

NEY ROSARIO AMORIM

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE  
COBERTURA NA MINA RIO PARACATU MINERAÇÃO (RPM)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2008

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A524a  
2008

Amorim, Ney Rosario, 1966-

Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura  
na mina Rio Paracatu Mineração (RPM) / Ney Rosario  
Amorim. – Viçosa, MG, 2008.  
xix, 143f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 139-143.

1. Solos - Recuperação. 2. Minas e recursos minerais -  
Aspectos ambientais - Paracatu (MG). 3. Evapotranspira-  
ção. 4. Solo - Permeabilidade. 5. Lisímetros. 6. Descomis-  
sionamento de Minas. I. Universidade Federal de Viçosa.  
II. Título.

CDD 22.ed. 551.572

NEY ROSARIO AMORIM

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE  
COBERTURA NA MINA RIO PARACATU MINERAÇÃO (RPM)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 19 de Agosto de 2008.

---

Prof. Eduardo A. G. Marques  
(Co-orientador)

---

Prof<sup>a</sup>. Izabel C. Duarte Azevedo  
(Co-orientador)

---

Prof. Rodrigo Martins Reis

---

Prof. Luiz Eduardo Dias

---

Prof. Roberto Francisco de Azevedo  
(Orientador)

À Deus,  
A minha esposa Rita,  
A meus filhos Pedro e Livia  
A meus pais Jose e Lourdes,  
A minha irmã Luzi

## AGRADECIMENTOS

Muitos são os que merecem o meu agradecimento, mas em especial gostaria de citar:

Ao meu amigo e orientador Roberto Azevedo que me orientou, me estimulou, me apoiou e a muito lhe devo pela conclusão deste trabalho;

A empresa RPM Mineração pelo apoio na cessão da área para a instalação do experimento, no financiamento das minhas despesas de viagem e hospedagem, no custeio do experimento e por acreditar no nosso trabalho;

Ao meu amigo Osmar, biólogo da RPM que fez de tudo para que este trabalho fosse concretizado;

A outros tantos colegas da RPM, em especial o Leonardo, Tales e Moacir que contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao meu colega André Ribeiro, pelo apoio prestado principalmente com relação aos ensaios especiais desenvolvidos e formatação deste trabalho;

Ao meu amigo Eduardo Marques pelo incentivo na conclusão deste trabalho;

A Golder Brasil pela compreensão e aceitação que este trabalho fosse conciliado com os demais que eram de minha responsabilidade;

A minha esposa e filhos por entenderem a minha ausência no decorrer destes anos de estudo.

## **BIOGRAFIA**

**NEY ROSÁRIO AMORIM**, filho de José Caires Amorim e Maria de Lourdes do Rosario Amorim, nascido em Ataléia, Minas Gerais, em 31 de agosto de 1966.

Em dezembro de 1988 graduou-se Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais.

Em Março de 1994 obteve o título de Mestre em Engenharia Geotécnica pela Universidade de São Paulo, campus de São Carlos, São Paulo.

Cursou Especialização em Gestão de Negócios na FUMEC em 1999

Em Março de 2003 iniciou o curso de Doutorado na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

Professor Universitário na UNIVALE e Faculdades Kennedy, desde 1993

Constante atuação profissional na área de Consultoria e Projetos de Geotecnia de Mineração desde 1993

Nesta data, é sócio da Empresa Geoestrutural Consultoria e Projetos Ltda.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xix</b>
<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 – Considerações Gerais.....	1
1.2 - Objetivo .....	3
1.3 - Organização da Tese.....	4
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Coberturas Convencionais.....	6
2.3 - Coberturas Evapotranspirativas.....	8
2.3.1 – Coberturas Monolíticas .....	11
2.3.2 – Coberturas com Barreiras Capilares.....	12
2.4 – Equivalência Hidráulica.....	16
2.5 – Métodos para a Avaliação da Percolação no Campo.....	17

2.5.1 – Métodos Indiretos .....	18
2.5.2 – Métodos Diretos - Lisímetros .....	21
2.6 – Vegetação.....	32
2.6.1 – Espécies de Plantas.....	33
2.6.2 – Crescimento Vegetativo .....	34
2.6.3 – Estrutura e Profundidade das Raízes .....	34
2.6.4 – Índice de Área Foliar .....	35
2.6.5 – Capacidade de Campo .....	35
2.6.6 – Ponto de Murcha .....	35
2.6.7 – Capacidade de Armazenamento de Água no Solo .....	36
2.7 – Aspectos Relevantes Relativos ao Projeto de Engenharia de uma Cobertura	36
2.7.1 – Critérios de Desempenho da Cobertura.....	37
2.7.2 – Projeto Preliminar/Conceitual .....	37
2.7.3 – Caracterização Local .....	37
2.7.4 – Análise de Sensibilidade Através de Modelagem Numérica .....	38
2.7.5 – Projeto Final .....	39
2.8 – Trabalhos já Realizados na Área da Pesquisa em Paracatu .....	40
<b>3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
3.1 – Localização e Caracterização da Região do Experimento.....	45
3.2 – Metodologia .....	45



3.3 – Levantamento dos Dados Existentes .....	48
3.4 – Concepção dos Experimentos de Campo.....	50
3.5 – Construção das Camadas de Cobertura .....	52
3.5.1 – Introdução.....	52
3.5.2 – Preparação da Fundação .....	53
3.5.3 – Construção dos Lisímetros .....	56
3.5.4 – Lançamento dos Solos das Coberturas .....	66
3.5.4.1 – Solo Coesivo da Cobertura 1 (argila).....	66
3.5.4.2 – Barreira Capilar (Cascalho) da Cobertura 2.....	68
3.5.4.3 – Interface entre o Cascalho e o Solo Siltoso.....	69
3.5.4.4 – Solo Siltoso das Coberturas 1 e 2.....	69
3.5.4.5 – Solo Orgânico das Coberturas 1 e 2.....	70
3.5.5 – Instalação das Bermas do Sistema de Coleta das Águas Superficiais.....	71
3.5.6 – Instalação do Sistema de Coleta e Medida do Escoamento Superficial..	71
3.5.7 – Instrumentação .....	75
3.5.7.1 – Introdução .....	75
3.5.7.2 – Monitoramento da Infiltração .....	76
3.5.7.3 – Monitoramento do Perfil de Umidade do Solo .....	76
3.5.7.3.1 – Calibração dos TDRs .....	79
3.5.7.4 – Monitoramento da Sucção no Solo .....	82
3.5.7.4.1 – Calibração dos HDUs .....	83

3.5.7.5 – Instalação dos Instrumentos .....	83
3.5.8 – Vegetação .....	87
3.6 – Ensaios Especiais de Laboratório .....	88
3.6.1 – Determinação da Curva de Retenção de Água .....	88
3.6.1.1. – Método do Papel Filtro .....	88
3.6.1.2. – Método do Extrator de Richards .....	91
3.6.2 – Ajuste da Curva de Retenção .....	94
3.6.3 – Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada .....	95
3.7 – Análise Numérica .....	95
3.7.1 – Modelo Matemático.....	96
3.7.2 - Parâmetros de Entrada do Modelo .....	99
3.7.2.1 - Parâmetros Geotécnicos.....	99
3.7.2.2 - Parâmetros Climáticos .....	99
3.7.2.3 - Parâmetros da Vegetação.....	102
<b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>106</b>
4.1 – Plantio e Crescimento das Espécies.....	106
4.2 – Resultado dos Ensaios de Laboratório.....	107
4.2.1 – Resultado dos Ensaios de Caracterização e Permeabilidade.....	107
4.2.2 – Resultado dos Ensaios Especiais .....	110
4.3 – Resultados de Campo.....	113

4.4 – Resultados do Modelo Numérico .....	121
4.5 – Comparação dos Resultados (Campo X Modelo).....	125
<b>5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>135</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>139</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Classificação dos lisímetros segundo Hansen et alli (2000).....	23
<b>Tabela 2.2</b> - Alguns exemplos de projetos de lisímetros relatados na literatura, apud Hansen et alli (2000).....	29
<b>Tabela 2.3</b> - Estudos relacionados ao problema de fluxo pelas paredes laterais dos lisímetros, apud Hansen et alli (2000).....	31
<b>Tabela 3.1</b> - Cronograma dos trabalhos realizados. ....	53
<b>Tabela 3.2</b> – Espécies e densidade de sementes utilizada para compor a cobertura vegetal do experimento. ....	87
<b>Tabela 4.1</b> – Massa específica, Limites de Atterberg e condutividade hidráulica dos materiais das coberturas. ....	107

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa (adaptado de Abichou, et alli, 2004). .....	10
<b>Figura 2.2</b> - Perfil cobertura monolítica (adaptado de Abichou et alli, 2003). .....	12
<b>Figura 2.3</b> - Perfil cobertura monolítica com barreira capilar (adaptado de Abichou et alli, 2003). .....	13
<b>Figura 2.4</b> - (a) Perfil esquemático de uma barreira capilar; (b) Curvas de retenção de água do solo fino e grosseiro; (c) Curvas de condutividade hidráulica. (adaptado de Abichou et alli, 2003). .....	14
<b>Figura 2.5</b> - Perfil de uma barreira capilar inclinada (adaptado de Parent & Cabral 2006). .....	17
<b>Figura 2.6</b> - Perfil de sucção numa cobertura de barreira capilar (adaptado de O’Kane e Barbour, 2003). .....	25
<b>Figura 2.7</b> - Perfis de cargas de pressão para dois lisímetros com profundidades distintas (adaptado de O’Kane e Barbour, 2003). .....	26
<b>Figura 2.8</b> - Funções da condutividade hidráulica não saturada de alguns materiais (adaptado de O’Kane e Barbour, 2003). .....	27
<b>Figura 2.9</b> - Esquema mostrando os quatro tratamentos referentes a camadas selantes e de cobertura utilizados no experimento B2-2000 montado sobre o substrato sulfetado em Paracatu-MG (Dias et al, 2005). .....	41
<b>Figura 2.10</b> - Visão parcial das parcelas referentes aos tratamentos 1 (A), 2 (B), 3 (C) e 4 (D) do experimento B2-2000 implantado em substrato sulfetado remanescente da exploração de ouro em Paracatu-MG (Dias et al, 2000). .....	42
<b>Figura 3.1</b> - Localização da cidade de Paracatu em Minas Gerais. (Imagem Google Earth e Google Maps). .....	47
<b>Figura 3.2</b> - Localização da “Barraginha”, onde foram construídos os sistemas de cobertura. (Imagem Google Earth). .....	48

<b>Figura 3.3</b> - Reservatório preenchido com rejeito inconsolidado. ....	49
<b>Figura 3.4</b> – Vista geral dos experimentos em perspectiva. ....	51
<b>Figura 3.5</b> - Camada de trafegabilidade/fundação (notar o umedecimento da camada e compactação com a carregadeira). ....	54
<b>Figura 3.6</b> - Inclinação de projeto na base dos lisímetro para possibilitar a drenagem. ....	55
<b>Figura 3.7</b> - Lisímetros instalados na porção central da área.....	56
<b>Figura 3.8</b> - Arranjo geral dos experimentos. ....	57
<b>Figura 3.9</b> – Seção típica do sistema de cobertura 1.....	58
<b>Figura 3.10</b> - Seção típica do sistema de cobertura 2.....	59
<b>Figura 3.11</b> - Preenchimento dos lisímetros com brita 1. ....	60
<b>Figura 3.12</b> - Tubo para coleta da água dos lisímetros e galão coletor para a realização das medidas.....	61
<b>Figura 3.13</b> - Ancoragem da geomembrana e do geotêxtil.....	62
<b>Figura 3.14</b> - Detalhe da soldagem da geomembrana por fusão.....	63
<b>Figura 3.15</b> - Lançamento do geotêxtil sobre a camada de brita 1 (observar ancoragem do geotêxtil e trasparse entre os materiais). ....	63
<b>Figura 3.16</b> - Saída da drenagem na base do lisímetro (adaptado de ACAP, 2001). 64	
<b>Figura 3.17</b> - Detalhe da ligação do tubo PVC com a geomembrana (PEAD).....	65
<b>Figura 3.18</b> - Instalação da geomembrana nos lisímetros e nas paredes laterais (notar profundidade dos lisímetros - parede lateral).....	66
<b>Figura 3.19</b> - Lançamento e compactação da argila.....	67
<b>Figura 3.20</b> - Realização de ensaio para a determinação da densidade <i>in situ</i> com cilindro biselado. ....	68

<b>Figura 3.21</b> - Lançamento da camada de cascalho – barreira capilar. ....	69
<b>Figura 3.22</b> - Solo siltoso lançado e início do lançamento do solo orgânico.....	70
<b>Figura 3.23</b> - Sistema de coleta e medida das águas pluviais. ....	73
<b>Figura 3.24</b> - Caixa coletora de água/contenção de sedimentos sem cobertura.....	74
<b>Figura 3.25</b> - Caixa coletora da drenagem superficial em operação (notar entrada da caixa). ....	74
<b>Figura 3.26</b> - Instrumento para medir umidade em campo - TDR (EPA, 2002). ....	77
<b>Figura 3.27</b> - Instalação do TDR (EPA, 2002). ....	78
<b>Figura 3.28</b> - TDR utilizado nos experimentos e datalogger, Campbell Scientific, Inc.....	79
<b>Figura 3.29</b> - Escavação de poços na cobertura e retirada de amostras indeformadas. ....	80
<b>Figura 3.30</b> - Saturação das amostras para calibração dos equipamentos. ....	81
<b>Figura 3.31</b> - Amostras indeformadas com os TDRs e cabos, dentro da estufa. ....	81
<b>Figura 3.32</b> - Unidade de dissipação de calor (EPA, 2002).....	82
<b>Figura 3.33</b> - Esquema de instalação do monitoramento (TDR/HDU).....	84
<b>Figura 3.34</b> - Instalação dos equipamentos na parede do poço, no solo de cobertura. ....	84
<b>Figura 3.35</b> - TDRs e HDUs instalados em diferentes profundidades e solos.....	85
<b>Figura 3.36</b> - Instalação da caixa de controle e painel solar. ....	85
<b>Figura 3.37</b> - Caixa de controle onde são realizadas as leituras dos TDRs. ....	86
<b>Figura 3.38</b> - Visão geral da cobertura (Notar o sistema de monitoramento protegido com cerca. Ao fundo, caixa de passagem das águas pluviais coberta com telha).....	86

<b>Figura 3.39</b> - Vista dos experimentos já com a instrumentação instalada. ....	87
<b>Figura 3.40</b> - Amostras de solo para realização dos ensaios de laboratório. ....	88
<b>Figura 3.41</b> - Amostra secando ao ar até atingir a saturação desejada.....	89
<b>Figura 3.42</b> - Detalhe da colocação do papel filtro no corpo de prova e posterior embalagem com papel filme. ....	90
<b>Figura 3.43</b> - Corpo de prova devidamente embalado e etiquetado, posteriormente colocado na embalagem plástica e levado para câmara úmida. ....	90
<b>Figura 3.44</b> - Curvas de acompanhamento da variação do peso do papel filtro: (a) após retirar o papel filtro em contato com o solo (Perda de Umidade) e (b) após retirar da estufa (ganho de umidade), (Villar, 2002).....	91
<b>Figura 3.45</b> - Placa de cerâmica e amostras do solo em processo de saturação durante aproximadamente 12 horas. ....	92
<b>Figura 3.46</b> - Detalhe do aparelho Extrator de Richards.....	93
<b>Figura 3.47</b> - Visão geral do ensaio sendo realizado. ....	93
<b>Figura 3.48</b> – Croquis do modelo matemático.....	97
<b>Figura 3.49</b> – Malha de elementos finitos da cobertura 1 gerado no VADOSE/W..	98
<b>Figura 3.50</b> – Malha de elementos finitos da cobertura 2 gerado no VADOSE/W..	98
<b>Figura 3.51</b> - Dados de precipitação obtidos da estação metereológica na RPM. ...	100
<b>Figura 3.52</b> - Dados de temperatura obtidos da estação metereológica na RPM....	100
<b>Figura 3.53</b> - Dados de umidade relativa obtidos da estação metereológica na RPM. .....	101
<b>Figura 3.54</b> - Dados de velocidade do vento obtidos da estação metereológica na RPM. ....	101
<b>Figura 3.55</b> - Dados de radiação solar obtidos da estação metereológica na RPM.	102
<b>Figura 3.56</b> - Coleta da espécie vegetal para medição das raízes. ....	104



<b>Figura 3.57</b> - Medição das raízes e obtenção do parâmetro.....	104
<b>Figura 4.1</b> – Cobertura vegetal (Maio/2008)-experimentos em operação. ....	106
<b>Figura 4.2</b> - Curva granulométrica do solo superficial (top-soil) – NBR 6502/95. ....	108
<b>Figura 4.3</b> - Curva granulométrica do solo siltoso – NBR 6502/95. ....	108
<b>Figura 4.4</b> - Curva granulométrica do solo argiloso – NBR 6502/95. ....	109
<b>Figura 4.5</b> - Curva granulométrica do solo granular (barreira capilar) – NBR 6502/95.....	109
<b>Figura 4.6</b> - Curva granulométrica do solo de fundação (trafegabilidade) – NBR 6502/95.....	110
<b>Figura 4.7</b> - Curva de retenção do solo superficial (top-soil). ....	111
<b>Figura 4.8</b> - Curva de retenção do solo siltoso.....	111
<b>Figura 4.9</b> - Curva de retenção do solo argiloso. ....	112
<b>Figura 4.10</b> - Curva de retenção do solo granular (barreira capilar).....	112
<b>Figura 4.11</b> - Curva de retenção do solo de fundação (trafegabilidade). ....	113
<b>Figura 4.12</b> - Perfil esquemático do lisímetro 1 com a posição dos instrumentos..	114
<b>Figura 4.13</b> - Perfil esquemático do lisímetro 2 com a posição dos instrumentos..	115
<b>Figura 4.14</b> – Lisímetro 1 (solo superficial): Umidade Volumétrica X Precipitação X Tempo. ....	115
<b>Figura 4.15</b> – Lisímetro 2 (solo superficial): Umidade Volumétrica X Precipitação X Tempo. ....	116
<b>Figura 4.16</b> – Lisímetro 1 (solo siltoso): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo. ....	117
<b>Figura 4.17</b> – Lisímetro 2 (solo siltoso): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo. ....	117

<b>Figura 4.18</b> – Lisímetro 1 (solo argiloso): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo. ....	118
<b>Figura 4.19</b> – Lisímetro 2 (barreira capilar): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo. ....	118
<b>Figura 4.20</b> – Lisímetro 1 (trafegabilidade): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo. ....	119
<b>Figura 4.21</b> – Lisímetro 2 (trafegabilidade): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo. ....	119
<b>Figura 4.22</b> - Balanço hídrico gerado pelo modelo referente ao sistema de cobertura 1.....	121
<b>Figura 4.23</b> - Balanço hídrico gerado pelo modelo referente ao sistema de cobertura 2.....	122
<b>Figura 4.24</b> - Perfil de umidade gerado pelo modelo referente ao sistema de cobertura 1.....	123
<b>Figura 4.25</b> - Perfil de umidade gerado pelo modelo referente ao sistema de cobertura 2.....	124
<b>Figura 4.26</b> – Solo superficial (TDR 7): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO). ....	126
<b>Figura 4.27</b> – Solo siltoso (TDR 3): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO). ....	127
<b>Figura 4.28</b> – Solo argiloso (TDR 2): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO). ....	128
<b>Figura 4.29</b> – Trafegabilidade (TDR 4): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO). ....	129
<b>Figura 4.30</b> – Solo superficial (TDR 8): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO). ....	130
<b>Figura 4.31</b> – Solo siltoso (TDR 5): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO). ....	131
<b>Figura 4.32</b> – Barreira capilar (TDR 6): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO). ....	132

<b>Figura 4.33</b> – Trafegabilidade (TDR 1): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO). .....	133
<b>Figura 4.34</b> - escoamento superficial (Run Off) (CAMPO X MODELO).....	134

## RESUMO

AMORIM, Ney Rosário, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2008. **Avaliação de Desempenho de Sistemas de Cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM)**. Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Orientadores: Eduardo Marques e Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

Foram projetados e construídos dois sistemas de coberturas experimentais do tipo evapotranspirativos, um com e, o outro, sem, uma camada de barreira capilar, ambos com sistema de monitoramento composto por medidores de escoamento superficial, lisímetros para medir a infiltração e instrumentação geotécnica para monitorar a umidade e a sucção nas diferentes camadas de solo. Estes experimentos foram implantados na RPM numa região chamada de “barraginha” cujo reservatório serviu para receber os rejeitos provenientes da operação da planta piloto da mina. Os experimentos foram acompanhados por um período de aproximadamente um ano. Paralelamente a essa atividade de campo, realizou-se no laboratório um extenso programa de ensaios que compreendeu ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade saturada e determinação da curva de retenção de água dos solos que compuseram as camadas de cobertura. A partir dos resultados obtidos no campo, estudou-se o balanço hídrico dos sistemas de cobertura (precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração) e se avaliou os perfis de umidade ao longo do tempo nos mesmos. Os resultados indicaram que sistemas de cobertura como estes podem ser utilizados na região de Paracatu para o descomissionamento das estruturas geotécnicas.

