na modelagem é cerca de 300% maior do que as respostas fornecidas pelos sensores (Gráfico 4.13).

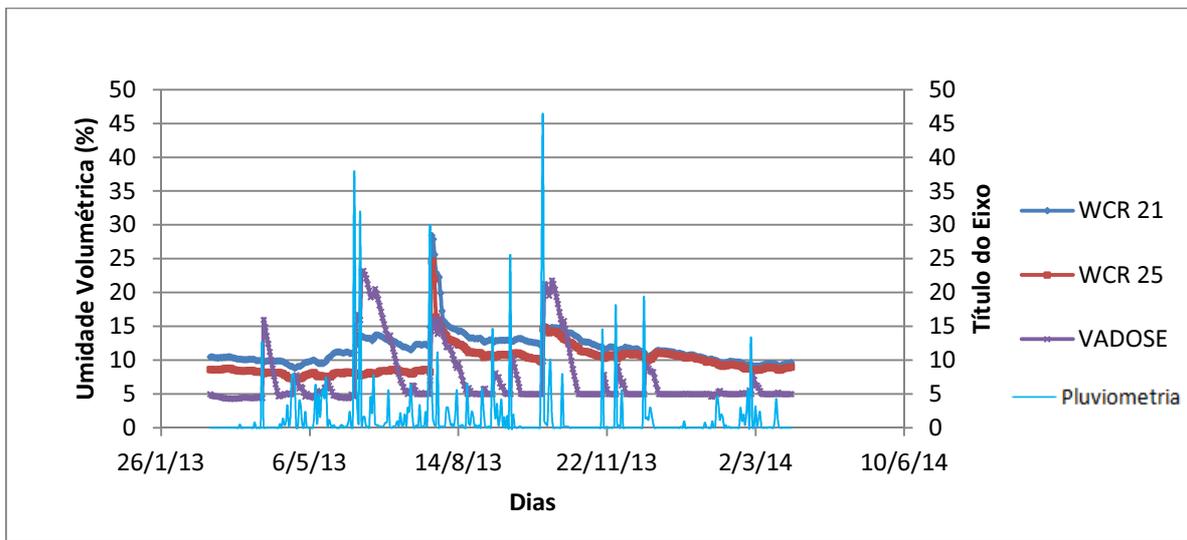


Gráfico 4.12 - Valores da Modelagem Numérica comparados aos medidos em campo para sensores instalados no "heap leach" do lisímetro 02.

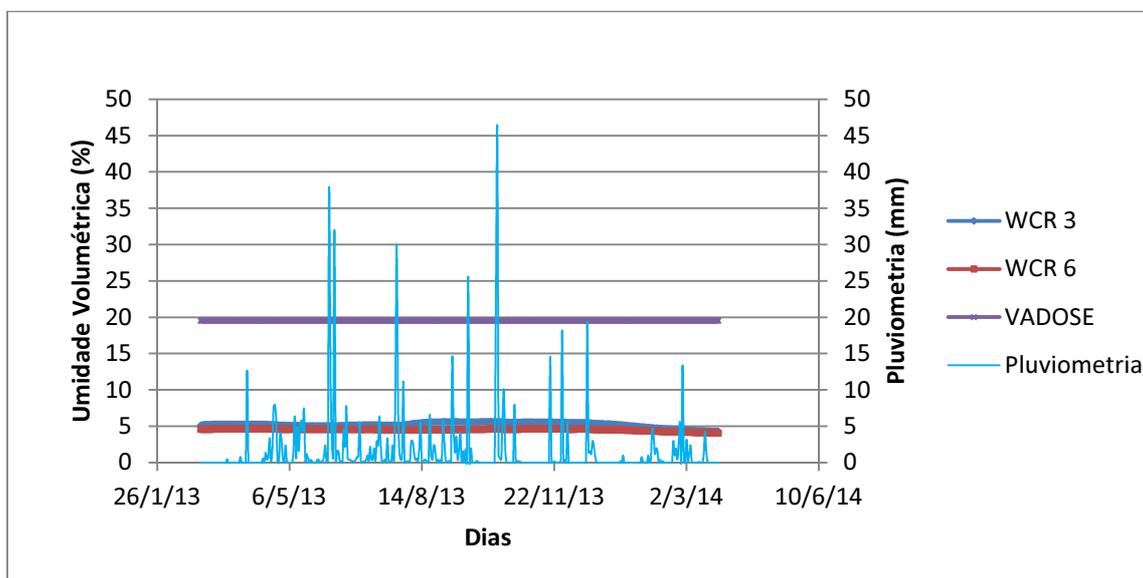


Gráfico 4.13 - Valores da modelagem numérica comparados aos medidos em campo para sensores instalados no rejeito do lisímetro 02.

#### 4.3.1 Adequação do modelo numérico

As diferenças observadas entre a modelagem numérica inicial e os dados obtidos por meio da instrumentação orientaram a adequação ou recalibração do modelo numérico a fim de se obterem resultados mais próximos e coerentes. Foram realizadas diversas análises de sensibilidade no software Vadose, modificando-se os dados de entrada e as condições iniciais e de contorno com o objetivo de aproximar a modelagem numérica das respostas fornecidas pela instrumentação de campo.

Os dados de entrada referentes à vegetação e às propriedades térmicas dos materiais foram responsáveis por mudanças pouco expressivas no comportamento da cobertura quanto à variação de

umidade. As propriedades hidráulicas dos materiais, mais especificamente a curva de retenção de umidade, foram responsáveis pela maior mudança de comportamento da cobertura, entre os dados de entrada analisados. Foi possível observar que o baixo patamar de umidade que o “heap leach” tende a atingir na modelagem numérica está relacionado com a umidade volumétrica residual apresentada pela curva de retenção de água. Portanto, para adequar o modelo ao medido em campo, as curvas de retenção do “heap leach” e rejeito foram alteradas conforme apresentado no Gráfico 4.14. Isso ocorre porque a evaporação resseca o material e o mesmo tende a atingir sucções elevadas que estão associadas à umidade volumétrica residual.

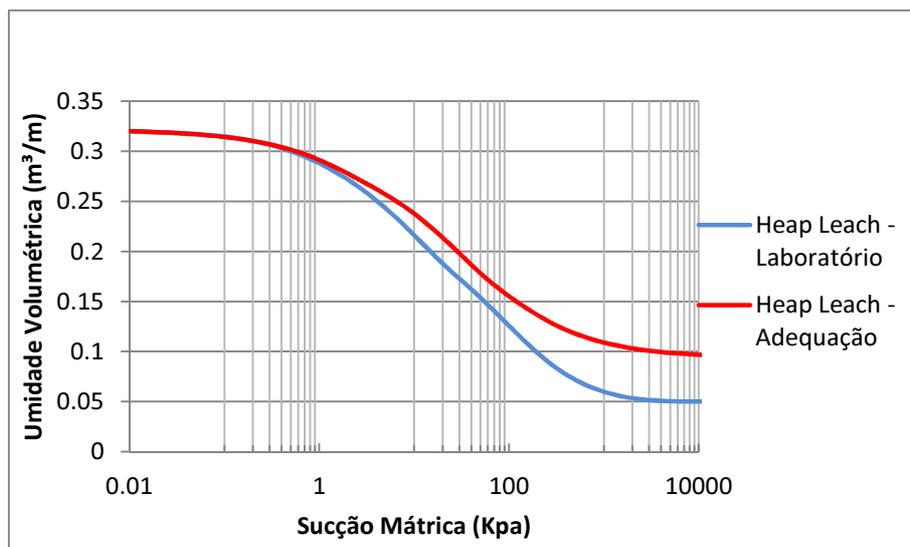


Gráfico 4.14 - Comparação entre curvas de retenção obtida em laboratório e adequada.

As condições de contorno referentes a poropressão inicial do fundo do reservatório foram variadas e foi possível perceber que o comportamento do material que está mais próximo da superfície (do “heap leach”) só é afetado por essa condição de contorno nos primeiros dias, enquanto que, para o rejeito, é essa condição de contorno muda os valores de umidade obtidos ao longo de todo o ano. Conforme pode ser observado no Gráfico 4.15, para uma condição inicial em que a poropressão na base do lisímetro é de - 20mca (ou 200 KPa de sucção), a umidade correspondente para o rejeito é de 6% enquanto para o “heap leach”, esse valor de sucção corresponde a uma umidade próxima a 13.5%. Ao analisar os resultados obtidos na modelagem numérica para essa mesma condição inicial (Gráfico 4.16) é possível verificar que as umidades no primeiro dia de análise são correspondentes aos mesmos valores obtidos nas curvas de retenção para sucções de 200kPA (Gráfico 4.15). Conforme apresentado no Gráfico 4.16, foi possível perceber que o comportamento do “heap leach” (mais próximo da superfície) só é afetado por essa condição inicial nos primeiros dias, quando apresenta umidade de 13,5% e rapidamente tem sua umidade reduzida até atingir um patamar

mínimo (umidade residual). Já o rejeito manteve a umidade próxima a 6% não apresentando variações significantivas.