## ABSTRACT

AMORIM, Ney Rosário, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August 2008.  
**Evaluation of Field Performance of Cover Systems at Rio Paracatu Mine (RPM).** Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Advisers: Eduardo Marques and Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

In view of the RPM need to study soil covering systems and the scientific interest in those studies, two experimental evapotranspirative cover systems were projected and built, one with and the other, without, a layer of capillary barrier, both with a monitoring system composed by superficial drainage meter, lisimeters to measure infiltration and geotechnical instrumentation to monitor water content and suction in the different soil layers. These experiments were implanted in the RPM site in an area called "barraginha" that received the tailings of the mine pilot plant operation. The experiments were accompanied by a period of approximately one year. Parallel to that field activity, an extensive laboratory testing program was undertaken comprising characterization, compaction and saturated permeability tests and tests to determine the water retention curves of soils that composed the layers of the covering systems. Using the field results, the variation with time of the water balance (precipitation, superficial drainage, evapotranspiration and infiltration) and the water content and suction profiles of the covering systems were evaluated.

# 1- INTRODUÇÃO

## 1.1 – Considerações Gerais

Anualmente, a indústria de mineração explora centenas de milhões de toneladas de solo e rocha para extrair bens minerais que, após beneficiamento, servem para a produção de uma enorme quantidade de produtos fundamentais para a civilização moderna (Carrier et alli, 1983).

Freqüentemente, a maior parte do material explorado é resíduo, estéril e/ou rejeito. Estéril é a designação usada para o material escavado que, ou não contém o mineral desejado, ou o contém, porém em quantidade insuficiente para viabilizar a sua exploração econômica. Rejeito é o nome atribuído ao que se descarta após o beneficiamento do minério (material escavado menos estéril). Em alguns casos, como na mineração de cobre ou ouro, os rejeitos podem representar mais de 99% do minério.

Quando nos resíduos de mineração existem determinados minerais sulfetados, em presença de água e oxigênio esses minerais são oxidados, gerando uma solução aquosa ácida denominada drenagem ácida de minas (DAM), o que lixivia os minerais sulfetados presentes no resíduo produzindo um percolado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico. Caso o percolado alcance corpos hídricos próximos, pode contaminá-los, tornando-os impróprios para o uso por um longo tempo, mesmo depois de cessadas as atividades de mineração. Trata-se de um dos mais graves impactos ambientais associados à atividade de mineração.

A DAM pode ocorrer quando o mineral ou metal de interesse nas operações de lavra encontra-se associado a sulfetos. A ocorrência de DAM tem sido relatada na extração de ouro, carvão, cobre, zinco ou urânio, entre outros, bem como na disposição inadequada dos resíduos destas operações. Evitar que as superfícies de rejeitos e/ou estéreis que contém minerais sulfetados fiquem expostas às condições oxidantes em presença de água é fundamental para a prevenção e minimização da DAM.

A oxidação dos sulfetos, e conseqüente acidificação das águas que percolam áreas de disposição de resíduos é, inicialmente, uma reação de cinética lenta. Pode, porém, ser catalisada por processos microbiológicos que atuam principalmente quando o pH da água atinge valores inferiores a 3,5.

Entretanto, o ácido produzido durante a oxidação dos sulfetos pode ser consumido em reações com outros componentes naturais presentes no resíduo tais como os carbonatos e aluminossilicatos. A matéria orgânica eventualmente presente nos estéreis e rejeitos de mineração tem também potencial para retardar a DAM. Além de competir com os sulfetos pelo consumo de oxigênio, a matéria orgânica, ao se oxidar, produz gás carbônico (CO<sub>2</sub>), que expulsa o oxigênio dos poros do resíduo. A reduzida precipitação pluviométrica é também um fator inibidor da DAM.

A empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) atua há cerca de 20 anos na produção de ouro no município de Paracatu, em Minas Gerais. A produção apresenta a mais baixa relação material escavado/minério do mundo: em média 0,45g de minério para 1,0 t de material escavado (SRK, 2005). Até meados de 2007, a RPM operava em um sistema não convencional de lavra a céu aberto que permite explorar o Morro do Ouro sem que fossem produzidos estéreis. A mineração iniciou com a produção anual de 6,0 Mt. Em expansões sucessivas ocorridas em 1995, 1997 e 2001 a produção passou para 18,0 Mt/ano.

Como o minério tinha baixa dureza, a lavra no Morro do Ouro era feita com tratores e escavadeiras, sem a utilização de explosivos, a reserva inteira era considerada minério e era enviada para a planta de processo (beneficiamento).

No processo de beneficiamento do minério, o ouro e os minerais sulfetados são concentrados em três estágios. Os rejeitos desse processo (30% em peso) contêm 20% a 30% de sulfetos e são depositados de forma subaquática em pequenos reservatórios revestidos por um *liner* de argila e/ou geomembrana PEAD denominados de “tanques específicos”. Adiciona-se cal a esses rejeitos para manter o seu pH entre 6 e 7. Os rejeitos de flotação (cerca de 70% em peso) são parcialmente divididos em dois espessadores para a recuperação de água. A porção grosseira (underflow), com 30% de teor de sólidos, é enviada por gravidade para o reservatório da barragem de rejeitos com área de cerca de 800,0 ha. Calcário britado é adicionado a esses rejeitos da flotação para melhorar as suas características geoquímicas após disposição.

O ouro está presente no minério lixiviado e também está associado à arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), à pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e à calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). Existe, portanto, uma grande preocupação em relação ao fechamento das áreas lavradas para evitar a formação de drenagem ácida de mina.

O projeto de expansão que está sendo executado atualmente, passará a produção para 80,0 Mt/ano e estenderá a vida útil da mina por, aproximadamente, 20 anos. Com a expansão a cava passará a ter 350,0 m de profundidade, fato que mudará, significativamente, o plano de fechamento da mina, introduzindo também a necessidade de descomissionamento da cava e da pilha de estéril de 70 Mt que a expansão passará a gerar, além do reservatório, da barragem e dos tanques específicos.

Como o plano de expansão exigirá o decapeamento de, no mínimo, 70 m<sup>3</sup> de solo (horizonte A), sistemas de coberturas com este material poderão ser utilizados nas áreas lavradas, nos tanques específicos, reservatório da barragem de rejeitos e na pilha de estéril rochoso com potencial de geração de drenagem ácida, com o objetivo de minimizar a entrada de oxigênio e água.

O descomissionamento de minas é uma tarefa multidisciplinar podendo ser concebido para projetos, minas em operação, minas abandonadas ou em vias de exaustão. Seu objetivo é a reabilitação da área minerada de forma a garantir que o fechamento da mina não comprometa a qualidade ambiental do futuro e limite a extensão de eventuais passivos de natureza ambiental, seja para o minerador, seja para a sociedade.

No caso da mineração RPM, a solução apontada como viável para descomissionar as estruturas (áreas mineradas, reservatório da barragem e tanques específicos e, com a expansão, pilha de estéril, cava e novo reservatório de rejeitos) passa por cobri-las com sistemas de cobertura capazes de isolar os resíduos do meio ambiente, ou seja, reduzir a infiltração de água e a entrada de oxigênio nos resíduos.

## **1.2 - Objetivo**

O principal objetivo dessa tese é projetar e construir, um experimento com dois sistemas de cobertura adequadamente instrumentados e acompanhar, por meio da instrumentação, o funcionamento dos mesmos, de maneira a viabilizar o



desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de sistemas de cobertura com solo que atendam às necessidades da RPM e de outras mineradoras da região.

### **1.3 - Organização da Tese**

Além desse primeiro, esta tese foi dividida em mais cinco capítulos.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, sumariza-se o estado da arte sobre sistemas de cobertura e lisímetros para o objetivo proposto, bem como trabalhos anteriormente desenvolvidos na RPM, em Paracatu.

No Capítulo 3, Materiais e Métodos, apresentam-se em detalhes, todos os trabalhos realizados, em ordem cronológica, para a geração dos dados que serão posteriormente analisados e interpretados. Esta etapa se inicia com o levantamento dos dados e finaliza com a modelagem numérica, passando pela concepção e construção do experimento no campo e a elaboração de ensaios complementares de laboratório.

No Capítulo 4, Resultados e Discussões, apresenta-se e analisam-se os resultados obtidos em todas as fases do trabalho, compreendendo desde os resultados dos ensaios iniciais de caracterização do solo, do experimento de campo, dos ensaios complementares de laboratório até aqueles obtidos com o modelo matemático.

Por fim, no Capítulo 5, Conclusões e Sugestões, apresentam-se as conclusões obtidas no desenvolver dos trabalhos e sugestões para a continuidade do mesmo.

## **2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - Introdução**

O plano de fechamento de mina procura consolidar, ainda que parcialmente, os custos sociais gerados pela operação e não apropriados pelo mercado de forma a internalizá-los no processo decisório da empresa de mineração.

O objetivo geral de um plano típico de fechamento de mina contempla a definição de objetivos e metas que deverão ser materializadas no projeto de reabilitação. O plano se baseia em opções técnicas, econômicas e sociais, na legislação vigente (no caso brasileiro, EIA, RIMA e PRAD), nos compromissos formalizados durante o processo de licenciamento ambiental e em consultas junto à comunidade. Sob o enfoque restrito da empresa, manifesta-se a preocupação que o plano de fechamento elimine ou minimize o passivo ambiental, atual ou potencial, da empresa frente a possíveis demandas futuras.

Qualquer que seja a razão que leve ao descomissionamento de uma mina, os problemas da recuperação de áreas degradadas e reutilização do terreno devem ter posição de destaque. No âmbito da mineração, a recuperação de áreas degradadas é geralmente entendida como o conjunto de ações que visam tornar a área apta para outro uso, não necessariamente idêntico ao que antecedeu a atividade de mineração. A possibilidade de um novo uso requer que a área apresente condições de estabilidade física, química e, em alguns casos, biológica, quando, por exemplo, a utilização futura da área será para fins de conservação ambiental e de ecossistemas.

Nas últimas décadas, observou-se uma crescente conscientização quanto à gravidade, ao risco e a magnitude dos custos associados ao passivo ambiental legado por gerações passadas. Com relação à mineração, a demanda por garantias financeiras está associada à necessidade de minimizar o risco de que, ao final da vida útil da mina, a empresa não tenha interesse ou capacidade financeira para custear o plano de fechamento. O orçamento para este plano representa o referencial básico para a fixação do montante da garantia financeira. Em Minas Gerais, encontra-se em tramitação na Assembléia Legislativa o projeto que dispõe sobre a obrigatoriedade de

apresentação de garantia real por parte dos empreendimentos econômicos, nas hipóteses de risco eminente ao meio ambiente e à população.

Uma das tecnologias muito utilizadas para o descomissionamento de estruturas geotécnicas são coberturas construídas com solo e/ou geossintéticos.

Segundo Abichou et alli (2004), coberturas de aterros são utilizadas para reduzir a quantidade de água que infiltra nos resíduos, isolar os resíduos do meio ambiente e controlar a migração de gases. O órgão ambiental americano EPA (U.S. Environmental Protection Agency) em seu “Resource Conservation and Recovery Act” (RCRA) prescreve o emprego de camadas de coberturas com baixa condutividade hidráulica saturada funcionando como barreira hidráulica. Esta cobertura poderá limitar o fluxo de água para o interior dos resíduos e, conseqüentemente, reduzir a geração de percolado e o risco de contaminação do nível de água subterrâneo.

Segundo O’Kane e Barbour (2003), o principal objetivo do sistema de cobertura de rejeitos reativos é controlar ou limitar o ingresso de oxigênio e águas de chuva para o interior da massa de rejeitos. Objetivos adicionais podem incluir: inibição de reações através da inclusão de calcário na superfície da cobertura e controlar o movimento capilar ascendente dos sais do rejeito.

Os sistemas de cobertura são, normalmente, divididos em dois tipos: convencionais (ou prescritivos) e evapotranspirativos.

## **2.2 - Coberturas Convencionais**

Estas coberturas utilizam camadas com baixa condutividade hidráulica para minimizar a infiltração e maximizar o escoamento superficial e a evaporação. Os componentes básicos deste sistema de cobertura são uma camada para controle de erosão normalmente feita com solo orgânico, sobreposta a uma camada de material de baixa condutividade hidráulica (barreira hidráulica) que, se necessário, pode ser construída sobre uma camada de fundação. Eventualmente, uma camada de drenagem de líquidos pode ser inserida entre a primeira camada e a barreira hidráulica e, se os resíduos produzem gases, uma camada de drenagem de gases pode ser adicionada abaixo da barreira hidráulica. Algumas camadas podem ter mais de

uma função como, por exemplo, a camada de fundação que também pode drenar os gases.

A experiência tem mostrado que este tipo de cobertura apresenta vulnerabilidades e limitações, como: susceptibilidade de ruptura causada pela dessecação e fissuramento do elemento barreira; grandes investimentos para a sua construção e manutenção; não garanti durabilidade, uma vez que o seu desempenho pode se reduzir com o tempo devido à degradação pela erosão superficial, abertura de trincas, etc. (EPA, 1999).

A camada para o controle da erosão quando é construída de solo com teor de matéria orgânica adequado, permite o plantio e crescimento de cobertura vegetal. A cobertura vegetal fornece ao sistema uma proteção contra a erosão, na medida em que reduz os impactos da chuva e diminui a velocidade dos ventos na superfície da cobertura, além de potencializar a transpiração. No entanto, em regiões áridas, é muito difícil estabelecer e manter uma vegetação consistente na superfície da cobertura. Em tais condições tem sido utilizado cascalho para substituir a cobertura vegetal. Dependendo da granulometria, o cascalho pode ser altamente resistente à erosão provocada pelo vento e/ou pela chuva.

A camada de drenagem de líquidos tem duas funções diferentes:

- Reduzir a carga da água sobre a barreira hidráulica, minimizando assim a infiltração e incrementando a estabilidade do talude em regiões inclinadas;
- Drenar a água que infiltra na camada superficial, permitindo a esta absorver maior volume de água;

Os materiais utilizados nas camadas de drenagem são solos sem coesão (areias e cascalhos) e ou geossintéticos (Qian et alli, 2002). Se a camada de drenagem é composta por materiais granulares é recomendado uma espessura mínima de 30 cm e uma inclinação mínima de 4%. O coeficiente de permeabilidade do material drenante deve ser maior que  $1 \times 10^{-2}$  cm/s. É necessário que o material drenante se enquadre também como filtro, ou seja, não permita a migração das partículas de solos adjacentes para os seus vazios. Caso não haja disponibilidade de solos que atendam este critério, faz-se necessário a utilização de geonets, geotêxtil ou geocompostos (Qian et alli, 2002).

A camada de barreira hidráulica pode ser considerada a mais crítica no sistema de coberturas prescritivas. A função dessa camada é minimizar a percolação da água através do sistema bloqueando sua passagem e indiretamente promover a drenagem ou armazenagem da água em camadas superiores para ser, posteriormente, removida por escoamento superficial. A barreira hidráulica, se trabalhar saturada ou próxima da saturação, impede, também, a percolação de gases.

Talvez o assunto mais crítico com relação à barreira hidráulica seja a manutenção da sua integridade com o tempo. Camadas de argilas compactadas podem apresentar trincas (ou fissuras) causadas por ressecamento ou por recalques diferenciais. Naturalmente, as trincas aumentam significativamente a condutividade hidráulica da camada.

As principais funções da camada de fundação são minimizar os recalques diferenciais na cobertura final e aumentar a capacidade de suporte dos resíduos. Em alguns casos, camadas de fundação com espessura maior que 30 cm podem funcionar também como camada de drenagem de gases.

Para prevenir a formação de poças na superfície da última camada da cobertura deve-se inclinar a mesma. Alguns estados americanos exigem que a inclinação seja maior que 4% e menor que 25%. (Qian et alli, 2002).

No caso do experimento apresentado neste trabalho, a construção da camada de fundação (trafegabilidade) sobre os rejeitos existentes aumentou a capacidade de suporte dos mesmos e possibilitou a implantação controlada das demais camadas de cobertura sobre a camada de fundação.

### **2.3 - Coberturas Evapotranspirativas**

Uma alternativa às coberturas prescritivas seria o projeto de coberturas evapotranspirativas (ET). Estas coberturas possuem algumas vantagens sobre as coberturas prescritivas como: funcionam como estruturas naturais; possuem maior vida útil; têm manutenção mais fácil; e, menor custo de implantação.

Este tipo de cobertura normalmente consiste em uma camada de vegetação que garantirá a evapotranspiração, principalmente, durante a estação de crescimento das plantas; uma camada de solo pouco compactado, normalmente chamada de camada de armazenamento-e-liberação (store-and-release); se for o caso, uma camada de solo

com maior granulometria (barreira capilar) e, por fim, abaixo desta camada, se necessário, uma camada de fundação.

A camada de armazenamento-e-liberação deverá ser capaz de acumular a água de infiltração durante o período chuvoso e liberá-la de volta para a atmosfera por evapotranspiração, durante os períodos de estiagem. Ela deve ser suficientemente espessa para que o acréscimo de umidade durante o período de armazenamento não ocorra próximo à sua base, uma vez que, se isso acontecer, a água alcançará os resíduos. Esta capacidade de armazenamento é função do tipo de solo, da espessura da camada e das condições meteorológicas locais.

Sempre que uma cobertura evapotranspirativa se mostra adequada para um problema, faz-se necessário avaliar se existe equivalência hidráulica entre o desempenho dessa cobertura e o de uma cobertura prescritiva para o mesmo problema, para que haja aprovação do projeto pelas agências reguladoras (exigência internacional) (EPA, 2002).

A equivalência hidráulica requer que a percolação gerada a partir da base da cobertura seja menor ou igual àquela que seria gerada pela cobertura prescritiva.

Para a medida da percolação através das coberturas é indicado o uso de equipamentos denominados lisímetros. Entretanto, nem sempre os valores podem ser medidos, às vezes são estimados e, mesmo quando medidos, podem não ser precisos. Existem algumas preocupações a respeito deste assunto que serão abordadas posteriormente neste trabalho.

Enquanto o desempenho das coberturas prescritivas decresce com o tempo em consequência da dessecação e erosão, o desempenho das coberturas alternativas tende a melhorar com o tempo. Isto se deve ao fato de que as raízes tendem a se desenvolver horizontal e verticalmente, estabilizando a vegetação e incrementando a transpiração e proteção contra a erosão. A expectativa de vida de uma cobertura alternativa é de milhares de anos, uma vez que elas simulam a natureza. Para o caso das coberturas convencionais, a vida útil estimada é incerta (Langoni, 2002).

Segundo Abichou et alli (2004), na cobertura ET, a vegetação tem papel fundamental, uma vez que as raízes são as principais responsáveis por retirar a água armazenada nos solos da cobertura. O princípio de funcionamento de coberturas evapotranspirativas é mostrado na Figura 2.1.

O balanço hídrico da cobertura pode ser representado pela equação 2.1:

$$P_t = P - R - S - T - E - L \quad (2.1)$$

Em que:

$P_t$  = percolação;

$P$  = precipitação;

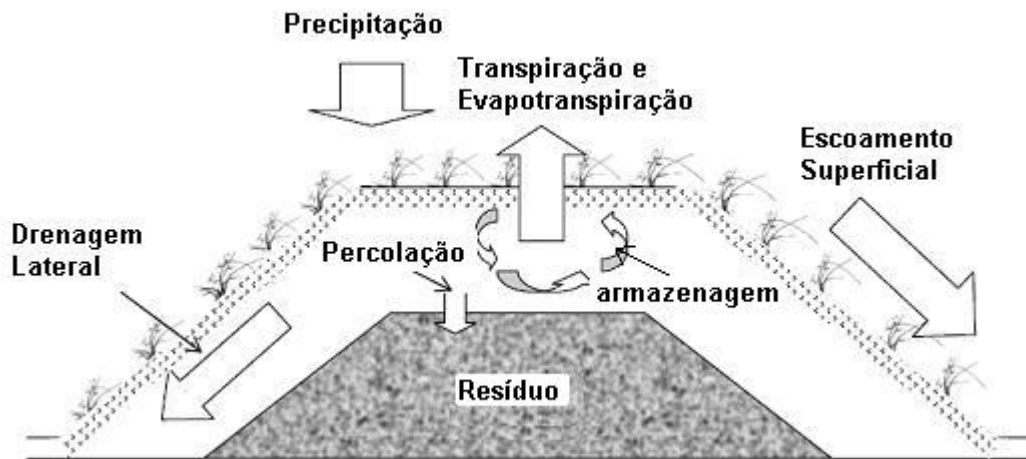
$R$  = escoamento superficial;

$S$  = armazenamento de água no perfil;

$T$  = transpiração;

$E$  = evaporação;

$L$  = drenagem lateral.



**Figura 2.1** - Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa (adaptado de Abichou, et alli, 2004).

Observando a equação 2.1, verifica-se que a percolação poderá ser minimizada aumentando o escoamento superficial, o armazenamento de água, a evapotranspiração e a drenagem lateral.

O armazenamento de água pode ser incrementado com a seleção de solos que possuam maior quantidade de finos ou o aumento da espessura da camada. A drenagem lateral poderá ser incrementada adicionando uma camada que também funcione como barreira capilar. A evaporação poderá ser incrementada com a escolha de solos que mudem gradualmente a condutividade hidráulica não saturada com a sucção. Solos finos geralmente têm este comportamento. A maximização da

transpiração pode ser alcançada selecionando a vegetação adequada e manipulando a sua extensão e densidade.

Projetos de coberturas evapotranspirativas têm se mostrado mais viáveis em regiões de climas áridos e semi-áridos (Vieira, 2005). Qian et alli (2002) comentam que os termos áridos e semi-áridos não são rígidos e devem ser verificados para cada localidade. Mencionam, ainda, que Thornthwaite (1948) utiliza como índice de umidade a precipitação anual subtraída da evapotranspiração e que, de acordo com esse índice, o clima árido estaria entre, aproximadamente, (-150) e (-100) milímetros por ano e o semi-árido entre (-100) e (-50) milímetros.

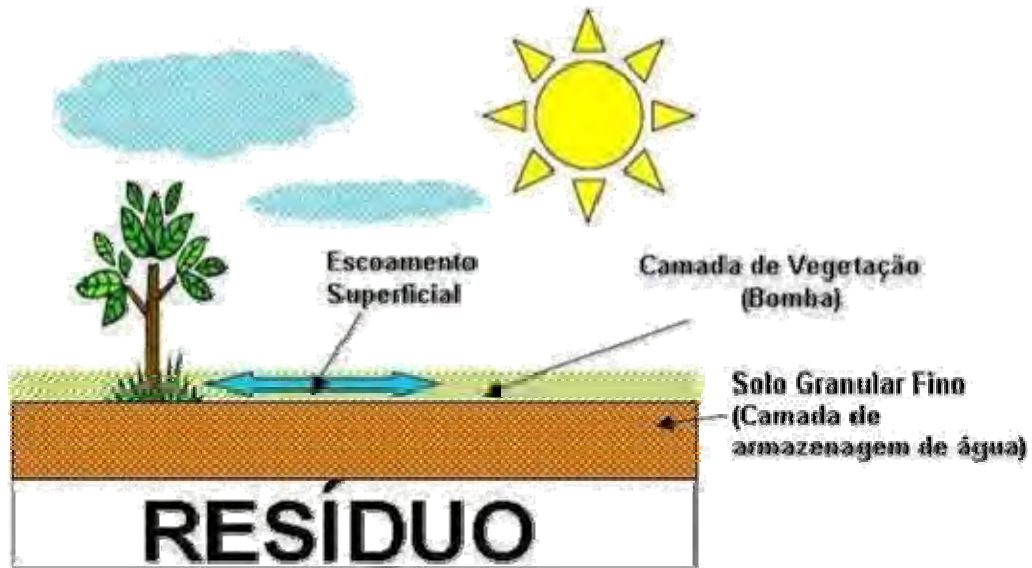
Em Paracatu, considerando o período de 1974 a 2000 e desprezando a transpiração, a média histórica de chuvas é de 1396 mm/ano e a evaporação média, no mesmo período, de 1335 mm/ano. Observa-se que se for considerada uma transpiração maior que 61 mm já haveria déficit hídrico. Para valores de transpiração entre 100 e 200 mm, considerando o critério apresentado, a cidade de Paracatu estaria em região de semi-árida a árida.

Existem dois tipos básicos de coberturas evapotranspirativas: *coberturas monolíticas e coberturas com barreiras capilares*.

### **2.3.1 – Coberturas Monolíticas**

São coberturas evapotranspirativas formadas por uma camada de solo próprio para o plantio de espécies vegetais que maximizem a transpiração, uma camada de armazenamento-e-liberação e, se necessário, uma camada de fundação (Figura 2.2)





**Figura 2.2** - Perfil cobertura monolítica (adaptado de Abichou et alli, 2003).

Segundo a SRK (2005), aumentar a espessura do solo tem o efeito benéfico de aumentar sua capacidade de armazenamento, mas deve-se tomar o cuidado de não tornar o perfil muito profundo, de forma que as raízes não consigam diminuir a umidade suficientemente.

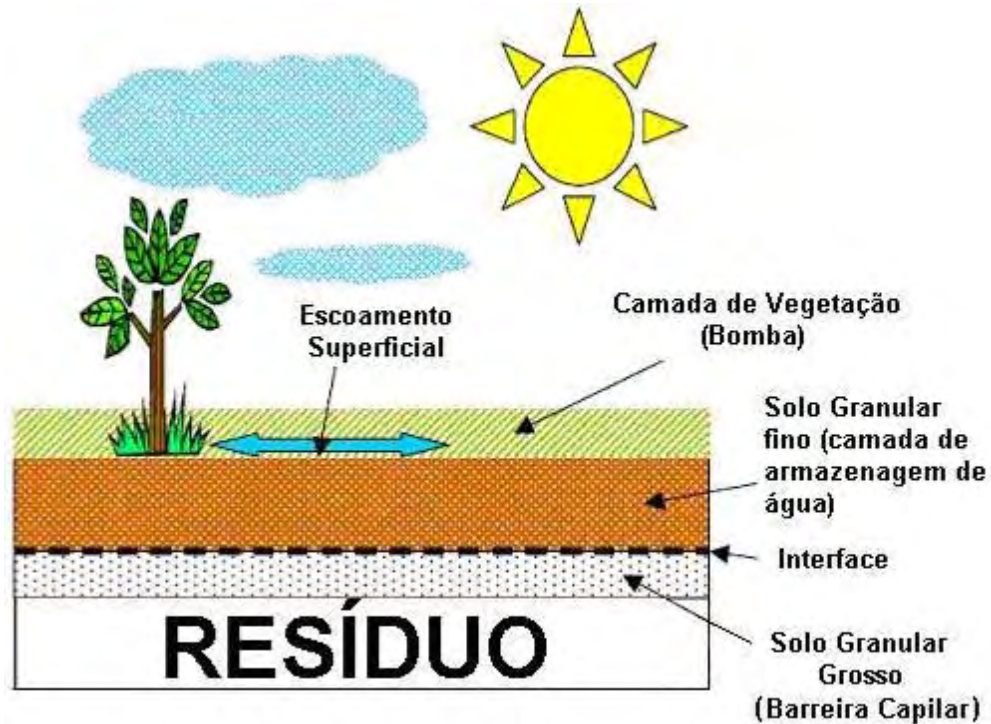
Como as camadas de armazenamento-e-liberação são normalmente construídas com areias siltosas, siltes, e siltes argilosos, as coberturas evapotranspirativas monolíticas podem ser economicamente viáveis quando uma grande quantidade destes solos está disponível no local onde se construirá o sistema de cobertura (Benson e Khire, 1995).

### **2.3.2 – Coberturas com Barreiras Capilares**

Estas coberturas evapotranspirativas são normalmente formadas por uma camada de solo próprio para vegetação, uma camada de armazenamento-e-liberação, uma camada de solo para funcionar como barreira capilar e, por fim, abaixo desta, se necessário, uma camada de fundação.

O uso do solo grosseiro abaixo do solo fino forma a barreira capilar, um procedimento bastante recente nos sistemas de cobertura. Estudos de campo têm mostrado que estas barreiras aumentam a capacidade de armazenamento da camada de armazenamento-e-liberação e, com isso, diminuem a passagem de líquidos pelo

sistema de cobertura, sobretudo em regiões áridas e semi-áridas (Benson e Khire, 1995; Morris e Stormont, 1997). Na Figura 2.3 ilustra-se uma cobertura com barreira capilar.



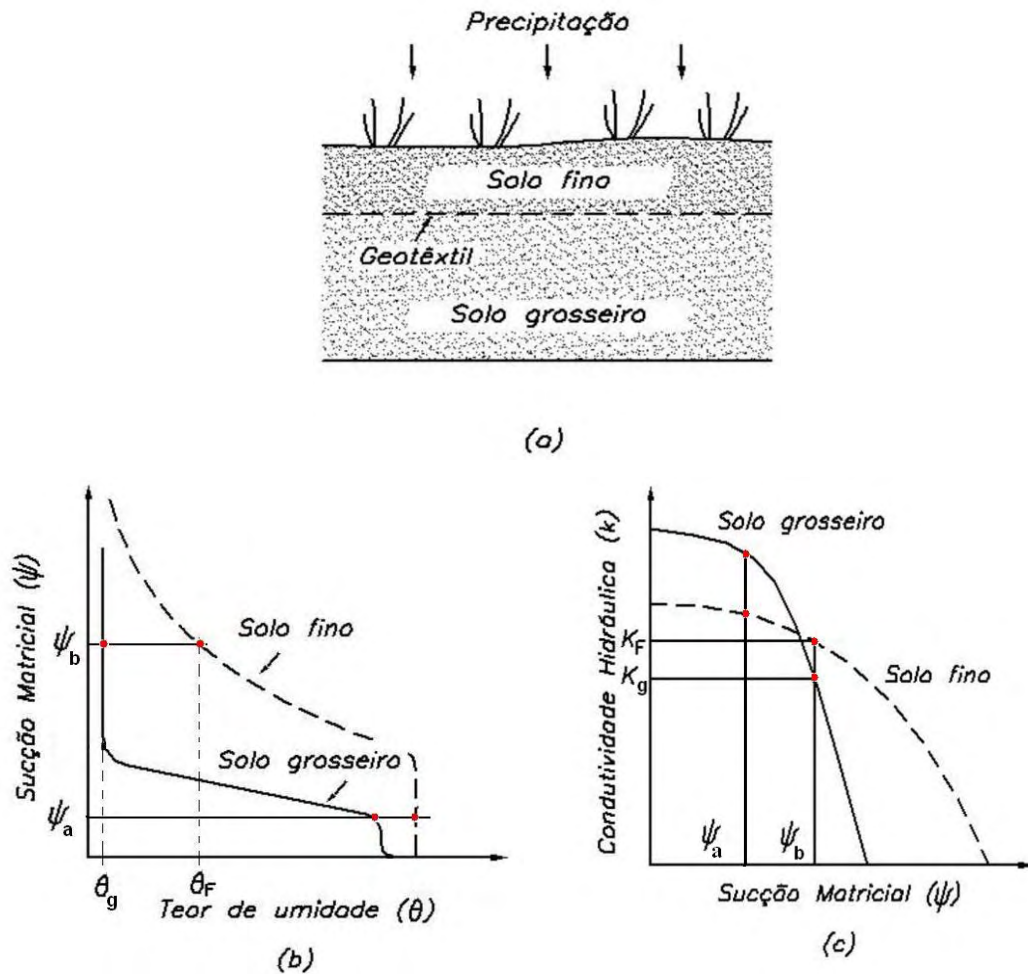
**Figura 2.3** - Perfil cobertura monolítica com barreira capilar (adaptado de Abichou et alli, 2003).

Nas Figuras 2.4a, b e c, apresentam-se, respectivamente, o perfil esquemático de uma barreira capilar, as curvas de retenção de água dos solos finos e grosseiros, e as curvas de variação da condutividade hidráulica em função da sucção para ambos os solos. O contraste de permeabilidade entre solo “fino” e “grosso” forma uma impedância hidráulica que limita o movimento de água para baixo.

Através da precipitação a umidade do solo fino (superficial) é incrementada até atingir ( $\theta_f$ ), o que corresponde na Figura 2.4b, a sucção ( $\psi_b$ ).

A umidade do solo superior começa a umedecer o solo inferior (solo grosseiro) até que o teor de umidade volumétrico ( $\theta_g$ ) seja atingido.

Neste momento, haverá continuidade hidráulica uma vez que a sucção na interface entre as duas camadas é igual ( $\psi_b$ ) e a água começa a infiltrar lentamente no solo grosseiro.



**Figura 2.4** - (a) Perfil esquemático de uma barreira capilar; (b) Curvas de retenção de água do solo fino e grosso; (c) Curvas de condutividade hidráulica. (adaptado de Abichou et alli, 2003).

Observando a Figura 2.4c, nota-se que para a condição de sucção  $\psi_b$  tem-se que o coeficiente de permeabilidade do solo grosso ( $k_g$ ) é menor que a do solo fino ( $K_f$ ) e por esta razão o fluxo de água para o interior do solo grosso é lento.

Nesta condição, o solo fino atua como um reservatório que armazena a água infiltrada que será retirada posteriormente pela evapotranspiração e/ou drenagem lateral.

Em caso de chuvas intensas e prolongadas e/ou quando o sistema de barreira não estiver apropriadamente dimensionado, a umidade dos solos poderá aumentar demais, reduzindo a sucção na interface das camadas para sucções inferiores a  $\psi_b$ , por exemplo, ( $\psi_a$ ).

Nesta outra condição, a condutividade hidráulica do solo grosseiro será maior que a do solo fino (Figura 2.4c) e a barreira capilar não mais restringirá a passagem de água, situação habitualmente chamada de “quebra da barreira capilar”.

Segundo Dwyer (2003) e Carlsson (2002), existem dois problemas importantes com relação à barreira capilar. Primeiro, o solo fino não deve migrar para dentro dos vazios do solo grosseiro. Para mitigar esse problema uma manta de geotêxtil pode ser utilizada na interface entre esses dois solos, funcionando como uma camada de transição. A segunda preocupação está relacionada com períodos de precipitações muito elevadas quando a barreira capilar pode “quebrar”. Nesse caso, ao invés de dificultar, a barreira capilar passa a facilitar a percolação de água e, portanto, diminui a capacidade de armazenamento da camada de armazenamento-e-liberação. 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.

Barreiras capilares têm melhor desempenho se a condutividade hidráulica da camada de armazenamento-e-liberação for baixa. Nyhan et al. (1993) 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.

Barreiras capilares são mais eficientes se o material grosseiro for uniforme. Stormont et al (1999) conduziram uma série de ensaios de infiltração em laboratório em barreiras capilares feitas com cascalho com finos e com areia grossa. O autor concluiu que a barreira formada pela areia grossa foi mais eficiente que a com cascalho com finos.

Se a camada armazenamento-e-liberação trincar, a eficiência da cobertura poderá ser comprometida. Assim, devem ser tomadas precauções na seleção do solo para esta camada. Siltes argilosos, siltes arenosos e algumas argilas siltosas podem ser mais adequadas para este fim. Recomenda-se que solos ricos em argilas ativas sejam evitados uma vez que podem ressecar e trincar. Se forem utilizadas argilas, elas devem ser lançadas em um teor de umidade baixo para minimizar este fenômeno. Mesmo assim, se ainda existir a possibilidade de fissuramento da camada de armazenamento-e-liberação, deve-se usar uma camada acima da camada de armazenamento, portanto, um sistema com 3 camadas para aumentar a eficiência da cobertura.

As espécies selecionadas para a vegetação no topo das coberturas evapotranspirativas devem ter certas restrições, uma vez que suas raízes e a ação de animais e micro organismos podem criar caminhos preferenciais de percolação e comprometer o desempenho da cobertura.

Segundo Parent & Cabral (2006), projetar a cobertura com barreira capilar inclinada é interessante no sentido de se criar uma drenagem lateral na camada de armazenamento-e-liberação (“moisture retention layer” - MRL) o que retarda a infiltração de água na barreira capilar (Figura 2.5).

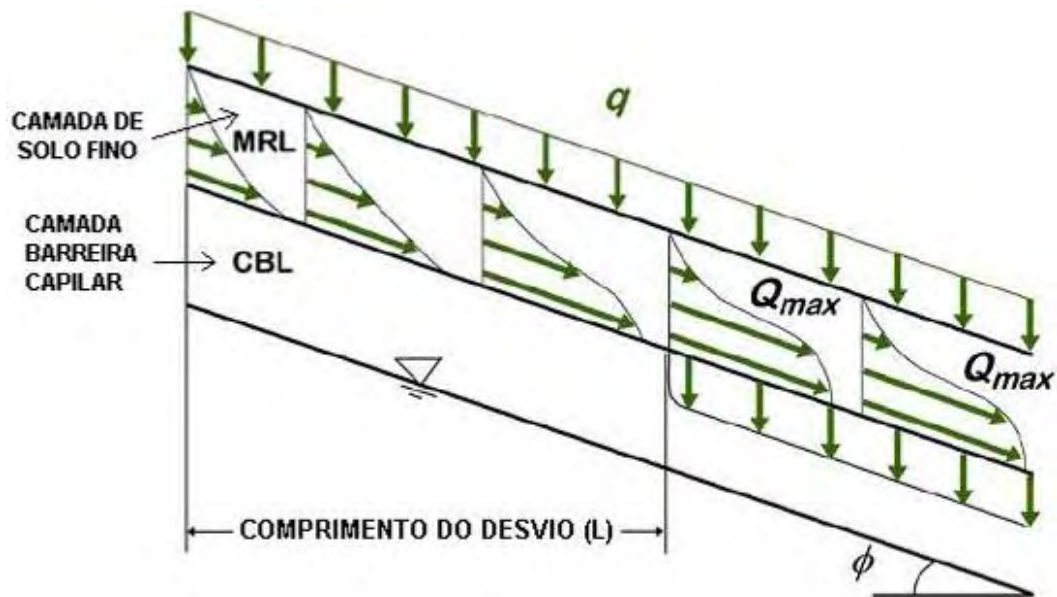
Se for aplicada uma infiltração vertical uniformemente distribuída na superfície da camada, com valor mais baixo que a condutividade hidráulica saturada do material fino, parte da água será retida em função das forças capilares enquanto outra parte irá drenar lateralmente. Quanto maior a condutividade hidráulica do material fino, mais facilmente a água irá drenar. A capacidade de desvio é definida como o fluxo máximo que a barreira capilar pode desviar e o comprimento do desvio é uma medida horizontal, a partir do topo do talude até onde a água começa a infiltrar verticalmente no perfil (Figura 2.5).