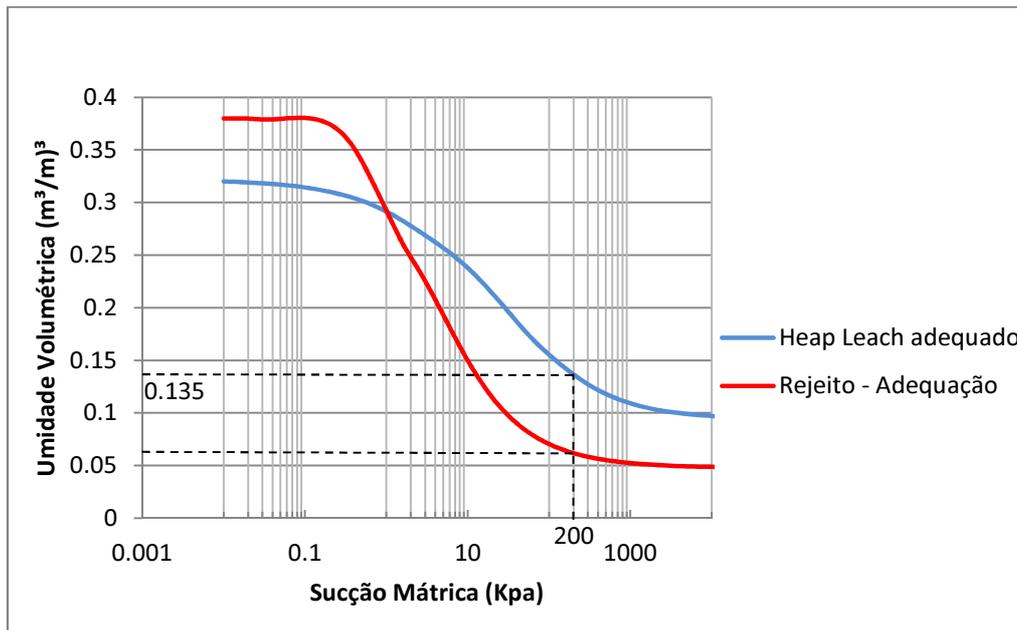


Gráfico 4.15 - Apresentação da umidade correspondente para sucção de 200kPa.

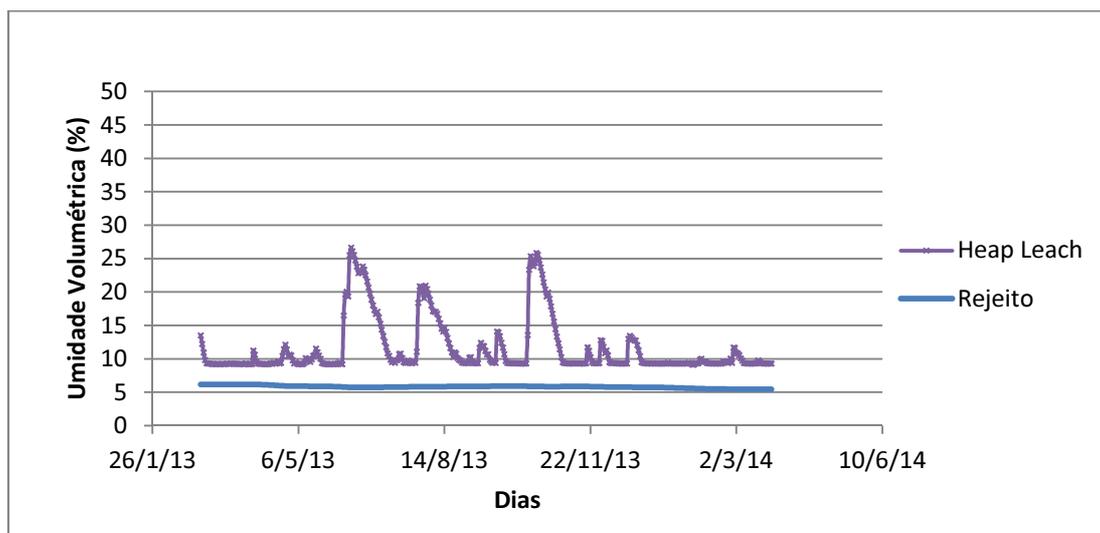


Gráfico 4.16 - Variações de umidade modeladas para um ponto do “heap leach” e do rejeito.

Com isso, é possível concluir que a variação da condição inicial de poropressão no fundo do lisímetro não provoca modificações no comportamento da camada da superfície da cobertura, com exceção dos primeiros dias. Para corrigir essa diferença observada nos primeiros dias, basta realizar uma modelagem numérica fictícia, antes da modelagem principal, considerando poucos dias (3 a 5) sem ocorrência de chuva. Deste modo, desde o primeiro dia de modelagem já são obtidos valores de teores de umidade para o “heap leach” próximos àqueles medidos pelos sensores de umidade. Os Gráficos 4.17 e 4.18 ilustram dois exemplos de medições dos sensores comparadas ao modelos numéricos calibrados.

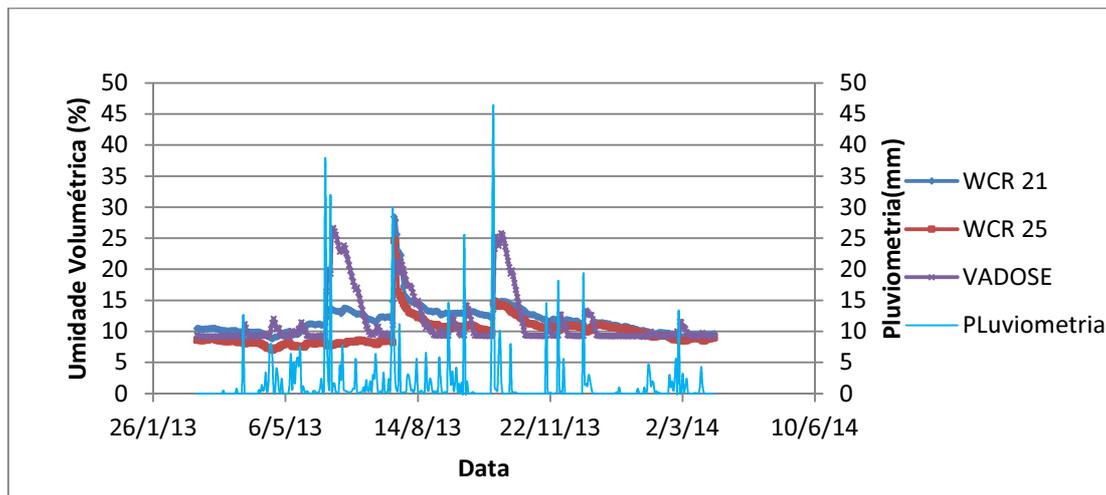


Gráfico 4.17 - Comparação entre medições de campo e modelagem numérica adequada para sensores instalados no rejeito do lisímetro 02.

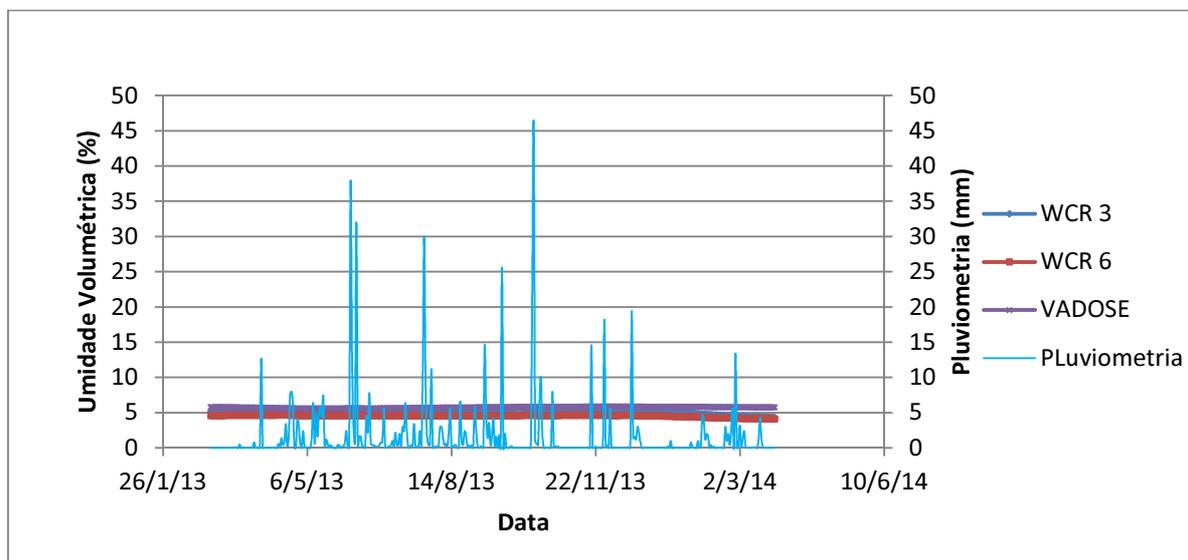


Gráfico 4.18 - Comparação entre medições de campo e modelagem numérica adequada para sensores instalados no rejeito do lisímetro 02.

### 4.3.2 Comparação da vazão de percolação

Foram obtidos gráficos da variação do fluxo líquido atravessando a superfície da cobertura e a interface entre a cobertura e o rejeito (ver Gráficos 4.19 e 4.20). Os valores de fluxo negativo são correspondentes ao fluxo ascendente (evaporação) enquanto que os valores positivos referem-se à infiltração. Portanto, foram calculadas as integrais das partes positivas das curvas de variação do fluxo para se obter a vazão total que infiltrou na superfície e no rejeito. No total, infiltraram 66 litros de água por m<sup>2</sup> através da superfície da cobertura e apenas 16 ml por m<sup>2</sup> através da interface cobertura/rejeito.

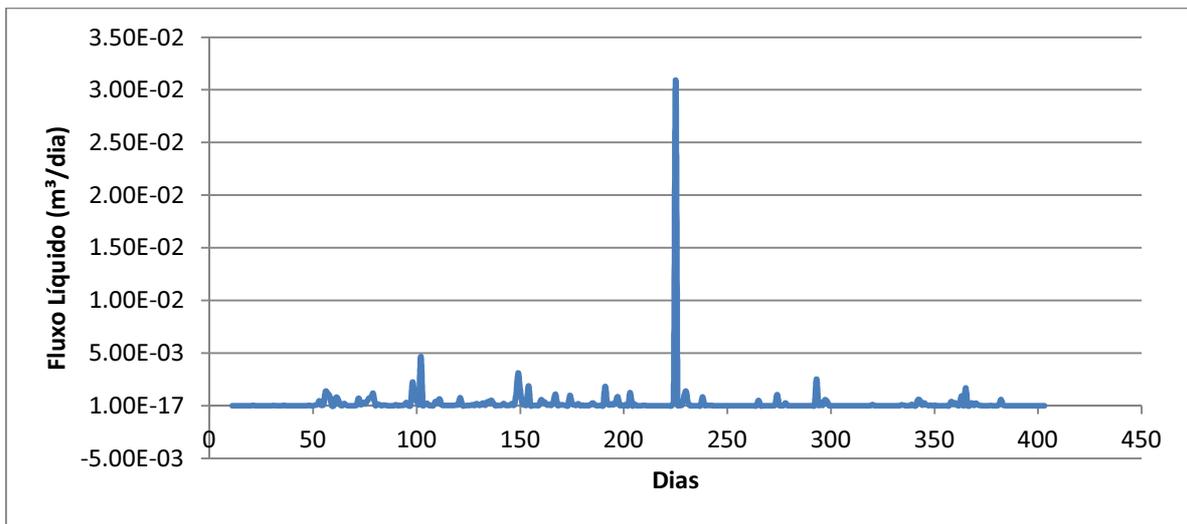


Gráfico 4.19 - Fluxo de água que atravessa a superfície da cobertura.

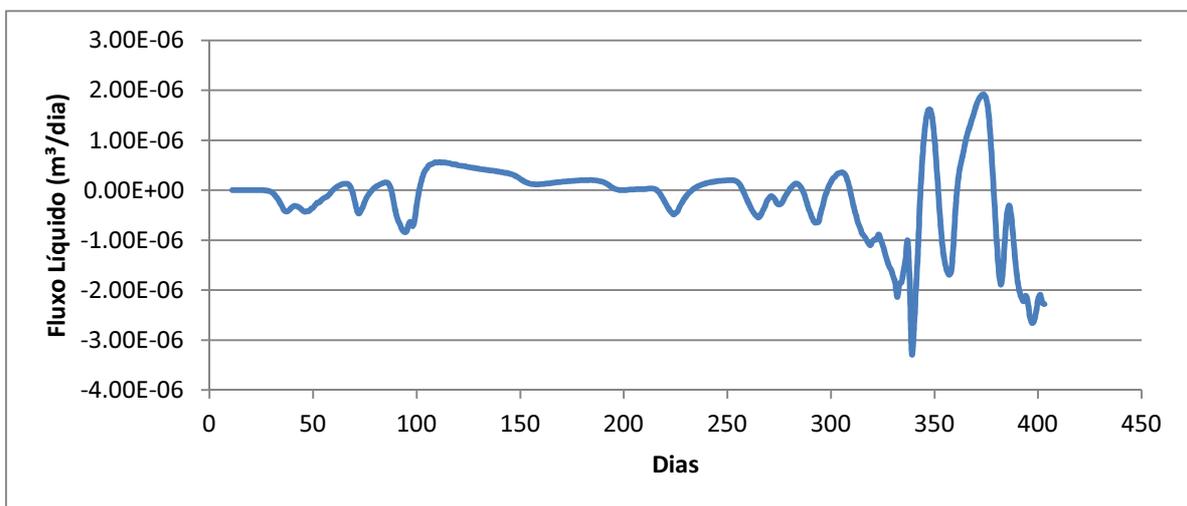


Gráfico 4.20 - Fluxo de água que atravessa a interface cobertura/rejeito.

Os instrumentos medidores de vazão de percolação não mediram nenhum valor que indicasse percolação pela cobertura chegando até o rejeito, o que é coerente com aquele calculado pelo Vadose (16 ml/m<sup>2</sup>), que de tão pequeno seria insuficiente para ser contabilizado. Dessa maneira, pode-se concluir que a cobertura construída nos lisímetros 2 e 3 tiveram uma eficiência elevada, uma vez que infiltraram 66 litros por m<sup>2</sup> na superfície da cobertura e apenas 16ml por m<sup>2</sup> atingiram o rejeito.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo principal dessa dissertação foi a construção e o monitoramento de um experimento de campo em que se procurou simular sistemas de coberturas de rejeito para fechamento de reservatórios nas mesmas condições propostas em projeto. Também teve como objetivo realizar a comparação entre a modelagem numérica com auxílio do software VADOSE/W e os dados medidos no campo durante o período de um ano. Nesse sentido, os estudos realizados nessa dissertação conduziram para as seguintes conclusões:

- O modelo numérico com os parâmetros dos materiais obtidos no laboratório apresentou a mesma frequência de variações de umidade comparadas às medições de campo, porém os valores de umidade obtidos no modelo foram superiores àqueles medidos nos lisímetros;
- Fizeram-se necessárias adequações nos dados de entrada para aproximar os resultados numéricos aos medidos em campo;
- Dentre os parâmetros de entrada do modelo numérico, as propriedades hidráulicas foram as que provocaram maiores mudanças no comportamento da cobertura;
- Os resultados obtidos após a adequação da modelagem numérica se aproximaram dos valores medidos pelos WCRs. A frequência dos ciclos de umedecimento e ressecamento foi semelhante, porém, nos eventos de umedecimento, o modelo apresenta picos de umedecimento mais elevados do que foi medido nos sensores de umidade;
- O fluxo total de água que passou pela cobertura e chegou ao rejeito determinado pela modelagem numérica foi praticamente nulo e condiz com a ausência de medição de vazão percolada observada no experimento;
- A barreira capilar apresentou funcionamento adequado, para ambos conceitos reproduzidos, uma vez que a camada superficial de armazenamento e liberação umedeceu e secou ao longo de todo o ano, inclusive em sua porção inferior, enquanto o rejeito praticamente manteve-se inalterado quanto à variação de umidade;
- Os valores de período lidos pelos WCRs e transformados em umidade volumétrica pela calibração de laboratório apresentaram valores incoerentes com os observados em campo. A

densidade reproduzida em laboratório estava diferente daquela executada em campo e acredita-se que isso tenha sido a causa da disparidade de valores obtidos pela calibração de laboratório;

- O comportamento dos lisímetros 02 e 03 foram bastante semelhantes, não havendo interação entre cobertura e rejeito no lisímetro 03 devido à geomembrana instalada na interface entre a cobertura e o rejeito;
- Apesar de os furos feitos na geomembrana do lisímetro 01, os sensores instalados logo abaixo desses furos não detectaram nenhum acréscimo de umidade;
- Como era esperado, sistemas de cobertura de armazenamento e liberação se mostraram eficientes para o clima semiárido da região. Os resultados dos experimentos irão subsidiar o dimensionamento do sistema de cobertura para o reservatório da MFB com maior segurança quanto à mitigação de impactos ambientais, tal como a drenagem ácida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHOU, T. Technical Academic meeting of Field Evaluation of Evapotranspiration Caps. 2003

ABICHOU, T.; LIU, X.; TAWFIQ, K. *Design of Cost Effective Lysimeters for Alternative Landfill Cover Demonstrations Projects FAMU*. FSU College of Engineering State University System of Florida, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, University of Florida, USA, 2004, 88 p.