A capacidade de desvio e o comprimento de desvio dependem da função condutividade hidráulica dos materiais que compõem a cobertura (solo fino e barreira capilar), da espessura da camada, da infiltração e da inclinação da interface solo fino/barreira capilar. Ross (1990) apud Parent & Cabral (2006) comenta que na zona do perfil, além do comprimento de desvio, o sistema da barreira capilar está em equilíbrio, isto é, em regime permanente, portanto o gradiente hidráulico, os perfis de sucção e a infiltração, que cruzam a interface, permanecem constantes.

## **2.4 – Equivalência Hidráulica**

Uma vez verificada que existe a viabilidade técnica e econômica de se construir uma cobertura alternativa em uma determinada região, é necessário fazer uma avaliação da equivalência hidráulica para que esta alternativa seja aprovada pelas autoridades regulamentadoras. A equivalência hidráulica é geralmente definida quando se compara a percolação pela base da cobertura alternativa com aquela que sairia da cobertura prescritiva. Quando o valor da primeira é menor ou igual ao da

segunda, pode-se dizer que existe a equivalência (Benson et. al., 2001 e Abichou e Tawfiq 2001).



**Figura 2.5** - Perfil de uma barreira capilar inclinada (adaptado de Parent & Cabral 2006).

Outra forma de avaliar a equivalência hidráulica seria comparar a percolação pela base da cobertura alternativa com um valor pré-determinado pelo órgão ambiental (SAIC, 2000; Benson, 2000; Benson et. al., 2001).

Embora este valor de percolação que atravessa a cobertura prescritiva dependa das características locais, um valor típico é fornecido pela agência reguladora no programa da *Alternative Cover Assessment Project* (ACAP). Este órgão sugere que uma cobertura alternativa será equivalente a outra se a percolação for menor que 10 mm/ano em regiões semi-áridas ou menor que 30 mm/ano em climas úmidos.

## 2.5 – Métodos para a Avaliação da Percolação no Campo

Para se demonstrar a equivalência hidráulica de uma cobertura alternativa no campo, vários métodos têm sido usados para estimar a percolação através do perfil de solos. Os métodos de avaliação podem ser indiretos ou diretos.

Como métodos indiretos podem ser citados, a Análise de Tendência, o Método do Balanço Hídrico e a Lei de Darcy.

Como método direto, tem-se a utilização dos lisímetros. Apresenta-se a seguir um breve relato sobre estes métodos.

### 2.5.1 – Métodos Indiretos

Esses métodos baseiam-se nos resultados do monitoramento do teor de umidade no perfil da cobertura.

No método de análise de tendência assume-se que se não existe variação de umidade no perfil da cobertura significa que não existe fluxo. Entretanto, como se sabe, o fluxo de água nos solos é causado por gradientes de carga total ao invés de gradientes de teor de umidade. Além disto, a água também poderá fluir em forma de vapor em consequência de um gradiente de pressão de vapor e temperatura (Scanlon and Milly, 1994). Logo, a análise de tendência não se baseia numa hipótese realista.

Outra falha óbvia dessa análise é que a percolação é calculada a partir da umidade e da poro pressão as quais são obtidas usando instrumentos instalados em nichos dentro do solo. Ao se fazer isto, assume-se que os solos são homogêneos e que não existam fissuras ou perfurações feitas pelo homem, animais ou raízes das plantas todas bastante comuns em coberturas de aterros.

O grupo de pesquisadores da ACAP apresentou alguns dados comparando o teor de umidade com a quantidade de água que realmente era adicionada a um perfil de solo, no período de Abril de 2000 até outubro de 2002. Observou-se que, durante os oito primeiros meses, a quantidade de água aplicada era similar à umidade medida em todo o perfil. Após este período, o teor de umidade em profundidades maiores foi mais sensível à água aplicada que em profundidades menores, sugerindo que a água migrou através de trincas e perfurações alcançando o solo mais profundo. Além disto, a medida do teor de umidade também é afetada pela posição dos sensores em relação às raízes das plantas (quanto mais próximos delas, maiores serão os valores de umidade neles indicados).

O método do balanço hídrico faz uso da equação 2.1, apresentada anteriormente. Portanto, a precisão na determinação da percolação depende da precisão com a qual os parâmetros da direita da equação são medidos.

Radiação e alta velocidade dos ventos são duas principais fontes de erro que poderão levar aos valores da precipitação a um erro igual ou superior a 50%. Com equipamentos apropriados e para ventos fortes ( $v > 8\text{m/s}$ ), este número não deve passar de 30%. Para condições ideais, o erro na medida da precipitação é menor que 10%.

As medidas de evapotranspiração consistem em medir a evapotranspiração potencial (PET) e a evapotranspiração real (AET). A PET é a quantidade de água máxima que pode ser removida em condições ideais de umidade do solo e do ar. A evapotranspiração real é a quantidade de água que realmente é removida da superfície em consequência do processo de evaporação e transpiração. Este parâmetro é influenciado pelo clima, disponibilidade de água, características do solo e condições da vegetação. Em alguns meses do ano, a AET é menor que a PET nos locais onde não existe água suficiente para abastecer as raízes das plantas (Abichou, 2003 apud Abichou et alli, 2004).

O valor de PET pode ser estimado com uma razoável precisão e o valor de AET pode ser calculado a partir do valor de PET e da razão entre a disponibilidade de umidade do solo e capacidade de retirar a água disponível. São esperados erros maiores que 20% na estimativa de AET (Abichou, 2003 apud Abichou et alli, 2004).

O escoamento superficial pode ser medido com a precisão de 2 a 3% da precipitação se a área de contribuição for bem definida e os pontos de monitoramento forem adequados. É importante que não haja impedimentos para que a água possa drenar livremente pela área de contribuição. Caso isto não ocorra o valor do escoamento superficial será subestimado enquanto que a infiltração será exageradamente incrementada (Abichou, 2003 apud Abichou et alli, 2004).

Com relação à variação de umidade no perfil de solo, sabe-se que os melhores equipamentos de medida do teor de umidade (aqueles que empregam técnicas nucleares ou dielétricas) podem fornecer o teor de umidade com uma variação de  $\pm 2\%$ . Da mesma forma, trincas no solo podem se constituir em fontes de erros para esta medida (Abichou, 2003 apud Abichou et alli, 2004).

A calibração também poderá influenciar nos resultados da umidade na ordem de 5%, especialmente para solos finos. Assim, para 1 m de espessura da cobertura, a capacidade de armazenagem do solo poderá ser determinada com uma precisão de, no máximo, 20 mm.



A precisão com a qual a percolação é medida é determinada pela precisão das variáveis descritas anteriormente. A precisão na medida da percolação foi estimada em 100 mm/ano em uma região úmida (Abichou, 2003 apud Abichou et alli, 2004).

Usando a Lei de Darcy, se as propriedades hidráulicas (curva de retenção e condutividade hidráulica) dos solos das coberturas são conhecidas, a percolação  $P_t$  pode ser calculada pela equação 2.2.

$$P_t = K_{\psi} \cdot i \quad (2.2)$$

Em que  $K_{\psi}$  é a condutividade hidráulica não-saturada quando o solo tem uma sucção igual a  $\psi$ , e  $i$  é o gradiente hidráulico. Para um dado valor de umidade volumétrica medido no solo de cobertura na profundidade onde o gradiente é calculado, com a curva de retenção é possível obter o valor da sucção  $\psi$  e com a curva de condutividade hidráulica obter  $K_{\psi}$ . O gradiente hidráulico pode ser calculado a partir da sucção  $\psi$  e a elevação na qual o teor de umidade foi medido. A umidade medida, como na análise de tendência e no método do balanço hídrico é a maior fonte de erro por diversos motivos como, imprecisão do equipamento, fluxo preferencial pelas fissuras macroscópicas, escavações feitas pelos animais e/ou raízes de plantas, anisotropia das propriedades hidráulicas do solo, etc. (McCord e Stephens, 1987; Benson et. al., 2001).

A histerese na curva de retenção é outra fonte de erro, ou seja, a sucção correspondente a uma dada umidade depende se o solo está umedecendo, secando ou na transição entre secagem e umedecimento. A maioria dos cálculos utilizando a Lei de Darcy emprega a curva de secagem e ignora a histerese. Este erro pode ser evitado usando equipamentos para a medida da sucção, tais como tensiômetros ou unidades de dissipação de calor (HDU) nas mesmas profundidades nas quais os equipamentos para medida de umidade foram instalados. Entretanto, as sucções medidas com estes aparelhos também estão sujeitas a erros.

Erros na estimativa do  $K_{\psi}$  têm também um significativo efeito na precisão do cálculo da percolação. A condutividade hidráulica não-saturada pode ser obtida no laboratório com permeâmetros que ensaiam o solo com sucção constante (Lu and Likos, 2004, Guimarães, 2008), ou a partir de modelos que usam a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) e a curva de retenção do solo (Lu and Likos, 2004). Esse

último procedimento fornece razoável estimativa da condutividade hidráulica não saturada para solos grosseiros, mas o mesmo não acontece com os solos finos, onde os valores são subestimados (Fredlund et al., 1994; Meerdink et al., 1995; Chiu and Shackelford, 1994; Benson et al., 2001).

É, também, possível medir no campo a condutividade hidráulica não saturada. No entanto, estas medidas também estão sujeitas a erros tão grandes quanto aqueles presentes nos modelos (Stephens, 1996; Benson and Gribb, 1997; Benson et al., 2001).

Se o erro provocado pelo fluxo preferencial for ignorado, a precisão na qual a percolação pode ser medida utilizando a lei de Darcy não pode ser estimada. Erros no valor de  $\psi$  (sucção) em função da histerese podem ser tão grandes como são os erros na medida do  $K_{\psi}$ , de uma ordem de grandeza. Assim, a estimativa da percolação usando a lei de Darcy tem a precisão de uma ou duas ordens de grandeza. Além disto, a variabilidade espacial na curva de retenção e no valor do  $K_{\psi}$  pode aumentar a precisão em uma ordem de grandeza. Esta precisão relativamente baixa pode ser aceitável se o valor da percolação for muito baixo, por exemplo, 0,0001 mm/ano, mas será inaceitável se a percolação calculada estiver próximo do valor da equivalência hidráulica (Benson et al., 2001).

### **2.5.2 – Métodos Diretos - Lisímetros**

Segundo Abichou e Tawquif (2001), lisímetros são caixas enterradas com o topo aberto colocadas logo abaixo do sistema de cobertura para coletar e medir a quantidade de água que passa pela cobertura. Ao contrário dos métodos indiretos, o lisímetro fornece uma medida direta da percolação pela cobertura e representa a estimativa mais precisa desta medida, quando comparada aos demais métodos apresentados anteriormente. A precisão desta técnica está relacionada ao método usado para medir a percolação.

Segundo Hansen et alli (2000), lisímetros são experimentos de lixiviação ou percolação construídos ao ar livre, freqüentemente com grandes dimensões, que medem a infiltração, por um grande período de tempo e nas condições naturais do local que o efluente é originado. Assim, os lisímetros são experimentos que tentam simular as reais condições de campo no que diz respeito à lixiviação e podem gerar

dados para serem comparados com aqueles obtidos em ensaios de laboratório. Os lisímetros constituem uma importante ligação entre ensaios de lixiviação em laboratório e o comportamento da lixiviação em campo.

Lisímetros têm sido usados como equipamentos de medidas dos parâmetros hidráulicos do solo por quase 100 anos. Quando projetados, construídos, instrumentados, gerenciados, operados e interpretados de forma satisfatória, os lisímetros podem fornecer dados precisos, extremamente importantes em projetos de coberturas (Xingfa et alli, 1999; Hansen et alli, 2000).

Normalmente são colunas de grandes dimensões onde o material a ser lixiviado é introduzido no equipamento cuja superfície é mantida aberta. Na base do equipamento adapta-se um sistema de descarga de base por onde o efluente é conduzido a um recipiente de coleta. Equipamentos de monitoramento podem ser instalados em diferentes profundidades. Com exceção destas generalidades, o projeto dos lisímetros pode variar largamente para se adequar ao tipo de pesquisa que se pretende desenvolver. Assim, são normalmente projetados e ajustados para se acomodarem às necessidades da pesquisa e, portanto, eles não são padronizados.

Segundo Hansen et alli (2000), os lisímetros podem ser classificados por diferentes critérios tais como: tipo de amostragem do material a ser ensaiado (amostra deformada, indeformada, executado *in situ*), tipo do sistema de drenagem (drenagem por gravidade, a vácuo ou mantendo o nível de água constante). Por outro lado, Abichou et alli (2004) diferenciam dois tipos de lisímetros: o de peso e o de volume. Os lisímetros volumétricos são geralmente empregados para monitorar a percolação nas coberturas evapotranspirativas e apresentam, na maioria dos casos, além do reservatório enterrado, paredes laterais que previnem a perda da água por elas.

Parent et alli (2005) definem lisímetro de tensão zero como sendo constituído por um container instalado a uma profundidade desejada dentro de um sistema de cobertura que coleta o percolado infiltrado. A base do lisímetro é conectada a um tubo que envia a água para um reservatório submetido à pressão atmosférica.

A Tabela 2.1 apresenta uma visão geral das diferentes maneiras de se classificar os lisímetros. Ressalta-se que os lisímetros listados podem ser classificados de forma diferente daquela apresentada na referida tabela, por exemplo, um lisímetro tensão-zero pode ser construído com um solo preparado ou com uma

amostra indeformada. Ele também pode ser equipado com sistemas de drenagens diferentes e por estas razões ser classificado de diversas formas.

**Tabela 2.1** - Classificação dos lisímetros segundo Hansen et alli (2000).

CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
<b>De acordo com a Drenagem</b>		
Lisímetro Tensão-Zero	Lisímetro em que o percolado sai livremente do sistema de drenagem	Berggren (1999) Gallet & Keller (1999) Jemison & Fox (1994) Jemison & Fox (1992) Tompson & Scharf (1994)
Lisímetro Baixa-Tensão	Para a coleta do percolado, aplica-se baixas tensões	Corwin & LeMert (1994) Simmonds & Nortcliff (1998)
Lisímetro Tensão em Equilíbrio	Projetado para manter o equilíbrio entre a sucção aplicada para a coleta do percolado e o potencial matrício do solo. A sucção aplicada varia para obter o equilíbrio.	Brye et al (1999)
<b>De acordo com a forma de amostragem</b>		
Lisímetro de Bloco	Uma amostra de solo indeformada é escavada e uma caixa é construída em volta do bloco de solo. O percolado pode ser coletado com ou sem aplicação de sucção.	Corwin & LeMert (1994) Cameron et al (1992) Meshkat et al (1999) Mclay et al (1992) Schoen et al (1999 <sup>a</sup> )
Lisímetro Ebermayer	Lisímetro in situ sem paredes laterais separando o bloco de solo a ser ensaiado do solo adjacente. O percolado pode ser coletado com ou sem aplicação de sucção.	Jemison & Fox (1992)
Lisímetros Preenchidos	O material a ser ensaiado é coletado e pré-tratado (homogeneizado) antes de ser colocado dentro do lisímetro. O percolado pode ser coletado com ou sem aplicação de sucção.	Fallman & Hartlén (1994) Hjelmar (1990) Ludwig et al (2000) Stegemann et al (1995)
<b>De acordo com a medida da umidade</b>		
Lisímetro de peso	O lisímetro é instalado ou posto sobre uma balança em que possa ser pesado periodicamente.	Corwin & Lemert (1994) Allen et al (1991)
Lisímetro que não é pesado	Lisímetros sem equipamento para medir o peso. Todos os demais lisímetros apresentados acima poderão estar descritos nesta categoria.	Fallman & Hartlén (1994) Hjelmar (1990) Ludwig et al (2000) Stegemann et al (1995)

Segundo Parent et alli (2005), lisímetros podem estar sujeitos a problemas de precisão na coleta do percolado em consequência do desvio de parte deste antes de atingir o lisímetro. Para minimizar este problema, os autores sugerem duas alternativas. Primeiro, a poro pressão na base do lisímetro deve ser menor ou igual à pressão atmosférica. Se isto não acontecer, a água poderá ficar retida no solo acima do lisímetro fazendo com que o fluxo não chegue ao mesmo. Segundo, a poro pressão no topo do lisímetro deverá ser igual a poro pressão do lado de fora dele,

naturalmente na mesma profundidade. Para se chegar a esta condição é necessário que o material que preenche o lisímetro seja o mesmo que está em sua volta. O uso de material mais grosseiro no interior do lisímetro criaria uma barreira capilar e a água de infiltração poderia se desviar do lisímetro.

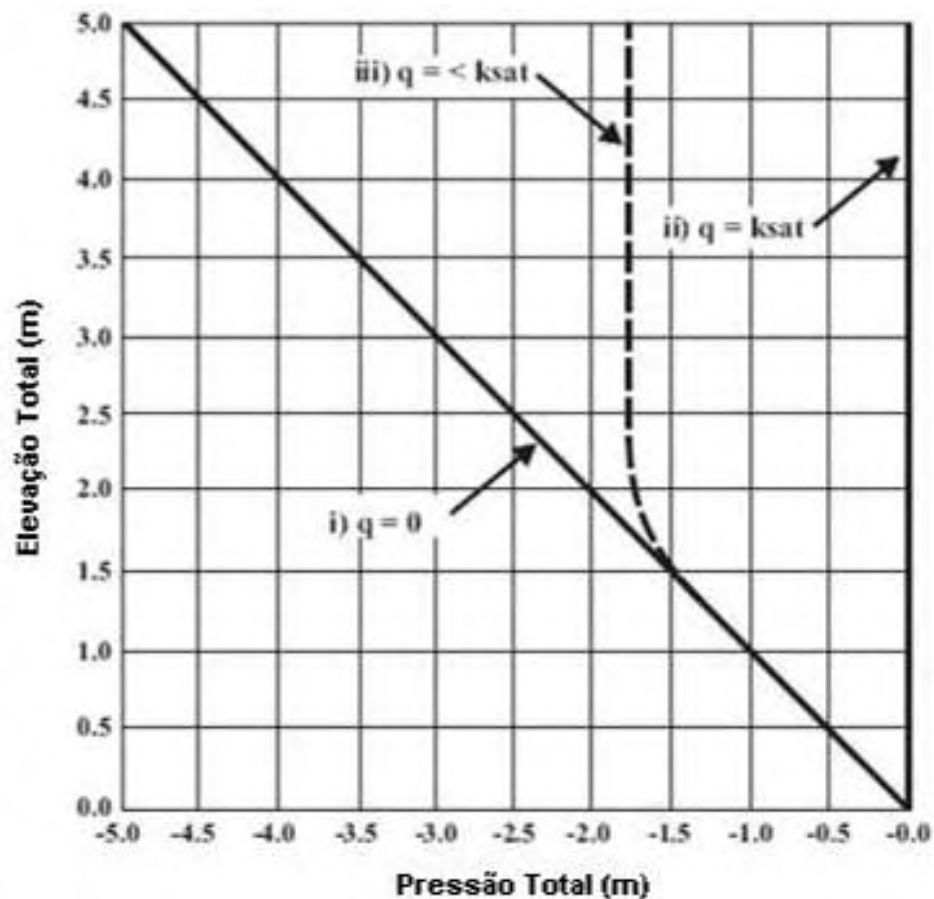
Estas preocupações não estão presentes nos artigos que tratam dos lisímetros de grandes dimensões da ACAP e, portanto, entende-se que as mesmas diminuem com o aumento das dimensões do lisímetro.