AITCHISON, G. D. Review panel statement: Engineering concepts of moisture equilibria and moisture changes in soils. In: CONFERENCE ON MOISTURE EQUILIBRIA AND MOISTURE CHANGES IN SOIL BENEATH COVERED AREAS, 1, 1965, London, England. Proceedings... London: Butterworths, 1965, p. 7-21.

ALBRIGHT, W.; BENSON, C.; GEE, G.; ROESLER, A.; ABICHOU, T.; APIWANTRAGOON, P.; LYLES, B.; ROCK, S. Field Water Balance of Landfill Final Covers. *J. of Environmental Quality*, Vol.33, p. 2317 - 2332, nov. - dez. 2004.

ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. Special problems soils, In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, X. 1987, Dublin, Ireland. Proceedings... Dublin, General Report, 1987. Session 5, p. 5.1-5.60.

AMORIM, N.R. *Avaliação do Desempenho de Sistemas de Cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM)*. 2008. 143 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação*. Rio de Janeiro, 2004a. 71 p.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10005: Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro, 2004b. 16 p.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10006: Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro, 2004c. 3 p.

BAIXAR MAPAS. Mapa político do Brasil com estados e capitais. Disponível em <<http://www.baixarmapas.com.br/mapa/mapa-do-brasil/>>. Acesso em: 20 abril de 2014.

BENSON, C.; ABICHOU, T.; ALBRIGHT, W.; G.GEE; ROESLER, A. Field Evaluation of Alternative Earthen Final Covers. *International J. of Phytoremediation*, Vol. 3, p. 105 - 127, dez. 2001.

BOLEN, M.; ROESLER, A.; BENSON, C.; ALBRIGHT, W. *Alternative Cover Assessment Program*: Phase II report. Madison: Geo Engineering Report No. 01-10, University of Wisconsin, 2001. 86 p. Relatório.

BROOKS, R. J.; COREY A. T. *Hydraulic properties of porous media.*, Hydrological Papers, Colorado State University, Fort Collins, 1964.

BURDINE , N.T. Relative permeability calculation size distribution data. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. Vol 198, p. 71-18. 1953.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. Instruction Manual: CS616 and CS625 Water Content Reflectometer. Revision 2/14, Logan, 2014. Disponível em <<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs616.pdf>>. Acesso em: 19 de mar. 2014.

CARLSSON, E. *Sulphide-Rich Tailings Remediated by Soil Covers*:Evaluation of Cover Efficiency and Tailings Geochemistry. 2002. 192 p. Doctoral Thesis, Luleia University of Technology, Luleia, 2002.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação Normativa N° 127: Estabelece Diretrizes e Procedimentos para Avaliação Ambiental da Fase de Fechamento de Mina. Belo Horizonte, 2008. Não Paginado.

CHOTPANTARAT, SRILERT. A Review of Static Tests and Recent Studies. American Journal of Applied Sciences, New York, v. 8, n. 4, p. 400-406, Abril. 2011

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. [Texto de Diagnóstico da Mineração no Brasil]. [S.l], 2005. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/planoplurianual/pluger01.html>>. Acesso em: 10 dez. 2013

DNPM, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Portaria n° 237 de 18 de Outubro de 2001: Determinar as Normas Reguladoras de Mineração. [S.l], 2001. Não Paginado

DIAS, C.O. *Determinação da Condutividade Hidráulica de Solos*.2012. 227 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós graduação em Engenharia e Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

DUARTE, L.B. *Avaliação Numérica do Dimensionamento de Sistemas de Cobertura para Reservatórios de Disposição de Resíduos de Mineração*. 2012. 123 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

DWYER, S.F; STORMONT J.C.; CLIFFORD S.A. *Mixed Waste Landfill design Report*. Report SAND99-2514, New Mexico, Albuquerque, Sandia National Laboratories, 1999.

DWYER, S.F. *Water Balance Measurements and Computer Simulations of Landfill Covers*. 2003. 250 p. Doctoral Thesis, The University of New Mexico, Albuquerque, 2003.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E.; TOHA, F. X. *Mechanical behavior and testing method of unsaturated soils: Lab Shear Strength of Soils*, ASTM STp 740, American Society of Testing and Material , 1981, p. 114 -129.

EPA - U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction*. 530-R-94-036. Office of Solid Waste and Remedial Response, Washington, 1994, p. 48.

EPA, U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Field Application of In Situ Remediation Technologies : Permeable Reactive Barriers*. EPA/542/R-99/002. Office of Solid Waste and Remedial Response, Washington, 1999, p. 114.

EPA, U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Introduction to Phytoremediation*. EPA/600/R-99/107. Office of Research and Development, Washington, 2000, p. 72.

EPA, U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers* . 540-R-04-007. Office of Solid Waste and Remedial Response, Washington, 2002, p. 421.

FERGUSON, K.D.; ERICKSON, P. M. *Pre-Mine Prediction of Acid Mine Drainage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.

FORGET, B.; ROLLIN, A.L; JACQUELIN, T. Impacts and Limitations of Quality Assurance on Geomembrane Integrity. *Proceedings NAGS 2005/GRI-19*, Las Vegas, p. 9, dec. 2005. Italy;

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.103, n. GT5, p. 447-466, 1977.

FREDLUND D. G.; RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, USA, 1993, 517 p.

FREDLUND, D. G. Appropriate Concepts and technology for unsaturated soils. Canadian Geotechnical Colloquium, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, n.1, p. 121-139, 1979.

FREDLUND, D.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil – water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 31, p. 533-546. 1994

FREDLUND, D. G.; XING A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, p. 521-532. 1994.

GALATTO, L.S. Avaliação da eficiência de coberturas secas sobre rejeito de carvão visando À prevenção da drenagem ácida de mina. 2006. 129 f. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2006.

GARDNER , W.R. Some steady state solutions for the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), p.228-232. 1958.

GEO-STUDIO. *Vadose zone modeling with VADOSE/W 2007*. GEO-SLOPE International Ltd. Third Edition, Calgary, 2008, p. 336.

GOOGLE EARTH MAPAS. Disponível em : < <http://www.guiageo.com/brasil-mapa.htm>>. Acesso em 21 nov. 2013.

GUIZELINI, A. P. *Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários*. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Curitiba, 2011, 166 f.

HYDROLOGICAL SERVICES. Manual de Instruções: Medidor de vazão tipo balde basculante, Modelo TB1L. 2012.

INAP, INTERNATIONAL NETWORK FOR ACID DRAINAGE PREVENTION. *Global Acid Rock Drainage Guide*. Versão 0.8. Disponível em: <<http://www.gardguide.com/index.php>>. Acesso em 14 jan. 2014.

ITRC, INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL. *Technical and regulatory guidance for design, installation, and monitoring of alternative final landfill covers*. Alternative Landfill Technologies Team, 2003, 125 p.

JENNINGS, S.R., NEUMAN, D.R. AND BLICKER, P.S. *Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review*. Bozeman: Reclamation Research Group, 2008. 26 p. Relatório.

JOHNSON, D. B.; HALLBERG, K.B. *Acid Mine Drainage Remediation Options: A Review*. Science of Total Environment, Bangor, 338, p. 3-14, 2005.

JUNQUEIRA, F. F.; VILLEFORT, L. F. C.; MAFRA, J. M. Avaliação da utilização de sistemas de cobertura de solos aplicados ao fechamento de minas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 7, Belo Horizonte, 2011, Não Paginado.

LAMBE, T. W.; WITHMAN, R. V. *Soil mechanics*, SI Version. John Wiley & Sons, New York, 1969.

LANGONI, G. *Feasibility of Evapotranspiration Covers for Florida Landfills*. 2008. 100 p. M. S. Thesis, Florida State University, USA, 2002, 100 p.

LEE, H.C.; WRAY, W.K. Techniques to evaluate soil suction: a vital unsaturated soil water variable. In: I INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOIL, 1995, Paris, p. 615-622.

LOPES, M. B. L. Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG. 2006. 175 p. Dissertação (mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MCCARTNEY, J.S. e PARKS, J. Uncertainty in predicted hydraulic conductivity functions of unsaturated soils. 17th ICSMGE Conference. Alexandria, p. 4, 2009.

MASROURI, F.; BICALHO, K. V.; KATSUYUKI, K. Laboratory hydraulic testing in unsaturated soils. Geotech Geol Eng, 2008, 26, p 691-704.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS (ÑSAT'97), 3, 1997, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 1997. vol. 2, p. 373-398.