O’Kane e Barbour (2003) comentam sobre o fluxo em uma coluna de solo não saturado, com 5 m de altura e o nível de água na base, submetida a três diferentes vazões de entrada no seu topo (Figura 2.6). No caso (i), como a vazão de entrada é nula, a carga de pressão é negativa e diminui linearmente com a elevação a partir da base da coluna. Como a carga de elevação aumenta linearmente e na mesma proporção que a elevação, a carga total é nula em todos os pontos da coluna. No caso (ii) aplica-se uma infiltração “q” igual à condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_{sat}$ ) multiplicada pela área da seção transversal da coluna (A). Nesse caso, de acordo com a Lei de Darcy, o gradiente hidráulico é unitário, conseqüentemente, a carga total é igual à carga de elevação e a carga de pressão é nula. No caso (iii) aplica-se uma infiltração no topo da coluna de solo com um valor menor que  $K_{sat} \cdot A$ . Nesse caso, haverá um fluxo com gradiente unitário até uma determinada profundidade e, a partir daí, a curva da carga de pressão sofre uma mudança gradativa, até se sobrepor à curva hidrostática, quando, então, o fluxo cessa.

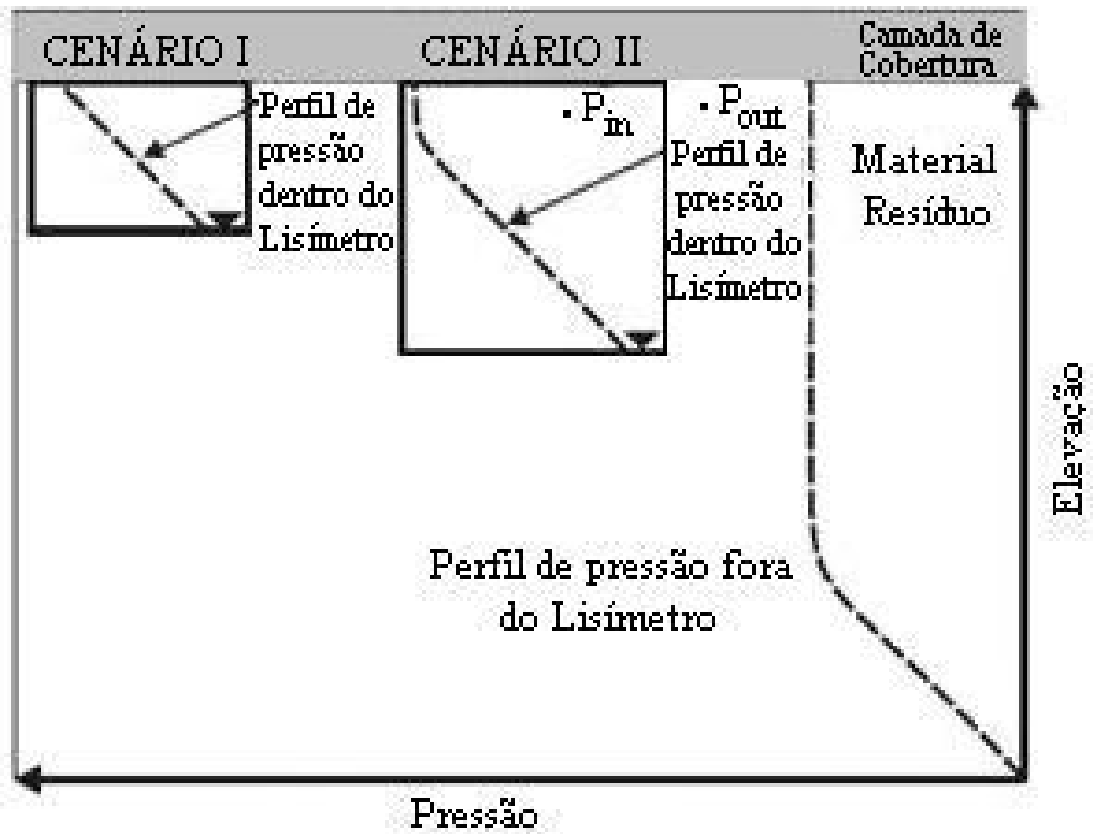
Conhecido o valor da infiltração “q” <  $K_{sat} \cdot A$ , para se saber em que ponto o fluxo cessará, chamado de “ponto de quebra”, é necessário se conhecer a curva de variação da condutividade hidráulica com a sucção do solo, a posição inicial do nível d’água e a altura da coluna. O ponto de quebra ocorre quando a condutividade hidráulica do solo não-saturado for igual ao valor da infiltração. Naturalmente, se existirem vários solos dentro da coluna, a localização do ponto de quebra vai ser função das curvas de condutividade hidráulica dos diferentes solos.

Em função da discussão acima, O’Kane e Barbour (2003) apresentam uma comparação entre as pressões internas e externas em dois lisímetros instalados na mesma profundidade, mas com profundidades distintas (Figura 2.7). Sabe-se que a presença do lisímetro cria uma condição artificial de pressão zero (ou nível de água) na sua base provocada pela conexão da base do lisímetro com a pressão atmosférica. A infiltração que passa pela camada de cobertura dá origem à distribuição de carga

de pressão apresentada no lado direito da figura (notar a posição do nível d'água natural). Observando o lisímetro menor, à esquerda da figura, nota-se que o ponto de quebra não ocorre dentro do lisímetro porque a pressão atmosférica está artificialmente muito elevada no seu interior. Logo, em pontos dentro do lisímetro, as cargas de pressão e, conseqüentemente a carga total, serão maiores, que em pontos fora do lisímetro que tenham mesma elevação. Os gradientes serão de dentro para fora do lisímetro, fazendo com que a infiltração não se encaminhe devidamente para o lisímetro, naturalmente comprometendo as medições de vazão. No lisímetro maior, mais profundo, apresentado no centro da figura, o ponto de quebra ocorre no seu interior. Nessa condição, a carga total no topo do lisímetro é igual à carga total fora dele. Dessa forma, a infiltração não se dirigirá preferencialmente nem para fora, nem para dentro do lisímetro, favorecendo a precisão das vazões medidas.



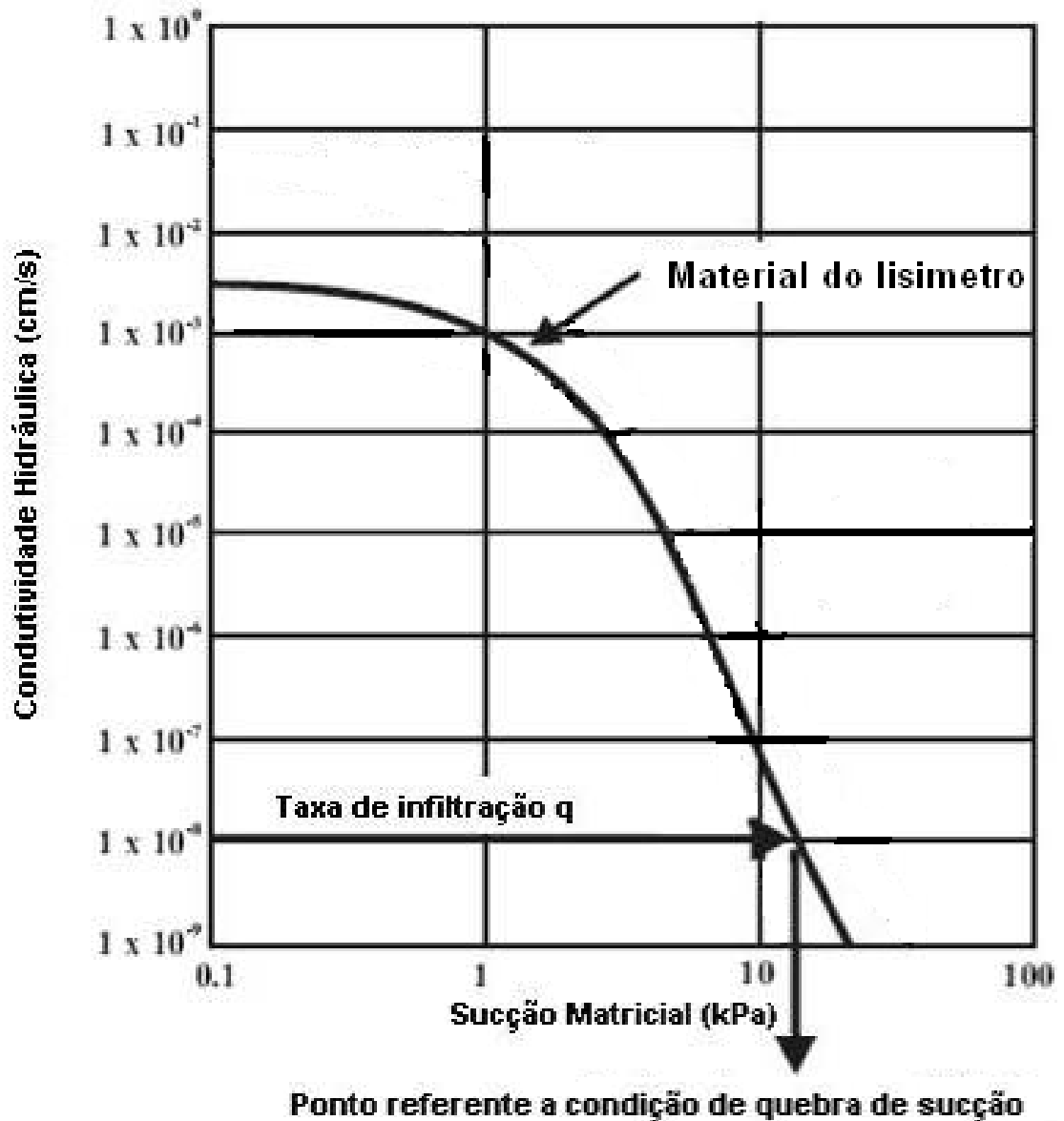
**Figura 2.6** - Perfil de sucção numa cobertura de barreira capilar (adaptado de O’Kane e Barbour, 2003).



**Figura 2.7** - Perfis de cargas de pressão para dois lisímetros com profundidades distintas (adaptado de O’Kane e Barbour, 2003).

Portanto, para que as cargas totais no topo do lisímetro e fora dele na mesma elevação sejam iguais, o ponto de quebra deve ficar no seu interior. Sendo assim, a profundidade do lisímetro deve ser calculada em função da percolação que se espera passar pelo sistema de cobertura e da curva de condutividade hidráulica do material colocado no seu interior

Por exemplo, observando a Figura 2.8 nota-se que se passar pelo sistema de cobertura uma percolação de  $1 \times 10^{-8}$  cm/s, a sucção correspondente a esse valor de condutividade hidráulica é aproximadamente igual a 20 kPa, que corresponde a uma carga de pressão de aproximadamente 2,0 m. Portanto, para que o ponto de quebra de pressão ocorra dentro do lisímetro, a profundidade do mesmo teria que ser maior que 2,0 m.



**Figura 2.8** - Funções da condutividade hidráulica não saturada de alguns materiais (adaptado de O’Kane e Barbour, 2003).

Ressalta-se que toda a discussão apresentada assume que as propriedades dos materiais que estão no interior do lisímetro são as mesmas dos materiais externos. Isto poderia ser uma condição ideal que nem sempre acontece no campo. Entretanto, O’Kane e Barbour (2003) comentam que ainda que os materiais sejam diferentes a metodologia descrita acima fornece a base teórica necessária para a compreensão do mecanismo. Entretanto, frente à variedade de condições que são encontradas em campo é interessante que se utilize um modelo computacional para determinar este



parâmetro. A profundidade estimada empiricamente poderia ser utilizada como ponto de partida para o modelo numérico.

Ainda com relação a profundidade de instalação do lisímetro. Van Bavel et alli (1961) sugerem que o mesmo seja instalado abaixo da zona de interferência das raízes.

Segundo Hansen et alli (2000), as dimensões dos lisímetros variam muito e estão relacionadas com o tipo do projeto em que os lisímetros estão envolvidos.

Vistas em planta, as formas retangulares geralmente são mais práticas para lisímetros muito grandes e as circulares são frequentemente utilizadas para lisímetros pequenos.

O comprimento e a largura, ou o diâmetro, usualmente devem ser cerca de cinco vezes maior que a profundidade para garantir que não haverá desvio lateral do fluxo, isto é, que o fluxo preferencial em eventuais trincas, fissuras, canais provocados por raízes e escavações de minhocas, seja capturado no ensaio (Bews et. alli, 1999; Benson, 2000).

Na base e nas laterais do lisímetro geralmente se emprega geomembrana de polietileno tipo PEBD que é altamente resistente ao puncionamento e pode ser soldada com qualidade no campo.

A Tabela 2.2 apresenta alguns exemplos de projetos de lisímetros utilizados para diferentes propósitos.

Segundo Zornberg et alli (2003), a percolação que atravessa a camada de cobertura varia de forma não linear com os parâmetros dos componentes do sistema, tais como: profundidade das raízes, espessura da cobertura e condutividade hidráulica saturada do solo. Para garantir o desempenho dos lisímetros, se faz necessário determinar suas dimensões por meio de simulações numéricas que consideram as situações específicas (clima, solo, etc.) antes de se construir os lisímetros no campo.

**Tabela 2.2** - Alguns exemplos de projetos de lisímetros relatados na literatura, apud Hansen et alli (2000).

<b>Material Ensaiado</b>	<b>Parâmetros Estudados</b>	<b>Forma da coluna</b>	<b>Tamanho (D: diâmetro, H: altura e A: área)</b>	<b>Material usado para a construção</b>	<b>Referência</b>
Cinza de carvão	Parâmetros inorgânicos	Retangular	A=8,9m <sup>2</sup> V=9-20m <sup>3</sup>	concreto	Hjelmar(1990)
Cinza de carvão	Parâmetros inorgânicos	Piramidal	Base= 30,5 x 30,5 m; topo = 18,3 x 8,3 m e H= 3,05m	Não descrito	Fruchter et al. (1990)
Cinza de carvão	Parâmetros inorgânicos	Retangular	A= 0,6 x 1,2m <sup>2</sup> ; H=1,8m	Não descrito	Brown et al. (1976)
Resíduos de aço, madeira, lixo incinerado e detonação.	Ph e Potencial Redox	Quadrado	Volume = 3 x 3 x 1,2 m <sup>3</sup>	Geomembrana	Fallman & Hartlén (1994)
Blocos cimentados de resíduos de poluição do ar	Parâmetros inorgânicos	Retangular	A= 16m <sup>2</sup> , H= 1,5m	Não especificado	Ludwig et al. (2000)
Poeira de aterros sanitários	Parâmetros inorgânicos	Circular	D= 63cm, H= 1m	Tubo acrílico	Stegemann et al. (1999)
Resíduos da combustão de matéria orgânica	Parâmetros inorgânicos	Retangular	A= 10m <sup>2</sup>	Concreto	Hjelmar et al. (1986)
Resíduos sólidos	Decomposição dos resíduos	Retangular	A= 9,1 x 18,2m <sup>2</sup> ; H= 1,2m	Cimento e madeira	Ham & Bookter (1982)

Segundo Abichou and Tawfiq (2001), os lisímetros apresentam algumas desvantagens que ainda são dificuldades a serem vencidas pela comunidade geotécnica:

- A condição de contorno artificial provocada pelo lisímetro na base do perfil da cobertura acaba por diminuir a evapotranspiração. Esta condição, que não existe no caso de uma cobertura real impede que o fluxo aconteça entre as porções superiores e inferiores ao lisímetro. Toda água que percola e chega à base do perfil é coletada e conduzida ao sistema de medida, conseqüentemente esta água nunca poderá mover-se para cima simulando o processo natural de evapotranspiração;

- A maioria dos lisímetros também inclui uma camada de drenagem constituída de areia ou geossintético para coletar a água que será conduzida a um ponto de medida. Os grandes poros associados ao material drenante podem levar a quebra de capilaridade na base do lisímetro que pode não existir em condições naturais. Como resultado ocorrerá um aumento artificial na capacidade de armazenamento do solo imediatamente acima do lisímetro e redução artificial na percolação.
- Segundo Hansen et alli (2000), é importante que o sistema de drenagem seja executado em camadas simulando uma transição para que as partículas da primeira camada, que estão em contato com a cobertura, não sejam muito maiores que a do material ensaiado, prevenindo, desta forma, o efeito da quebra de capilaridade. Outra forma de prevenir a formação da indesejável barreira capilar seria através da aplicação de uma carga baixa de sucção de forma constante ou periódica na saída do sistema de drenagem.
- O desvio lateral da água poderá ser um problema significativo com os lisímetros se as dimensões do lisímetro são insuficientes e o lisímetro não tem paredes verticais laterais. Isto ocorre em condições não saturadas em função da tendência da água ser retida no solo fino antes de chegar à camada drenante de material grosseiro (Chiu and Shackelford, 1994 e 2000). Abichou et alli (2004) sugerem que a largura do lisímetro deve ser, no mínimo, 5 vezes a profundidade da cobertura e mesmo assim, efetuar o monitoramento para verificar se o desvio da água afeta o volume percolado.
- Com relação ao efeito de borda, Hansen et alli (2000), comentam que o maior potencial problema em experimentos com lisímetros é o fluxo preferencial ao longo das paredes dos lisímetros. Este caminho preferencial de fluxo se forma pela falta de contato entre o solo ensaiado e as paredes do lisímetro. Este problema poderá superestimar o volume do percolado o que falsearia os resultados. Em geral, a influência do fluxo pelas paredes laterais dos lisímetros poderia ser minimizada aumentando a área da superfície do lisímetro. Atualmente, muitas técnicas têm sido desenvolvidas para solucionar o problema, mas infelizmente somente poucos pesquisadores avaliaram a eficiência das técnicas usadas. A Tabela 2.3 apresenta alguns estudos para medir ou evitar o fluxo preferencial ao longo das paredes laterais dos lisímetros.

**Tabela 2.3** - Estudos relacionados ao problema de fluxo pelas paredes laterais dos lisímetros, apud Hansen et alli (2000).