MARINHO, F.A.M. *Shrinkage behavior of some plastic soils*. 1994. p. 216. Ph. Thesis, University of London, Imperial College of Science, London, 1994.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, Vol. 12 (3). p. 513–522. 1976.

MONCADA, M.P.H. *Estudo em Laboratório de Características de Colapso e Transporte de Solutos Associados à Infiltração de Licor Cáustico em um Solo Laterítico*. 2004. 219 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.

NATRON CONSULTORIA E PROJETOS. *Estudo de Impacto Ambiental*, Volume 1, 1986, 256 p. Relatório.

NYHAN, J. W.; HAKONSON, T. E; DRENNON, B. J. A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 19, No 2, p. 281- 288, abr. 1990.

O'KANE, M.; BARBOUR, S.L. Predicting Field Performance of Lysimeters Used to Evaluate Cover Systems for Mine Waste. *6th ICARD*, Cairns, QLD, p. 327 - 329, julho 2003.

O'KANE, M.; BARBOUR, S.L. Predicting Field Performance of Lysimeters Used to Evaluate Cover Systems for Mine Waste. *6th ICARD*, Cairns, QLD, p. 327 - 329, jul. 2003.

PENMAN, H. L. *Natural evapotranspiration from open water, bare soil and-grass*. Proceedings of the Royal Society A. London, 193, 1948, p. 120-145.

QIAN, X., KOERNER, R.N.; GRAY, D.H. *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*. Michigan Department of Environmental Quality, Waste Management Division, USA, 2002, p. 399-437.

REIS, R.M.; STERCK, W.N.; RIBEIRO, A.B.; DELL'AVANZI, E.; SABOYA, F.; TIBANA, F.; MARCIANO, C.R.; SOBRINHO, R.R. Determination of the Soil-Water Retention Curve and the Hydraulic Conductivity Function Using a Smaal centrifuge. *Geotechnical Testing Journal*, Vol 34, n. 5, 2011, p. 10.

RIBEIRO, A.G.C. *Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais*. 2011. 161 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*. Vol 1, p. 318-333, 1931.

ROENICK, F.S.F. *Extração de Ouro Contido em Minério de Baixo Teor Empregando Pilhas de Lixiviação com Cianeto*. 2013. 138 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

STORMONT, J.C.; STOCKTON, T.; RAY, C. *Development of an Geosynthetic Unsaturated Drainage System to Provide Buried Waste Containment*. Report WERC-97-040, New Mexico Waste-management Education and Research Consortium and US Department of Energy, 1999, p.20.

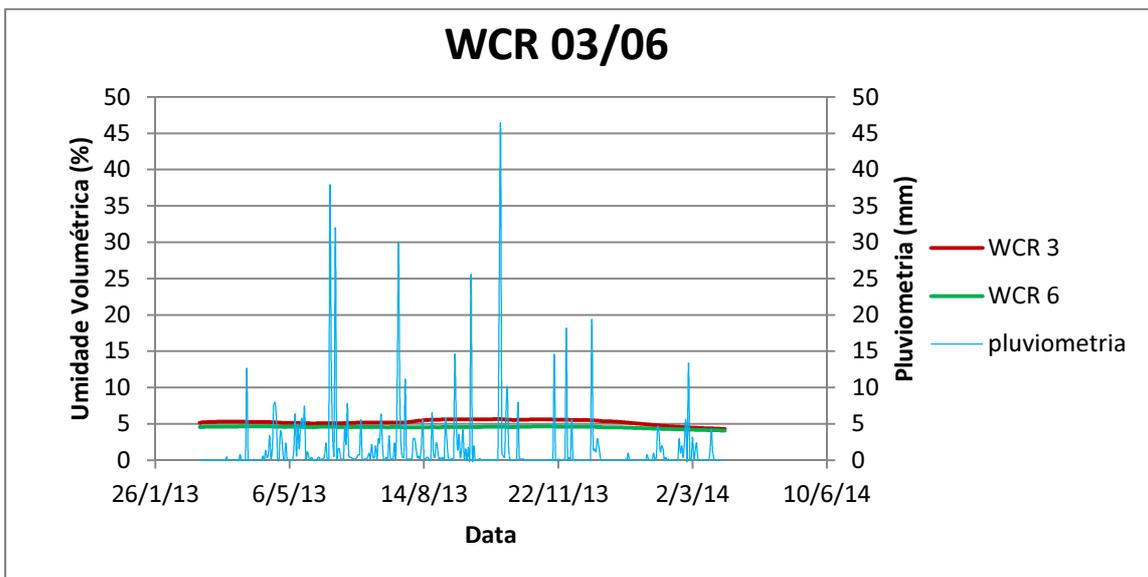
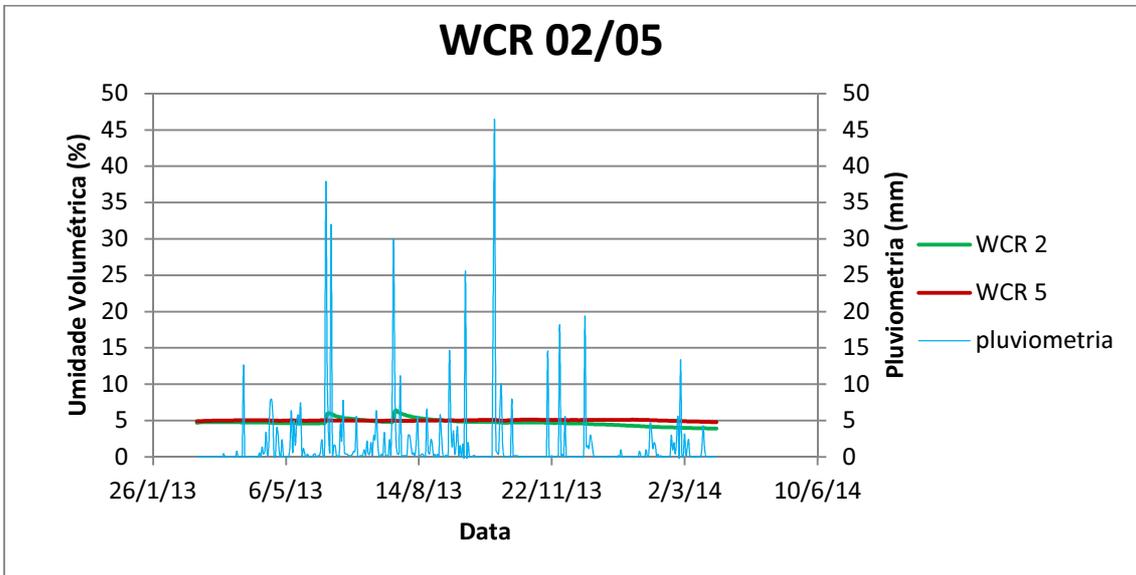
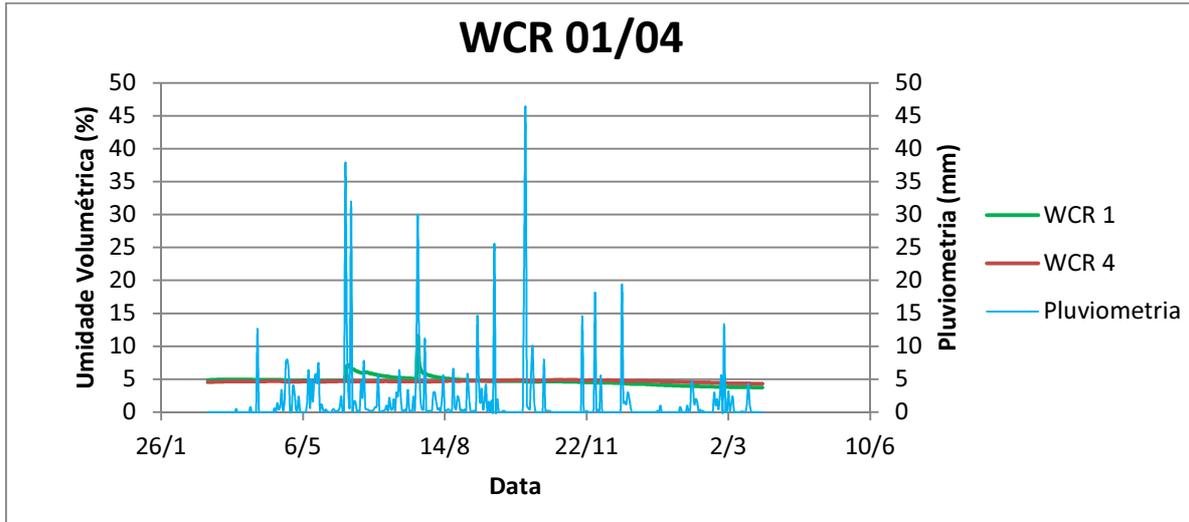
VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 44, p. 892-898, 1980.