Referência	Técnica	Avaliação
Corwin & LeMert (1984)	Anéis são introduzidos dentro do lisímetro na parte superior da coluna que desviam o fluxo para dentro do solo.	Foi utilizado um modelo de transporte de solutos para avaliar o efeito da parede lateral. Entretanto, não pode comprovar se o fluxo pela parede lateral reduziu ou foi eliminando.
Corwin (2000)	Anéis são introduzidos dentro do lisímetro na parte superior da coluna que desviam o fluxo para dentro do solo.	Experimentos com traçadores mostraram que os efeitos da parede lateral não foram completamente eliminados mas foram significativamente reduzidos.
Mclay et al (1992)	Uma pasta de petróleo foi utilizada como selo entre a amostra de solo e as paredes do lisímetro.	O coeficiente de permeabilidade medido no lisímetro selado foi significativamente menor que no outro. O fluxo pelas paredes laterais foram examinados e somente pode ser visto naquele sem o selo.
Cronan (1978)	Instalando um anel na base do lisímetro capaz de coletar o fluxo pelas paredes laterais e este líquido analisado separadamente.	Foi utilizado um traçador a base de cloreto para identificação do fluxo preferencial ao longo das paredes laterais. A técnica foi um sucesso.
Nordmeyer & Aderhold (1994)	O percolado foi coletado em duas regiões do lisímetro: uma coletado no centro do lisímetro e outra na parte mais externa.	Foi utilizado um traçador a base de bromo e as frações coletadas no centro do lisímetro e nas partes mais externas foram analisadas separadamente com sucesso.
Jemison & Fox (1992)	O material ensaiado é deixado nas condições in situ sem paredes laterais separando o solo testado do solo adjacente.	O lisímetro não possui paredes laterais.

Abichou et alli (2004) comentam que os lisímetros sem paredes laterais subestimam a percolação que atravessa a camada de cobertura em pelo menos 25%. A instalação de paredes laterais melhora consideravelmente o desempenho dos lisímetros. Para determinação da altura ideal da parede lateral, deve-se considerar também o tipo de solo da cobertura, mas, mesmo assim, estas vazões podem ser subestimadas em 10%. O desvio lateral das águas, a condição de contorno impermeável na base do lisímetro associado à camada de drenagem imediatamente acima da base do lisímetro causa a redução da vazão que por ali drena. Para medir a

percolação com maior precisão, devem-se conhecer os coeficientes hidráulicos dos solos usados dentro e fora dos lisímetros.

Stormont et al. (1999) apresentam dados que indicam que o geotêxtil, que pode ser instalado na base do lisímetro para funcionar como sistema de drenagem, realmente funciona como um dreno apesar da quebra capilar, mas transmite água numa condição não saturada em uma razão muito menor que para a condição saturada.

Abichou et alli (2004), comentam que a instalação dos lisímetros dentro do solo pode introduzir deformações no solo dentro e fora dos lisímetros, o que poderá afetar a precisão da medida da percolação. Além disso, recomendam que a largura do lisímetro seja de no mínimo 5 metros. Comentam também que uma parede lateral com 30 cm de altura já é suficiente para se ter um bom desempenho do lisímetro.

Segundo Parent et alli (2005), a altura das paredes laterais dos lisímetros podem ser estimadas a partir do método linear de Bews et al.(1999) ou de Kisch (1959), baseando-se na curva de condutividade hidráulica em função da sucção dos materiais.

## **2.6 – Vegetação**

Conforme apresentado e discutido anteriormente, a cobertura vegetal representa um importante componente nas coberturas, tanto nas convencionais atuando como proteção para o solo vegetal contra os agentes erosivos (chuva e ventos), quanto, principalmente, nas coberturas evapotranspirativas.

Segundo a EPA (2002), a vegetação possui várias funções:

- As folhas interceptam parte das chuvas antes do impacto com o solo, reduzindo a energia da água e, conseqüentemente, o potencial de erosão;
- A vegetação também ajuda a dissipar a energia dos ventos;
- O sistema radicular raso das plantas aumenta a resistência da camada superficial contra os agentes erosivos (água e ventos);
- A vegetação promove a transpiração da água incrementando a capacidade de armazenamento dos solos da cobertura e minimizando o escoamento superficial e a drenagem por estes solos;

- Uma superfície bem vegetada é geralmente considerada mais natural e mais agradável esteticamente que uma superfície sem vegetação;

### **2.6.1 – Espécies de Plantas**

Segundo ITRC (2003), as espécies das plantas podem variar dependendo do clima, uso do solo em longo prazo, tipo do rejeito, limitações do projeto, etc. Pode ser interessante utilizar de uma mistura de espécies que poderá maximizar o número de dias de transpiração bem como a quantidade total de água a ser retirada. Deve-se ter em mente os objetivos do pós-fechamento da área, quando é desejável que a vegetação exija a menor manutenção possível e tenha sustentabilidade em longo prazo. Talvez por isso, alguns pesquisadores advogam plantar somente espécies nativas. Ensaio com a mistura de espécies nativas e não nativas têm fornecido bons resultados quando se pensa em redução ou eliminação da quantidade de água na cobertura. A transpiração começa a ocorrer após as plantas iniciarem o crescimento e desenvolvimento, mas para se pensar em estabilidade vegetal, deve-se esperar que se estabeleça uma comunidade de plantas mais maduras. Uma comunidade pode levar de três, cinco ou mais anos para se desenvolver.

Segundo a EPA (2002), para a seleção da vegetação apropriada para um determinado local, as seguintes recomendações podem ser seguidas:

- Arbustos localmente adaptados, com baixo crescimento (menor que 1 m de altura) e gramíneas poderiam ser selecionadas. Plantas nativas são recomendadas para manter a estabilidade ecológica em longo prazo;
- As plantas deveriam sobreviver em climas áridos e em temperaturas extremas;
- As plantas deveriam possuir raízes profundas o suficiente para remover a umidade da camada superficial, mas, não tão profunda que possa afetar as demais camadas da cobertura;
- As plantas devem ser capazes de crescerem com a mínima quantidade adicional de nutrientes;
- A comunidade vegetal deveria ser suficientemente diversa para promover a proteção contra a erosão durante todas as estações do ano e sob uma variedade de condições;

- As plantas não deveriam atrair espécies escavadoras;
- Finalmente, a cobertura vegetal deveria ser capaz de sobreviver com pouca ou nenhuma manutenção.

### **2.6.2 – Crescimento Vegetativo**

Segundo a EPA (2002), as plantas e a transpiração são ativas somente durante a estação de crescimento vegetativo da comunidade ao passo que a evaporação da água na superfície do solo ocorre durante todo o ano.

Mudanças no potencial de transpiração ocorrem durante o ano associadas com a precipitação, vento, pressão atmosférica e flutuação da temperatura. Na estação de crescimento vegetativo, diferentes espécies iniciam e alcançam o pico de crescimento em tempos variados. As plantas podem responder de forma alternada dependendo de condições climáticas favoráveis ou não, na mesma estação de crescimento.

Para aplicações práticas, é importante escolher comunidades de espécies que possam responder bem a todas as condições durante a estação de crescimento e assim, maximizar a transpiração. Assim, é interessante incluir uma mistura de espécies que estarão ativas durante as estações quentes e frias de forma que a transpiração na cobertura possa estar presente em qualquer período do ano.

### **2.6.3 – Estrutura e Profundidade das Raízes**

Segundo a EPA (2002, dados locais sobre a estrutura, a densidade e a profundidade das raízes podem ser difíceis de serem obtidos. A profundidade real das raízes é usualmente controlada pelas propriedades do solo e não somente pelo potencial da planta. Assim pode ser interessante a utilização de modelos que consideram o crescimento das raízes limitado pelas propriedades do solo. Em geral, a grama tem a maioria das suas raízes juntas formando uma densa rede de raízes fibrosas a meio metro da superfície do solo.

#### **2.6.4 – Índice de Área Foliar**

Segundo a EPA (2002), o índice de área foliar (LAI) é a área total das folhas por unidade de área de solo e é o maior controlador da transpiração. Área foliar é muito importante na absorção da radiação e na realização da fotossíntese durante o período diurno e em ciclos sazonais. Globalmente, o LAI varia de praticamente zero até 10, mas pode sofrer grandes variações regionais. O LAI varia durante o período de crescimento vegetativo quando pode começar e terminar com o valor zero. Durante o período de crescimento vegetativo o LAI atinge um valor máximo e volta a cair. Essa variação do LAI é importante em muitos modelos, uma vez que controla a transpiração das plantas. Com o crescimento das plantas elas aumentam sua área foliar e conseqüentemente seu uso da água. Em geral, espécies que tem maior taxa de crescimento em termos de biomassa têm maior quantidade de folhas e suas folhas são mais finas, com maiores LAI, resultando em elevadas taxas de crescimento da área foliar.

#### **2.6.5 – Capacidade de Campo**

A capacidade de campo é definida pelo ITRC (2003) como o teor de umidade do solo abaixo do qual a percolação vertical sob a ação das forças gravitacionais é desprezível. Normalmente esta situação ocorre nos solos após dois ou três dias destes terem sido saturados com água e deixados drenar livremente. A capacidade de campo também pode ser definida como o teor de umidade volumétrico obtido na curva de retenção de água do solo quando a sucção for igual a 33,0 kPa.

#### **2.6.6 – Ponto de Murcha**

Segundo a EPA (2002), o ponto de murcha do solo é o teor de umidade volumétrico abaixo do qual as plantas não conseguem mais extrair água do solo. Mesmo quando o solo se encontra com umidade maior que a correspondente ao ponto de murcha, nem toda água nos poros está disponível para as plantas, uma vez que as forças atrativas entre as moléculas de água e as partículas de argila do solo,



em poros muito pequenos (microporos), podem ser muito fortes, maiores que a capacidade de extração das plantas (cerca de 15 bars ou 1500kPa). Por isso, também se costuma definir o ponto de murcha como a umidade volumétrica correspondente à sucção igual a 1500 kPa.

O ponto de murcha varia de acordo com as características do solo e das plantas. Solos com elevados teores de argilo minerais podem ter um valor de ponto de murcha maior que o dos solos grosseiros. Algumas espécies de plantas são melhores adaptadas para remover a umidade do solo e, portanto, elas têm um ponto de murcha menor. Em camadas de solos rasos a redução da água continua além do ponto de murcha desde que a evaporação ainda esteja atuando. As camadas de solos profundos não são afetadas pela evaporação direta e permanecem com o ponto de murcha original.

### **2.6.7 – Capacidade de Armazenamento de Água no Solo**

A capacidade de armazenamento da água no solo, grandeza tão importante na avaliação de desempenho de uma cobertura, é dada pela diferença entre os teores de umidades volumétricos no ponto de murcha e na capacidade de campo.

A unidade de medida é a profundidade da capacidade de armazenamento por unidade de profundidade do solo, isto é, metros de capacidade de armazenamento do solo por metro de solo.

## **2.7 – Aspectos Relevantes Relativos ao Projeto de Engenharia de uma Cobertura**

Segundo ITRC (2003), devido à grande diversidade das condições climáticas, dos solos disponíveis, das variedades de espécies vegetais e, no caso americano, dos diferentes tipos de critérios de desempenhos estabelecidos pelos órgãos ambientais, é fundamental que o processo para se chegar ao projeto final seja flexível e criativo. Nesse sentido, sugerem alguns tópicos de discussão que poderiam ser cronologicamente apresentados a seguir:

- Critério de desempenho da cobertura;
- Projeto preliminar/conceitual;
- Caracterização do local;
- Análise de sensibilidade através de modelagem numérica;
- Projeto final.

### **2.7.1 – Critérios de Desempenho da Cobertura**

Nesta etapa devem ser discutidos os objetivos esperados pela cobertura e os critérios e premissas do projeto

### **2.7.2 – Projeto Preliminar/Conceitual**

Estariam incluídas nesta etapa algumas atividades tais como: conhecimento hidrogeológico da região obtido em escala macro por pesquisa bibliográfica, dados de desempenho de experimentos já construídos em áreas próximas tais como lisímetros e/ou coberturas alternativas. Estes dados, entretanto, nem sempre estão disponíveis e o projeto preliminar poderá ser desenvolvido sem esta informação. O objetivo desta etapa de projeto é estimar as espessuras das camadas de solo da cobertura e para tanto se deve conhecer a capacidade de armazenamento dos solos que comporão as coberturas e o regime pluviométrico da região.

### **2.7.3 – Caracterização Local**

Esta etapa do projeto contemplaria a caracterização do local onde se implantará a cobertura incluindo os seguintes itens: Conhecimento das condições climáticas locais, caracterização completa dos solos a serem utilizados na cobertura bem como do resíduo a ser coberto e caracterização da vegetação que se pretende implantar sobre a cobertura.

### 2.7.4 – Análise de Sensibilidade Através de 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 se verificar a sensibilidade do sistema frente à variação dos parâmetros utilizados no projeto. Após uma descrição detalhada sobre todas as singularidades dos modelos, os autores do ITRC (2003), apresentam conclusões e recomendações e algumas delas estão sumarizadas abaixo:

- Estimativas obtidas a partir dos modelos matemáticos não têm suficiente precisão para servir de base para a regulamentação das coberturas;
- O item fluxo não deveria ser considerado sozinho como o principal resultado da modelagem numérica da cobertura. O aspecto mais importante na modelagem é a possibilidade de visualizar resultados de vários cenários através das análises de sensibilidade, em que os diversos parâmetros embutidos no projeto são modificados. Por último, o modelo deve ajudar a estabelecer um projeto mais realista com respeito à espessura das camadas de solo, grau de compactação do solo, tipos de vegetação, etc;
- É importante ser bastante criterioso para com os parâmetros de entrada dos modelos de forma que os mesmos sejam os mais realistas possíveis, mas com viés conservador, de forma a fornecerem resultados mais confiáveis para a avaliação do projeto proposto;
- Modelos que incorporam a equação de Richard deverão ser sempre utilizados em projetos de coberturas, uma vez que, na maioria dos casos, as coberturas são meios parcialmente saturados;
- Dados climáticos de entrada do modelo devem ser diários ou horários e não mensais;
- A capacidade dos modelos em estimar ou simular precisamente as medidas de campo está relacionada à limitação de cada modelo, mas também a complexidade e o número de fatores envolvidos nas análises, tais como: ET, escoamento superficial e fluxos preferenciais;
- É importante e sempre recomendável, a utilização de medidas diretas (se possível) ao invés de dados bibliográficos para reduzir as incertezas dos modelos nesta etapa do projeto.

### 2.7.5 – Projeto Final

Esta etapa do projeto consiste no detalhamento dos estudos de forma que todas as hipóteses anteriormente admitidas possam ser comprovadas antes da execução da obra.

Segundo ITRC (2003), existem várias formas de se incrementar a qualidade dos dados obtidos/estimados em etapas anteriores, de forma que os mesmos se tornem mais realistas e mais precisos, passando inclusive por modelagens matemáticas mais complexas e mais detalhadas, à medida que o projeto se desenvolve e que mais dados são disponibilizados.

Uma forma de obtenção sempre desejada e nem sempre disponível seria a construção de ensaios em grande escala no campo (lisímetros) onde seria possível materializar as características do projeto e avaliar o desempenho do sistema com o passar do tempo. Alguns projetistas reclamam que ensaios de campo levam muito tempo e são muito caros, além de não avaliar o desempenho da cobertura por um tempo suficientemente grande para fornecer dados que representem o comportamento do sistema em longo prazo. Outros, entretanto, continuam a utilizar ensaios de campo como forma de provar o desempenho da cobertura projetada. A partir dos resultados dos ensaios de campo é possível melhorar algumas limitações dos modelos numéricos uma vez que estes podem fornecer dados mais precisos que obras análogas já construídas. Como outros métodos de avaliação, os ensaios de campo também possuem limitações, como aquelas já discutidas neste trabalho, por exemplo: muito tempo para que a vegetação se estabeleça e se estabilize; limitação do período em que os dados hidrológicos estão disponíveis, etc.

O’Kane & Barbour (2003) preconizam que, antes de se partir para a construção dos lisímetros em campo, esta etapa deveria ser precedida por uma fase de projeto do lisímetro obedecendo a uma cronologia similar àquela descrita acima, de forma que os parâmetros geométricos do lisímetro poderiam ser inicialmente estimados utilizando a metodologia de Kisch (1959) e posteriormente detalhados utilizando modelos numéricos.

A partir deste ponto, os lisímetros seriam construídos em campo e os resultados assim obtidos serviriam para calibrar o modelo ora utilizado. Só então se partiria para o projeto executivo da cobertura propriamente em que os resultados dos ensaios dos

lisímetros serviriam como entrada para o detalhamento do projeto do sistema de cobertura.

## 2.8 – Trabalhos já Realizados na Área da Pesquisa em Paracatu

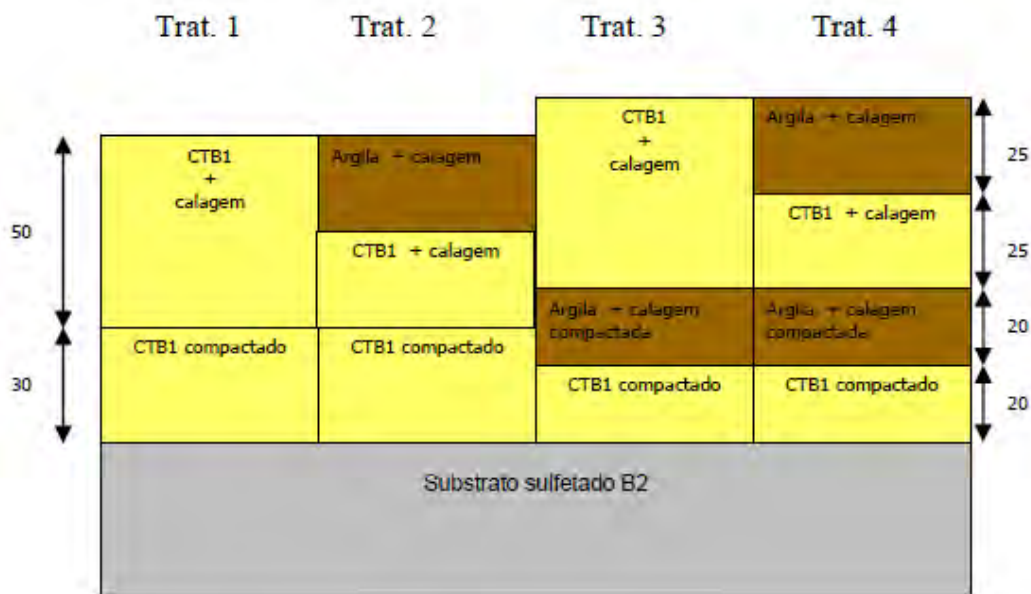
A RPM iniciou em 1994 as pesquisas em Paracatu relativas à utilização de coberturas. Em colaboração com a Universidade Federal de Viçosa construíram diversos experimentos com várias camadas de coberturas e espécies vegetais diferentes colocadas sobre a área minerada, que, fundamentalmente, avaliavam a sustentabilidade da vegetação em se adaptar às condições locais (Dias e Ribeiro, 2004).

Dias et al. (2000) testaram a combinação de dois materiais para compor a camada selante e de duas misturas para comporem a camada superficial para crescimento de plantas em um substrato que continha alto teor de material sulfetado (30 g kg<sup>-1</sup>): 1) uma primeira camada isolante de 20 cm, composta de material oriundo da barragem de rejeito da referida mina, ou um horizonte B de um latossolo da região foram usados para prevenir a oxidação do material piritoso; 2) uma camada superior de 30 cm composta de solo superficial, ou solo superficial + composto de lixo urbano (3:1 v/v). Quinze espécies de leguminosas foram plantadas manualmente em um espaçamento de 1,0 x 1,0 m (uma espécie por linha). Dezesesseis meses após o plantio as plantas foram avaliadas e os resultados mostraram um efeito do substrato na taxa de sobrevivência, altura e diâmetro das plantas. O uso de argila como material isolante apresentou melhores resultados que o material oriundo da barragem de rejeito e as plantas não responderam a adição de composto de lixo urbano ao solo superficial. Entre as espécies avaliadas, *Thephrosia sinapau*, *Erytrina verna*, *Dipterix alata* e *Stryphnodendrum guyanensis* mostraram uma taxa de mortalidade de 100% após 16 meses, enquanto, *Sesbania marginata*, *Acacia holosericea*, *Mimosa pellita*, *Acacia crassicarpa*, *Acacia mangium* e *Acacia angustissima* exibiram maior capacidade de adaptação ao substrato ácido.