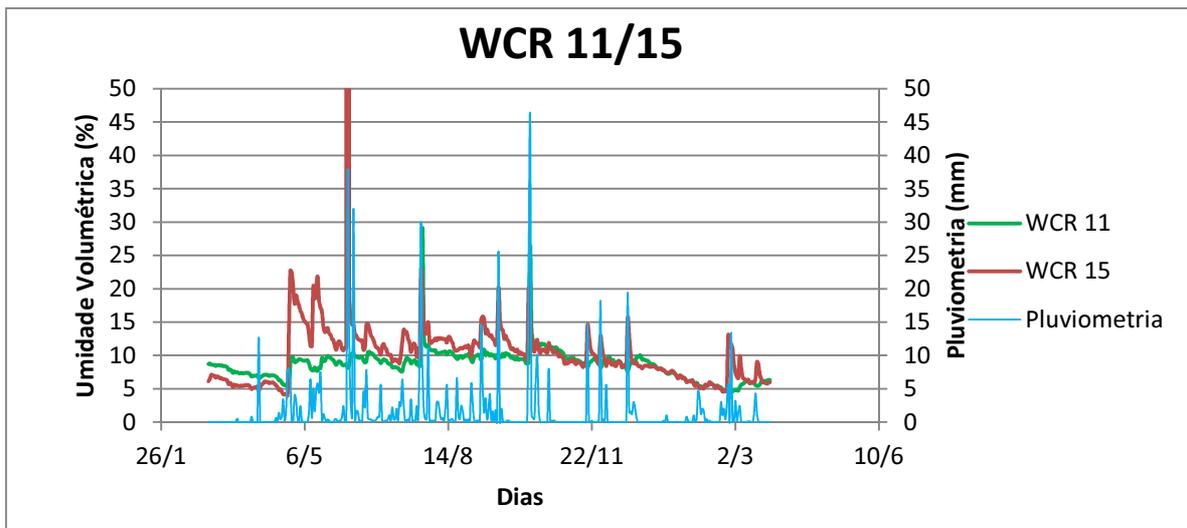
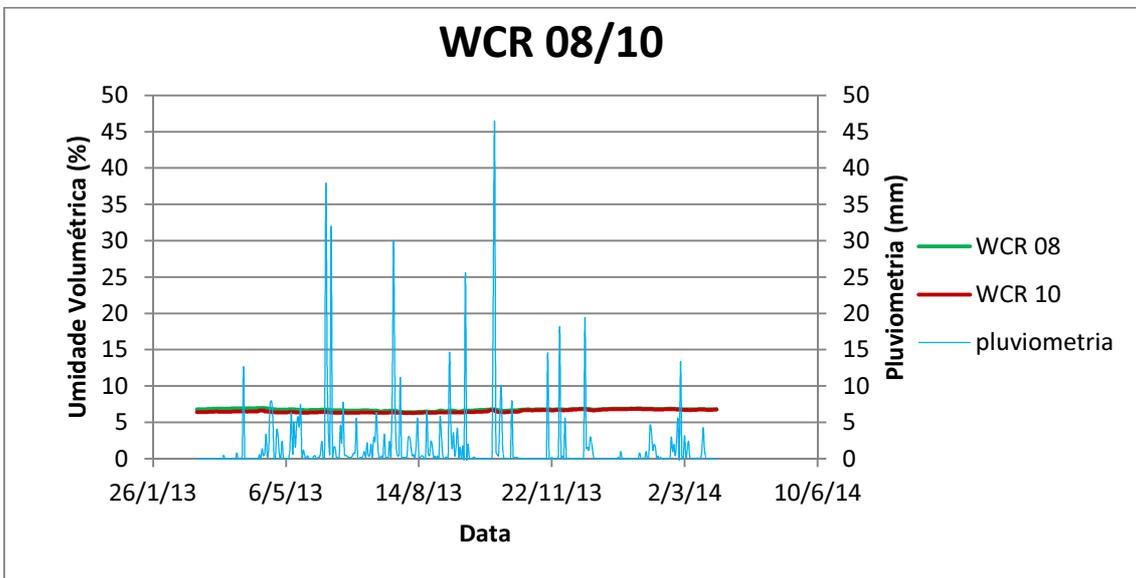
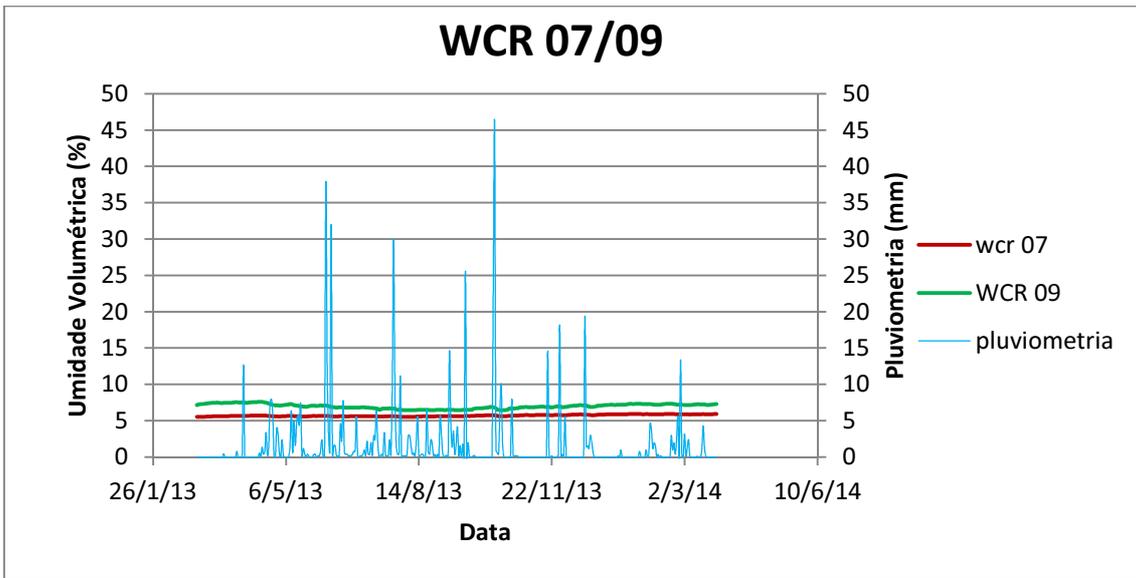
WILSON, G. W. *Soil Evaporation fluxes for geotechnical engineering problems*. 1990. 464 p. Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1990.