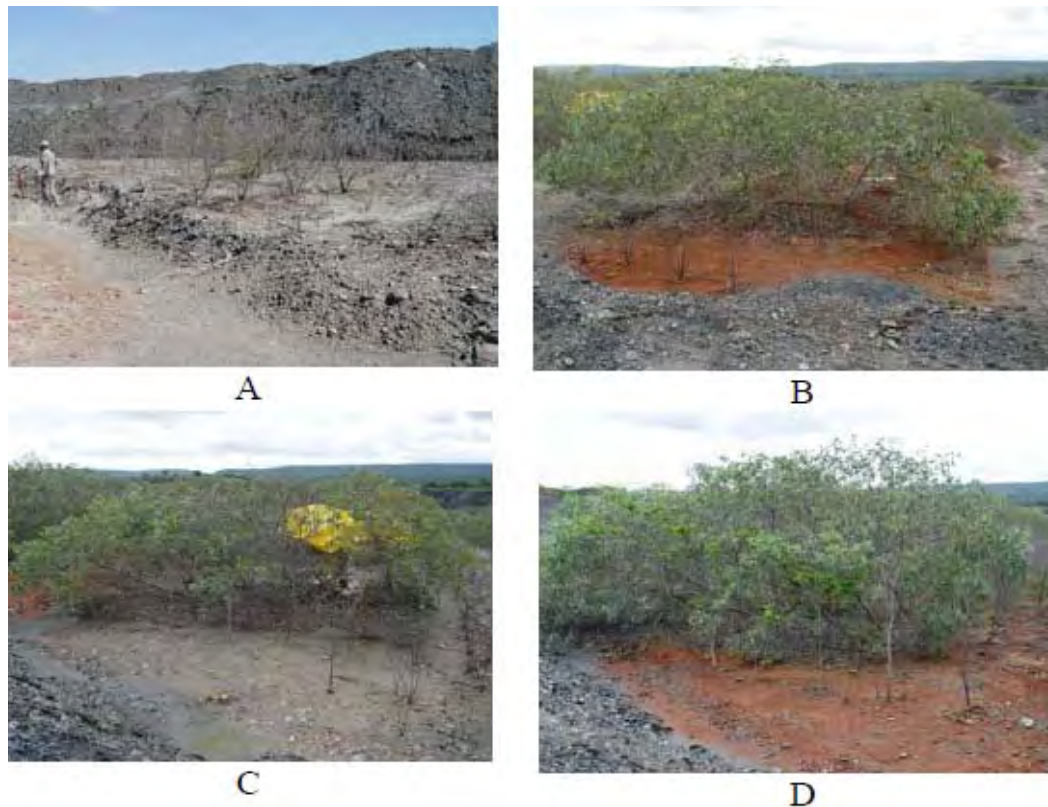
Em outro experimento (B2-2000) implantado sobre o mesmo substrato sulfetado (30 g kg<sup>-1</sup>), foram avaliados quatro tratamentos compostos por uma combinação de uma camada selante e outra de cobertura. Para ambas camadas foram testados o minério superficial com baixos teores de sulfetos (CTB1) e argila

(horizonte B de um Latossolo vermelho escuro da região de Paracatu), conforme apresentado na Figura 2.9.

Na avaliação realizada aos 58 meses após o plantio, todos os indivíduos das espécies plantadas nas parcelas referentes ao tratamento 1 (CTB1 como camada selante e de cobertura) não sobreviveram às condições adversas do substrato (Figura 2.10A). Desta maneira não foi possível a obtenção de dados biométricos das espécies, bem como de teores foliares de arsênio. Para os demais tratamentos houve a sobrevivência de diferentes espécies (Figuras 2.10B, 2.10C e 2.10D). No entanto, apenas as espécies *A. farnesiana*, *A. holosericeae*, *M. birmucronata*, *A. artemisiana*, *A. polyphila*, *A. lebbeck* e *E. timbauva* apresentaram sobrevivência nos tratamentos dois, três e quatro. As quatro primeiras espécies foram selecionadas para a retirada de amostras foliares para a quantificação de arsênio.



**Figura 2.9** - Esquema mostrando os quatro tratamentos referentes a camadas selantes e de cobertura utilizados no experimento B2-2000 montado sobre o substrato sulfetado em Paracatu-MG (Dias et al, 2005).



**Figura 2.10** - Visão parcial das parcelas referentes aos tratamentos 1 (A), 2 (B), 3 (C) e 4 (D) do experimento B2-2000 implantado em substrato sulfetado remanescente da exploração de ouro em Paracatu-MG (Dias et al, 2000).

A espécie que apresentou melhor capacidade de adaptação às condições dos substratos foi a *A. holosericea*, cujo crescimento não foi influenciado pelos diferentes tratamentos, exceto o tratamento 1. Para as demais espécies foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, sendo que para a *M. bircromunata* o tratamento três foi o que proporcionou menor crescimento e para a *A. artemisiana* o tratamento dois.

A SRK também fez um trabalho de monitoramento na cobertura já existente no Tanque Específico III, na mina da RPM, em Paracatu (SRK, 2003 e SRK, 2005), que consistiu no seguinte:

- Montagem de uma estação metereológica completa, automatizada, capaz de coletar dados da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade dos ventos, direção dos ventos, radiação e precipitação.

- Monitoramento geotécnico através da instalação de instrumentos de medida de sucção e umidade no interior do reservatório e da cobertura do tanque específico III;
- Medida da condutividade hidráulica do solo da cobertura no campo com o permeâmetro de Guelph.

Foram coletadas amostras de solo nos tanques específicos II e III, no reservatório da barragem de rejeitos e de possíveis materiais de empréstimo para a realização de ensaios geotécnicos tais como: teor de umidade, limites de Atterberg, peso específico, granulometria conjunta, curvas de retenção de água, condutividade hidráulica saturada, adensamento e compactação.

Modelou-se o problema com o software SOIL COVER em que as condições climáticas monitoradas pela estação meteorológica e os dados obtidos pelos ensaios laboratoriais serviram como dados de entrada. O modelo foi calibrado utilizando os resultados obtidos do monitoramento do rejeito e do solo de cobertura do tanque específico III. Os dados relativos à infiltração e escoamento superficial foram obtidos indiretamente uma vez que não foram construídos lisímetros para tal finalidade. A partir dos dados obtidos nos instrumentos de medida da umidade do solo (TDR), da estação pluviométrica, dos parâmetros geotécnicos dos materiais obtidos no laboratório e da condutividade hidráulica de campo, foi possível construir o modelo e calibrá-lo. A partir do modelo calibrado, foram simuladas algumas variações da cobertura e analisados os resultados que serão sumariamente apresentados a seguir:

- Os perfis de umidade do solo ficaram muito próximos daqueles medidos em campo e foram considerados satisfatórios pela equipe da SRK;
- Os resultados indicaram indiretamente que 45% da precipitação que cai sobre a superfície do tanque escoam e 31% infiltra no solo da cobertura;
- Nos gráficos do teor de umidade volumétrico com o tempo observou-se, para cada instrumento, que o rejeito se encontrava quase saturado em todo o período de monitoramento o que ocasionou fluxo de baixo para cima em épocas de estiagem com a conseqüente ascensão dos sais para a superfície;
- A cobertura do tanque não se mostrou efetiva também no que diz respeito à infiltração de oxigênio;



- A ineficiência da camada de cobertura como barreira para a passagem de oxigênio também foi comprovada pela saturação do solo de cobertura apresentar-se, em períodos de seca, abaixo de 80%, valor considerado o mínimo necessário para praticamente impedir a passagem de oxigênio;
- A partir de um gráfico “perfil de umidade volumétrica com a profundidade e com o tempo” para a cobertura existente, observou-se que acontecia a saturação do perfil com o início do período de chuvas e que esta condição era mantida ainda no período de seca, com a umidade maior que a inicial;
- Concluiu-se, através de simulações numéricas, que o aumento da espessura do solo de cobertura não traria vantagens significantes quanto à melhoria do desempenho da cobertura e no incremento da capacidade de armazenamento do solo. Ao aumentar a espessura, as raízes das plantas não mais conseguiriam alcançar todo o perfil para a remoção da água;
- O modelo matemático confirma que o escoamento superficial é considerável na cobertura sem vegetação. O que poderia parecer vantagem, uma vez que indica menor quantidade de água se infiltrando pela cobertura, pode se tornar um problema na medida em que este fato aumenta também a erosão superficial da cobertura. Simulações considerando uma “boa” cobertura vegetal indicam que o escoamento superficial se reduziria, mas essa redução seria compensada pelo acréscimo na transpiração, sem aumentar a infiltração.

Os resultados destes trabalhos serviram como base para a proposição e desenvolvimento desta pesquisa uma vez que as recomendações propostas foram incorporadas nessa tese e os dados gerados serviram como entrada na tomada de decisão para o projeto dos lisímetros.

## **3- MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 – Localização e Caracterização da Região do Experimento**

A cidade de Paracatu está localizada na região noroeste de Minas Gerais, há cerca de 488 Km de Belo Horizonte-MG e 239 Km de Brasília-DF. Na Figura 3.1 apresenta-se a localização da cidade e da mina.

A área “Barraginha” foi um pequeno reservatório construído para receber os rejeitos provenientes da operação da planta piloto da mina (Figura 3.2).

O perfil geotécnico no Morro do Ouro, do topo para a base, consiste de quatro camadas aproximadamente horizontais: as zonas oxidadas denominadas C e T, a formação B1, a formação B2 e a zona A. Essas camadas contêm entre 0,1% e 2% de minerais sulfetados. Embora este teor seja relativamente baixo, ensaios geoquímicos confirmam que os sulfetos são altamente reativos, o que limita a capacidade de manter o pH neutro e, conseqüentemente, reduzir a mobilidade dos metais. A camada A, apesar de não conter ouro, também tem cerca de 0,3% de sulfetos e se comporta de forma similar às outras camadas.

### **3.2 – Metodologia**

Para alcançar o objetivo da pesquisa, foi projetado e construído na área da RPM um experimento no qual se cobriu numa área denominada “Barraginha” dois sistemas de coberturas do tipo evapotranspirativo, um com uma barreira hidráulica e outro com uma barreira capilar. O monitoramento das coberturas foi realizado por medidores de escoamento superficial, lisímetros para medir a infiltração e instrumentação geotécnica para monitorar perfis de umidade e sucção nas diferentes camadas de solo.

A partir dos resultados obtidos com a instrumentação do experimento, estudar o balanço hídrico dos sistemas de cobertura (precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, infiltração, etc.) bem como conhecer os perfis de umidade dos materiais presentes nesses sistemas.

Em seguida, os sistemas de cobertura foram modelados numericamente. Para isso, foram executados ensaios de laboratório para determinar propriedades relevantes dos diferentes solos. Além disso, os dados climáticos e das vegetações usadas nos sistemas de cobertura também foram obtidos e incorporados no modelo numérico.

Comparações entre os resultados fornecidos pela instrumentação de campo e obtidos com as análises numéricas forneceram subsídios para se calibrar o modelo numérico mais adequado. Uma vez calibrado, este modelo estará apto para simular diferentes cenários, em que será possível estudar a influência dos solos e das espessuras usadas nas camadas da cobertura, bem como da vegetação.



**Figura 3.1** - Localização da cidade de Paracatu em Minas Gerais. (Imagem Google Earth e Google Maps).

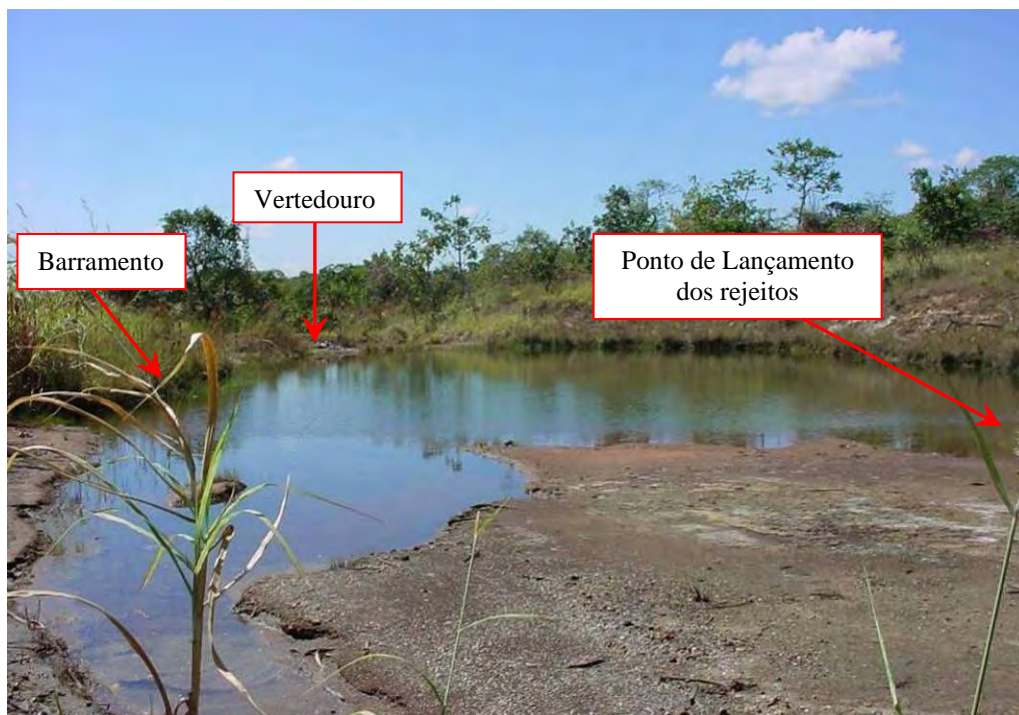


**Figura 3.2** - Localização da “Barraginha”, onde foram construídos os sistemas de cobertura. (Imagem Google Earth).

### 3.3 – Levantamento dos Dados Existentes

O experimento foi instalado na região denominada “Barraginha” local no qual foram lançados os rejeitos gerados durante a operação da usina piloto da mina que esteve em operação por 10 anos (Figura 3.3)

Os rejeitos ali dispostos ainda estão parcialmente saturados e com espessura variando de zero a 2,5 m. Inicialmente pensou-se em construir a cobertura diretamente sobre os rejeitos por se achar que os mesmos já se encontravam adensados e, portanto, capazes de suportar o tráfego dos equipamentos. Ao se iniciar os trabalhos observou-se que não era esta a realidade e que, sobre os rejeitos, seria necessária a implantação de uma camada adicional para dar condição de suporte à construção das camadas de cobertura (camada de trafegabilidade ou de fundação).



**Figura 3.3** - Reservatório preenchido com rejeito inconsolidado.

Como já foi dito, o dimensionamento dos lisímetros foi realizado utilizando o programa VADOSE/W do pacote Geo Slope (2002) incorporando dados preliminares até então disponíveis na RPM. Este software tem sido utilizado em diversos trabalhos referentes ao desempenho de sistemas de coberturas construídas com solo.

O VADOSE/W é um programa de elementos finitos, bi-dimensional, que simula o transporte de água, calor e solutos em meios porosos não saturados. O programa utiliza o método de Penman-Wilson para calcular a evaporação real (AE) na superfície do solo de cobertura em função da poro-pressão e da temperatura. Além disso, os parâmetros locais de precipitação, evaporação, escoamento superficial, percolação de água, congelamento e degelo, fluxo de vapor e transpiração real das

plantas podem ser introduzidos ao programa. Nesse sentido a RPM adquiriu uma estação meteorológica completa, automatizada, capaz de coletar dados da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade dos ventos, direção dos ventos, radiação e precipitação.

Nas análises, os parâmetros climáticos foram obtidos na estação meteorológica da RPM.

Os solos utilizados para as simulações foram os mesmos adotados para os estudos realizados pela SRK (2005) e cujos parâmetros geotécnicos foram obtidos dos ensaios de laboratório realizados naquela ocasião.

Os parâmetros da vegetação foram obtidos da bibliografia e do banco de dados do software VADOSE.

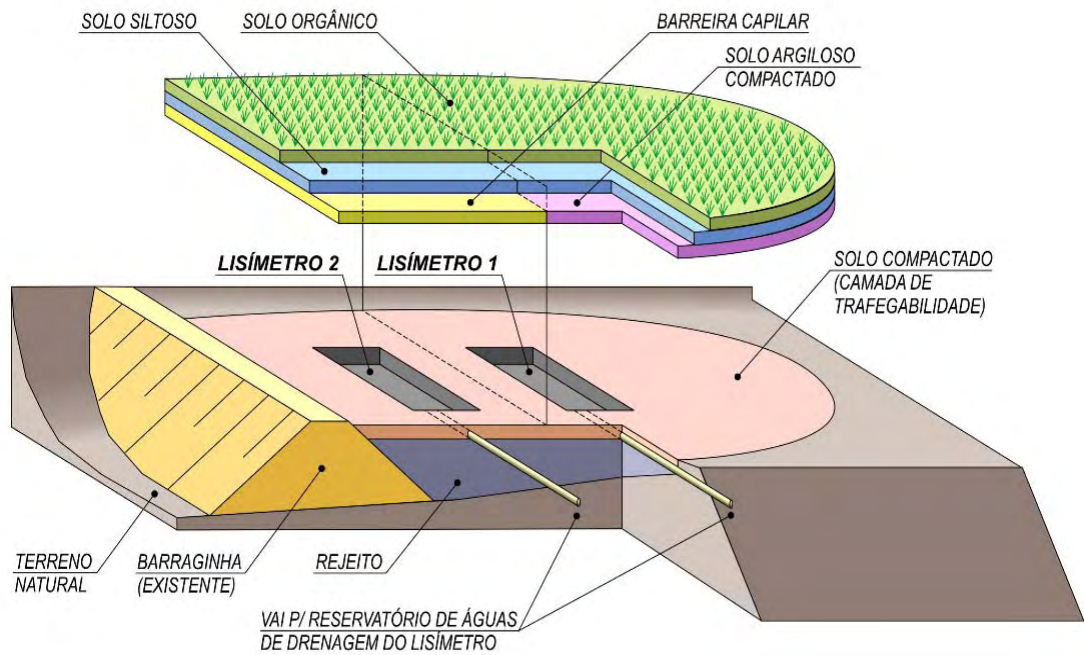
### **3.4 – Concepção dos Experimentos de Campo**

Com base em resultados obtidos nas análises numéricas e na revisão bibliográfica sobre o assunto, foi possível propor dois tipos de coberturas evapotranspirativas, descritas a seguir, a serem lançadas sobre uma camada de fundação com aproximadamente 1,0 m de espessura:

- Cobertura 1: composta por uma camada de 15 cm de solo orgânico que se sobrepõe a uma camada de 50 cm de material siltoso que, por sua vez, é sobreposta a uma camada de 50 cm de argila compactada (barreira hidráulica). Sabe-se que a expansão da mina gerará uma grande quantidade de saprolitos que, ao serem compactados, poderão funcionar como uma barreira hidráulica. Ou seja, atualmente a mina tem um grande potencial de geração de material argiloso o que induziu o direcionamento dos estudos no sentido da utilização destes materiais.
- Cobertura 2, composta por uma camada de 15 cm de solo orgânico que se sobrepõe a uma camada de 50 cm de material siltoso que, por sua vez, é sobreposta a uma camada de 50 cm de cascalho (barreira capilar). Essa camada tem a finalidade de aumentar a capacidade de armazenamento de água da camada superior além de minimizar o efeito da ascensão de sais a partir dos rejeitos. Este

sistema visa simular uma cobertura que possivelmente pode ser aplicada à região do reservatório de rejeitos.