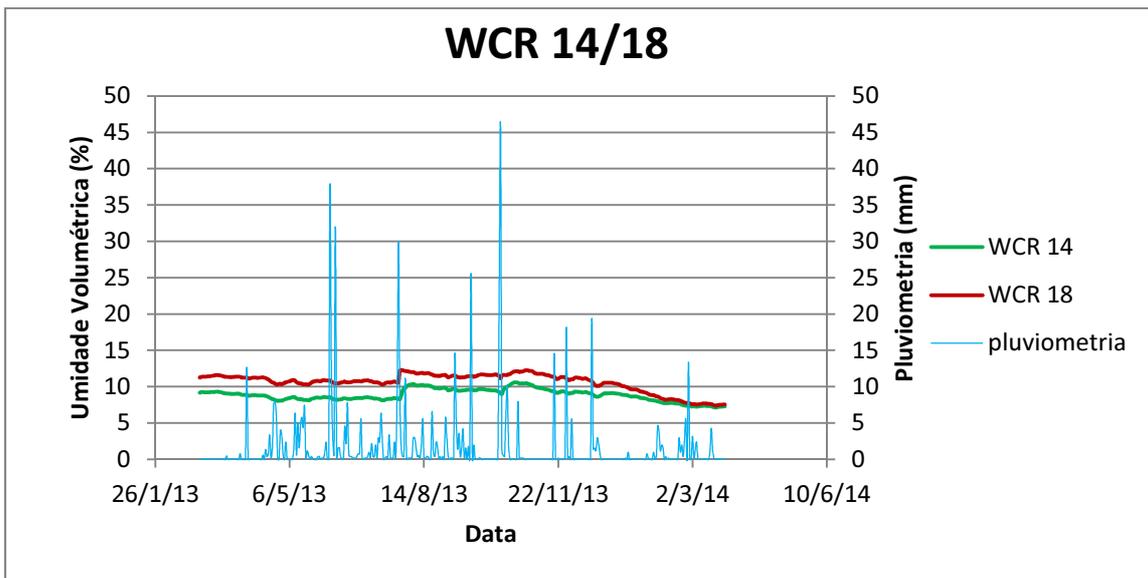
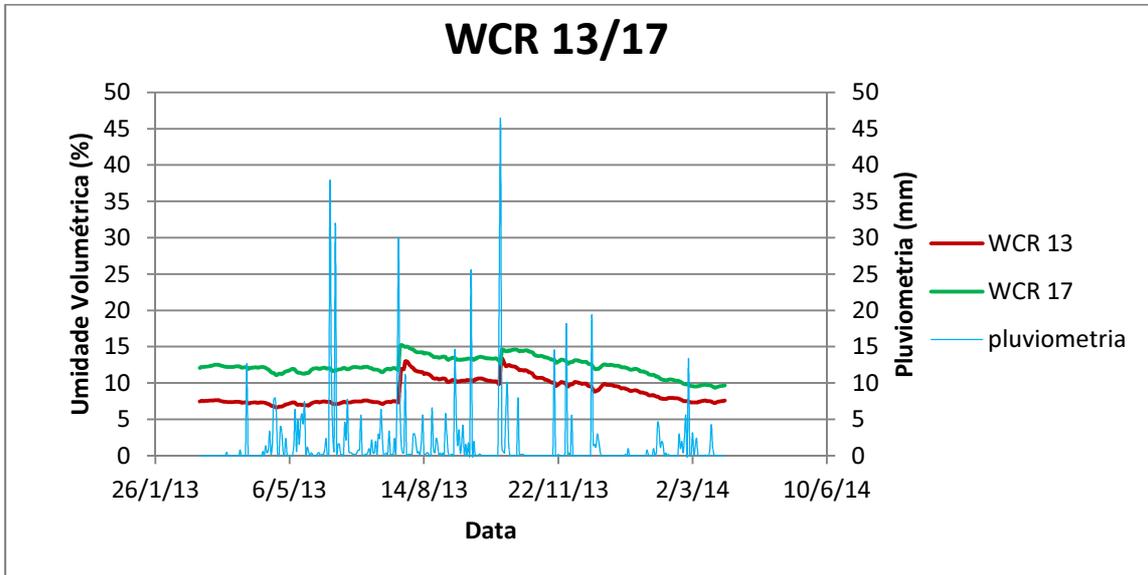
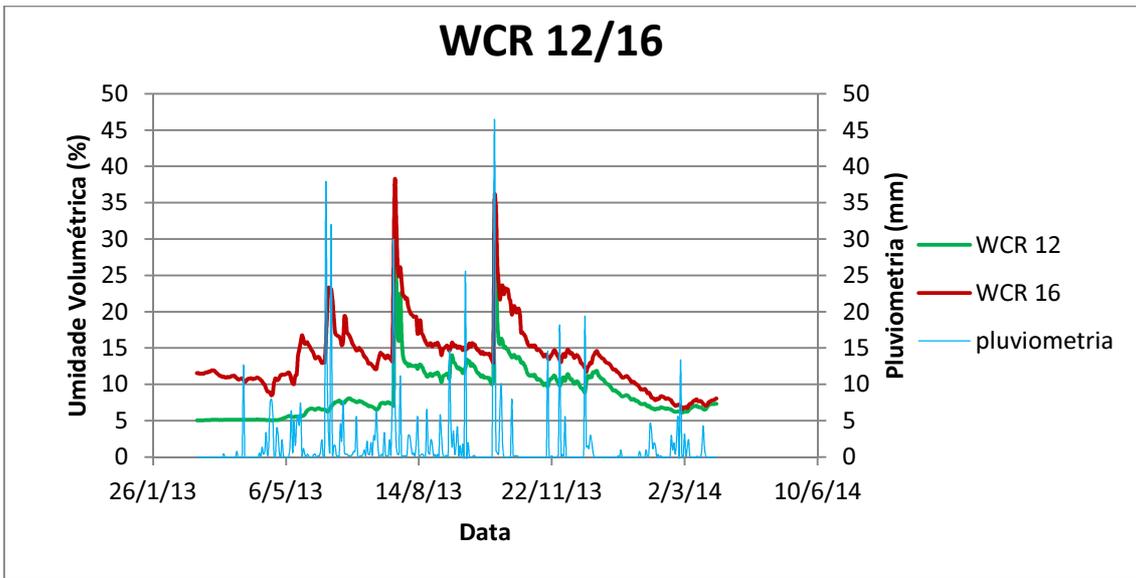
WILSON, G. W.; FREDLUND, D. G.; BARBOUR, S. L. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 31, p. 151-161, 1994.

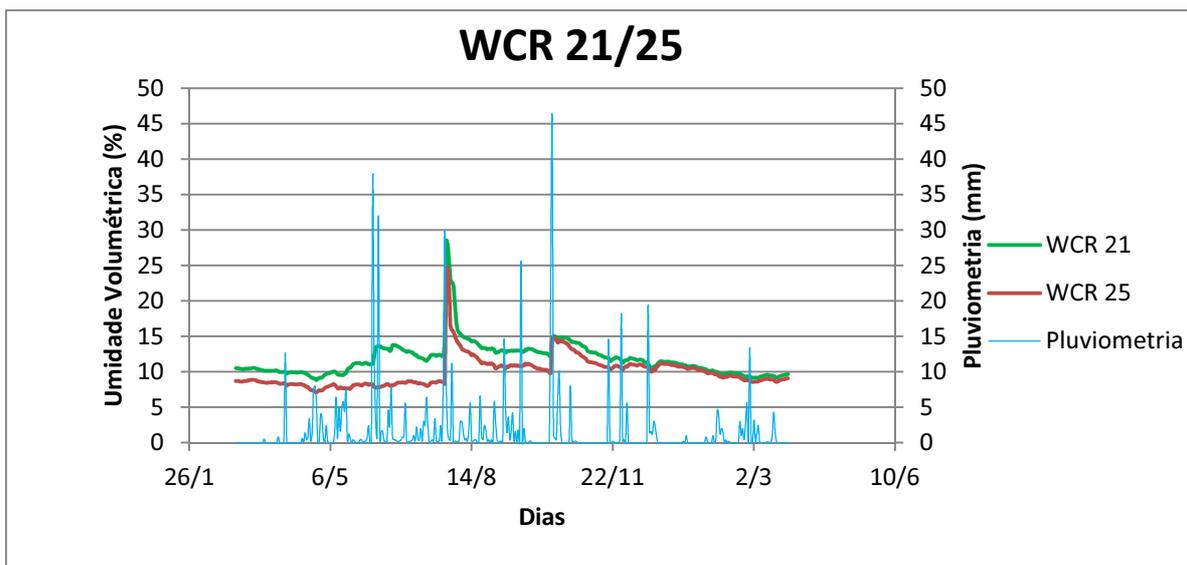
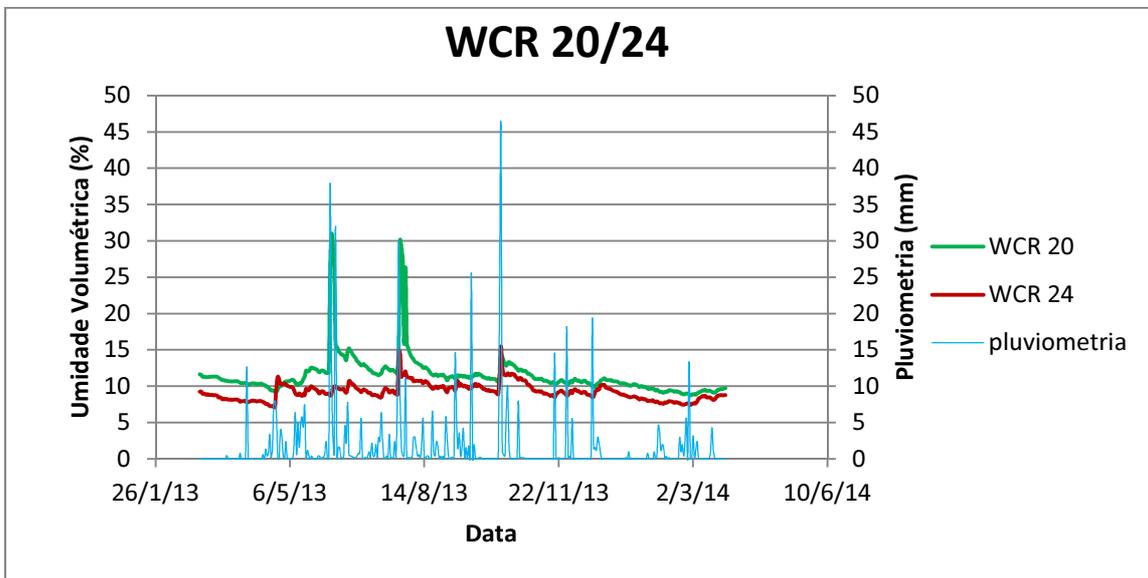
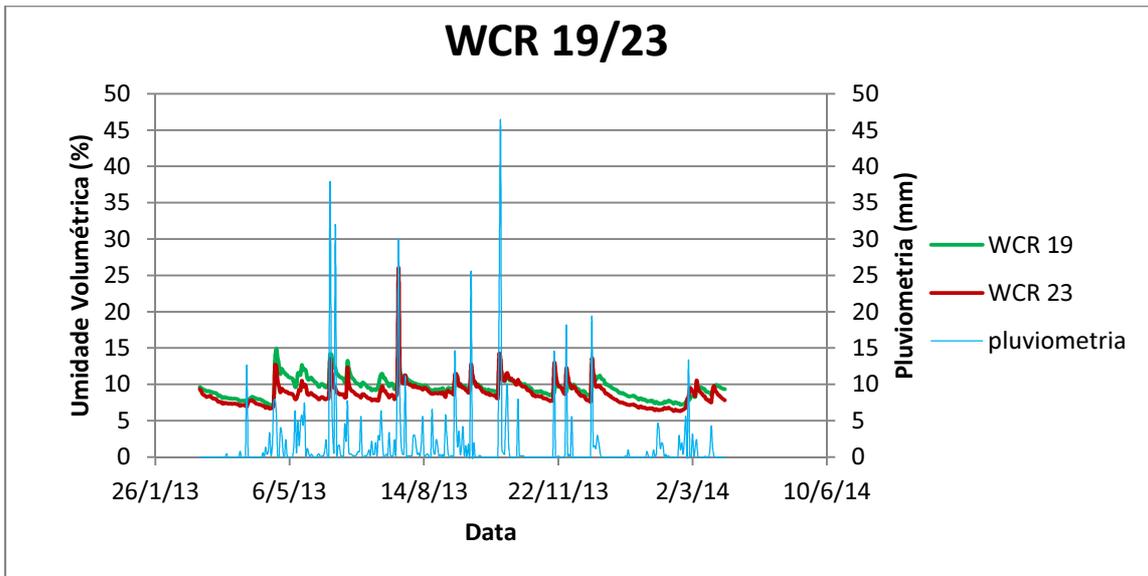
ZORNBERG, J.G.; LAFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J.A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 129, p. 427-438, 2003.

# ANEXO

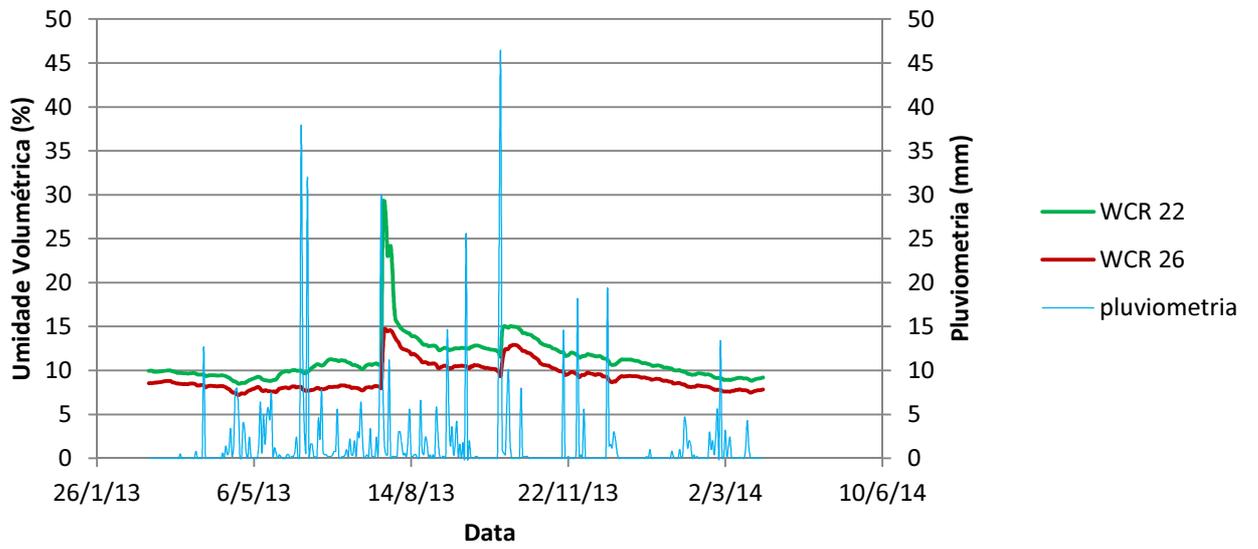




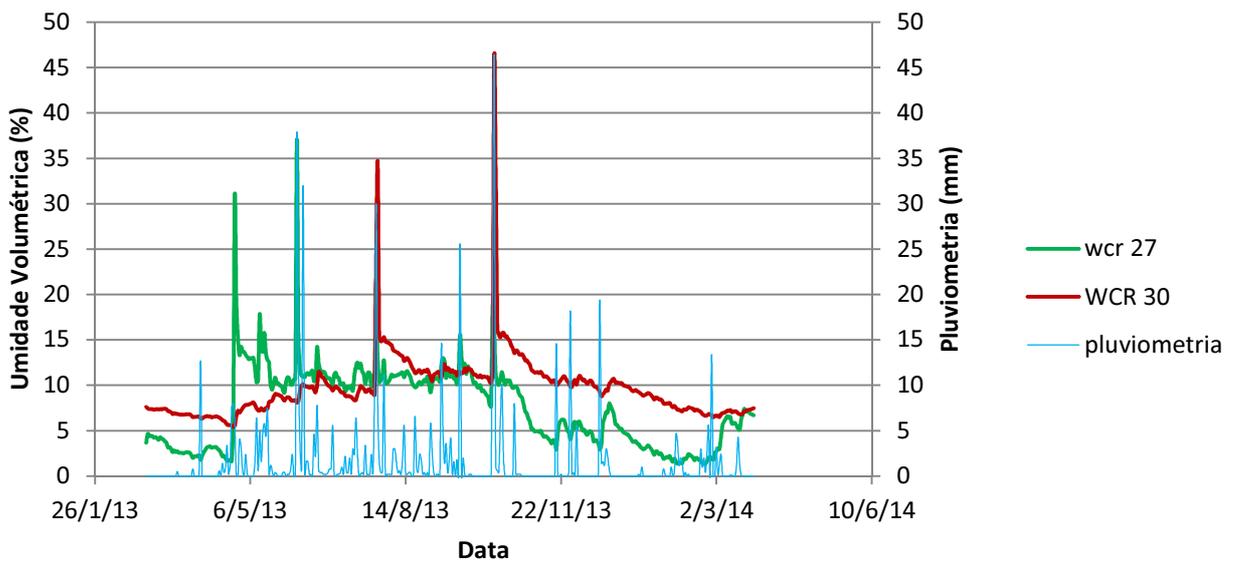




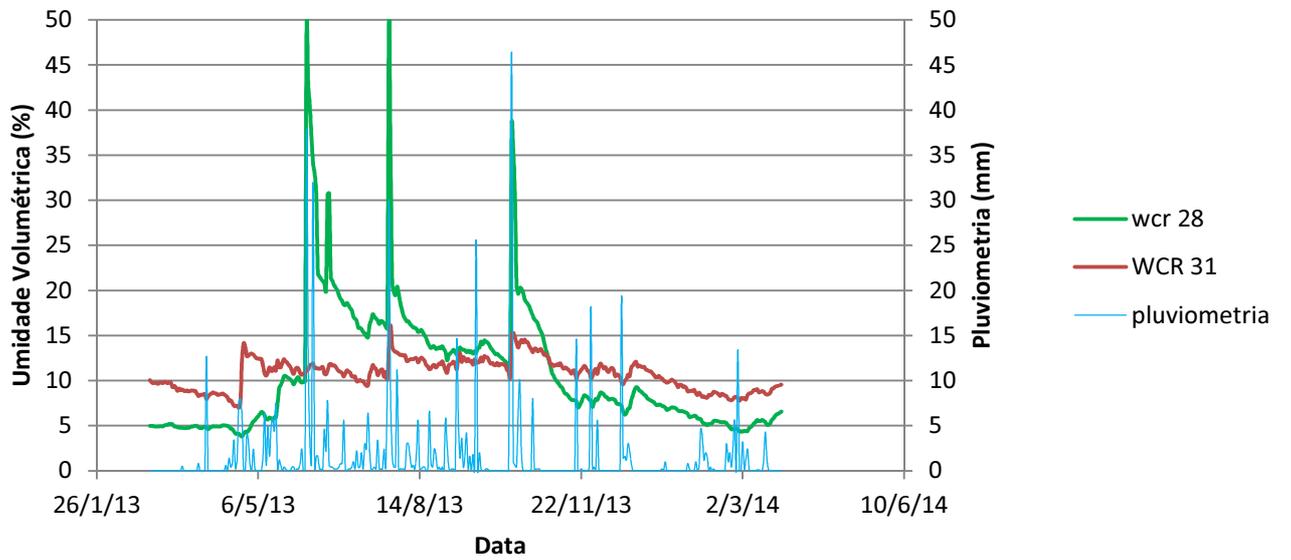
### WCR 22/26



### WCR 27/30



### WCR 28/31



### WCR 29/32