A Figura 3.4 apresenta uma perspectiva dos experimentos mostrando todos os componentes do sistema.



**Figura 3.4** – Vista geral dos experimentos em perspectiva.



### **3.5 – Construção das Camadas de Cobertura**

#### **3.5.1 – Introdução**

Nesta etapa do trabalho descreve-se os procedimentos para a instalação dos equipamentos em campo baseados no programa ACAP (Alternative Cover Assessment Program) descrito por Benson et alli (1999). O experimento tem como finalidade simular o desempenho de uma cobertura sobre um depósito de resíduos de mineração, no caso, rejeitos da mineração Rio Paracatu. Os experimentos são constituídos por dois lisímetros para coleta da água que percola pela cobertura, um sistema de coleta das águas superficiais e sensores de monitoramento do perfil de umidade dentro da cobertura.

Este item é subdividido em sete partes em que se descrevem as seguintes atividades de construção:

- Preparação da fundação;
- Construção dos lisímetros;
- Lançamento dos solos das coberturas;
- Instalação das bermas auxiliares para o sistema de coleta das águas superficiais;
- Instalação do sistema de coleta do escoamento superficial;
- Instrumentação, e
- Vegetação.

A maioria dos itens se referem a ambos os lisímetros. Será indicado onde houver procedimentos presentes em apenas um dos lisímetros.

Na Tabela 3.1 apresenta-se o cronograma dos trabalhos realizados.

**Tabela 3.1** - Cronograma dos trabalhos realizados.

Procedimento		Início	Fim
Montagem dos experimentos		06/2006	12/2006
Instalação dos Instrumentos		03/2007	03/2007
Espécies vegetais	Plantio	09/2007	-
	Germinação	11/2007	03/2008
Coleta dos Dados		05/2007	05/2008

### 3.5.2 – Preparação da Fundação

É desejável que o solo a ser utilizado como fundação, aqui denominado trafegabilidade, seja relativamente fino, com mais que 30% passando na peneira #200. O solo utilizado foi retirado do próprio local por meio de escavações necessárias para a implantação das obras.

A camada foi construída em subcamadas de 30 cm de espessura com grau de compactação maior que 90% e umidade no ramo seco da curva de compactação. Cada subcamada foi testada em pelo menos quatro pontos para a medida dos parâmetros de compactação. A última subcamada não contém partículas maiores que 12 mm expostas na superfície, o que poderia danificar a geomembrana. Marcas de pneu ou outras irregularidades foram corrigidas para não exceder 12 mm no interior da escavação onde foi implantada a geomembrana. A Figura 3.5 apresenta uma fotografia do lançamento da camada de fundação ainda sem o devido tratamento superficial.



**Figura 3.5** - Camada de trafegabilidade/fundação (notar o umedecimento da camada e compactação com a carregadeira).

A base dos lisímetros foi construída inclinada conforme mostrado na Figura 3.6 para que a água que eventualmente atravessasse a cobertura e chegue aos lisímetros possa ser conduzida ao sistema de coleta. Admitiu-se inclinação mínima de 2% (Figura 3.6) para a construção dos lisímetros. Devido às dificuldades de campo, a superfície da camada de trafegabilidade, na região da base dos lisímetros, foi construída com inclinação de aproximadamente 5%.

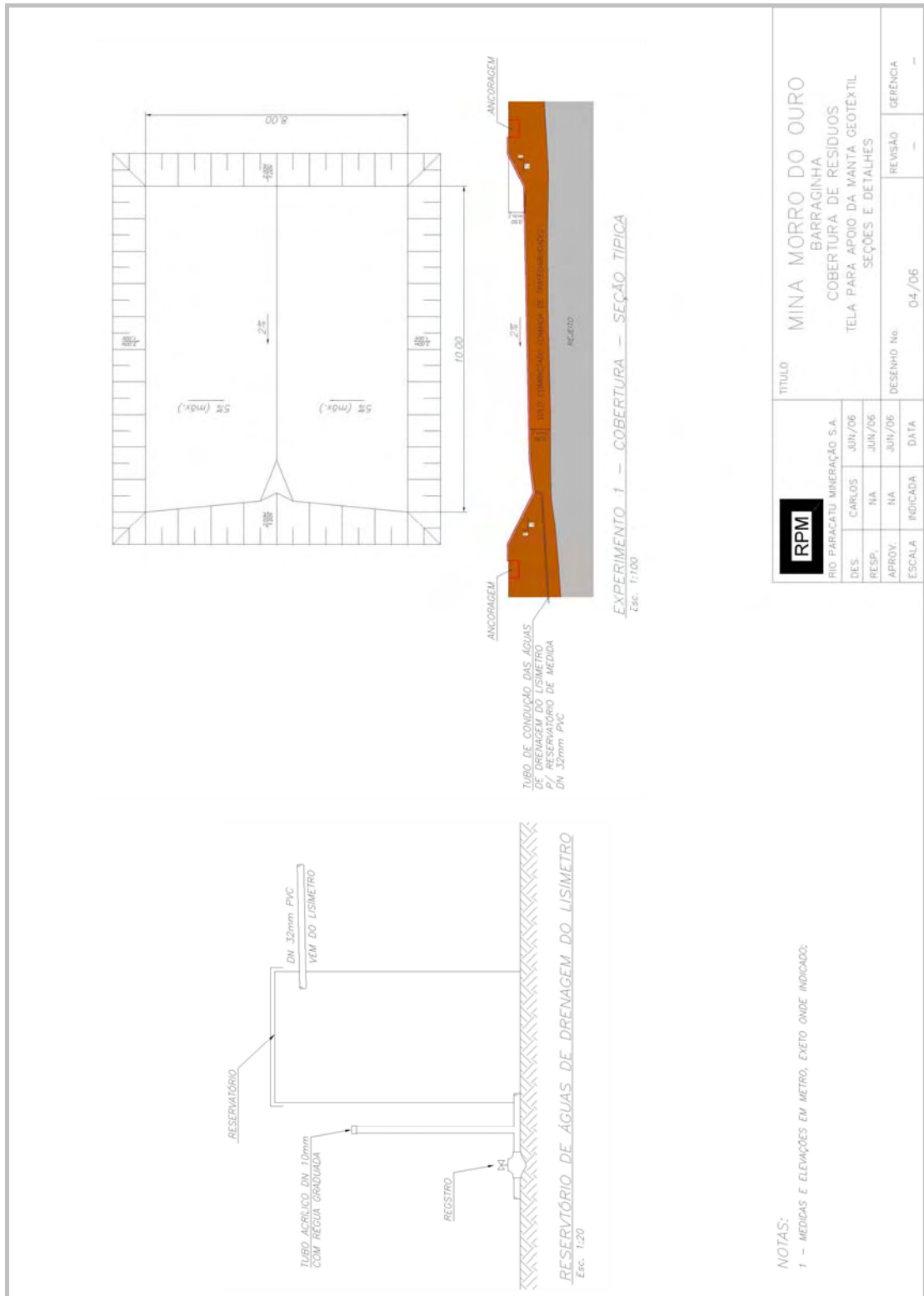


Figura 3.6 - Inclinação de projeto na base dos lisímetro para possibilitar a drenagem.

### 3.5.3 – Construção dos Lisímetros

Os lisímetros, construídos com geomembrana PEAD de 1,0 mm, foram instalados na porção central da área estudada, conforme mostrado nas Figuras 3.7 e 3.8, onde se pode observar que a área do experimento é muito maior que a área dos lisímetros.

Nas Figuras 3.9 a 3.10 apresentam-se os sistemas de cobertura, os lisímetros colocados abaixo de cada um deles, o sistema de medição das vazões que passam pelos lisímetros, o sistema de drenagem e medição das águas superficiais, o posicionamento da instrumentação e o canal de drenagem que circunda a área.



**Figura 3.7** - Lisímetros instalados na porção central da área.

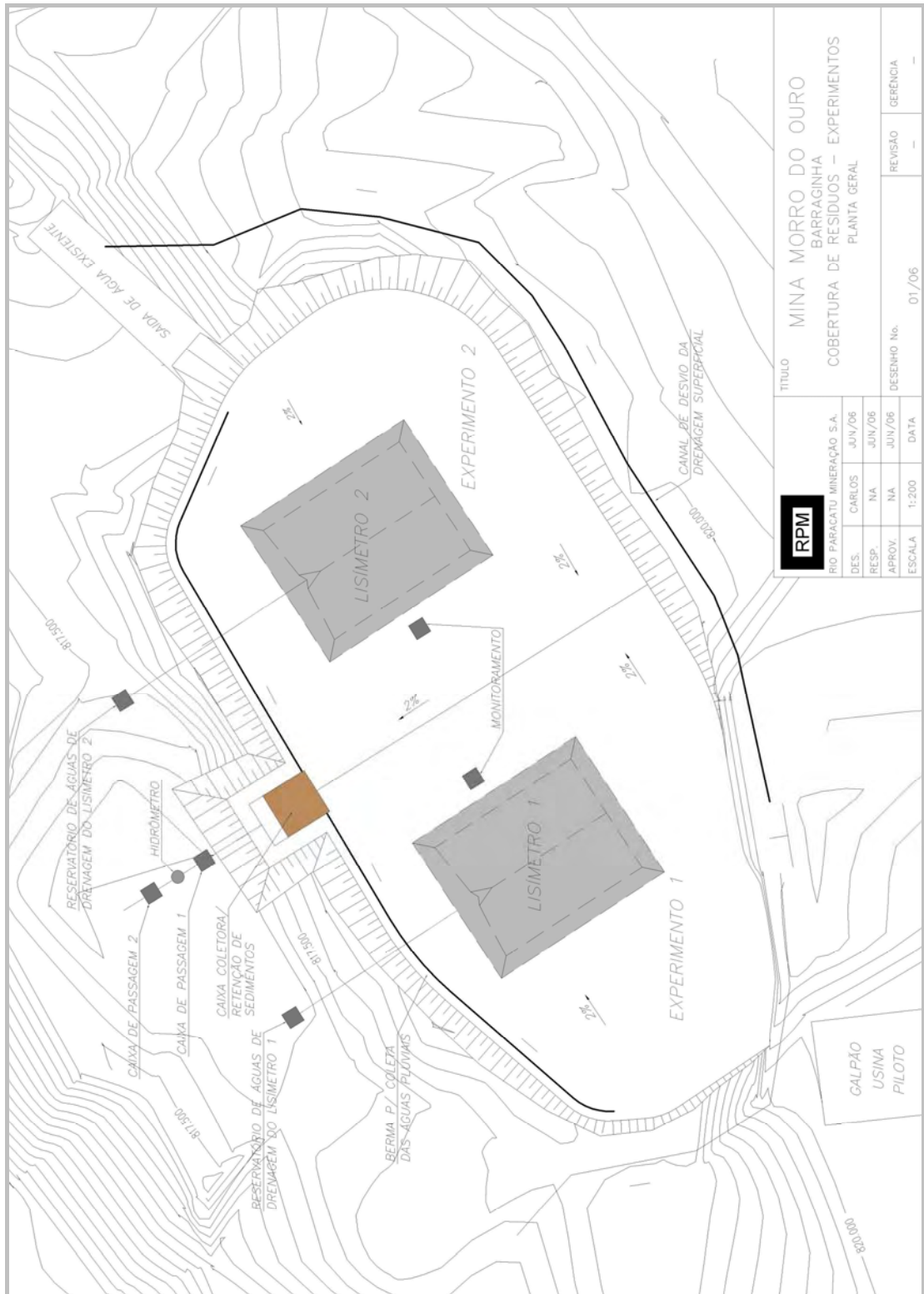


Figura 3.8 - Arranjo geral dos experimentos.

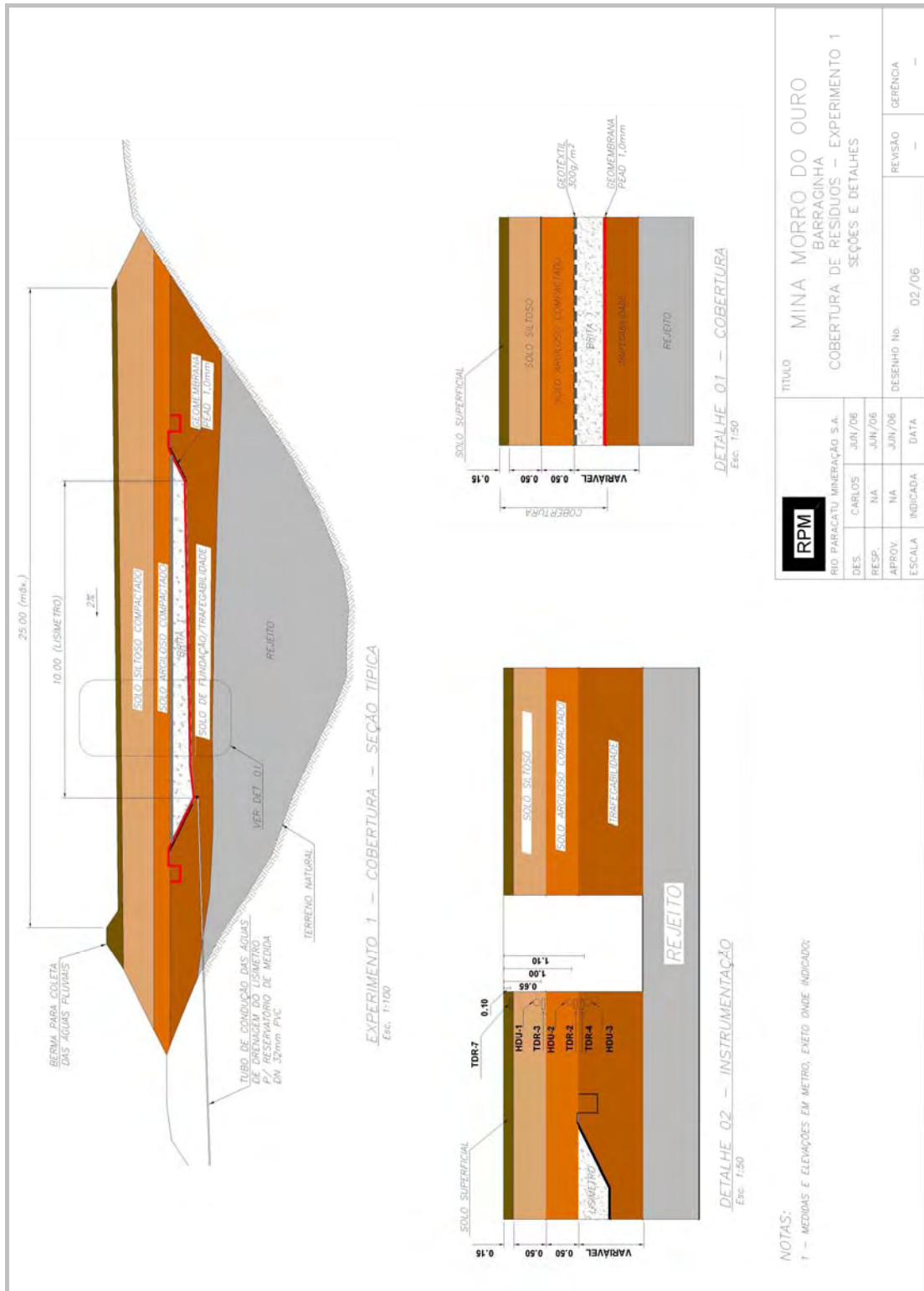


Figura 3.9 – Seção típica do sistema de cobertura 1.

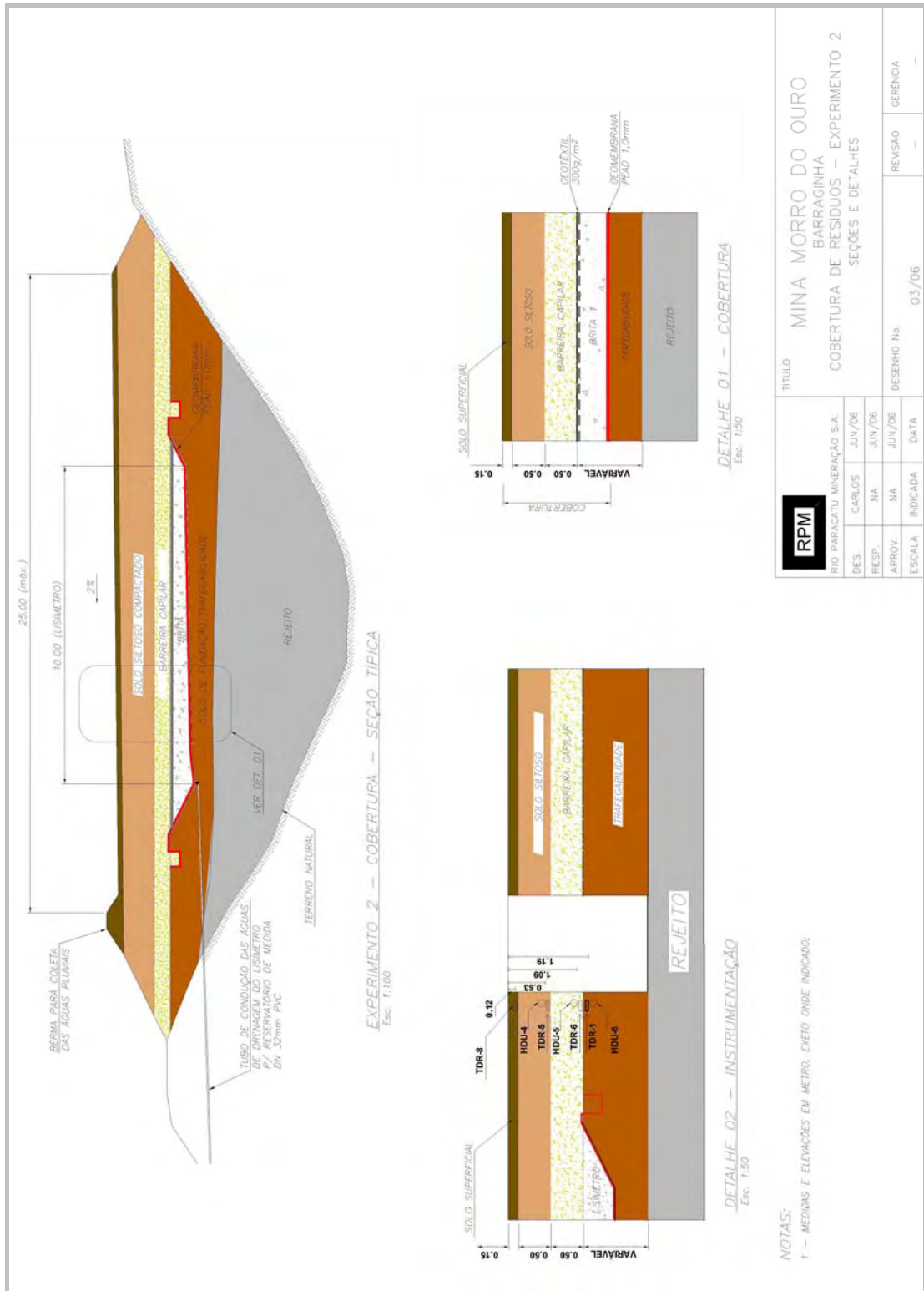


Figura 3.10 - Seção típica do sistema de cobertura 2.



O sistema de drenagem dos lisímetros é composto de:

- Material drenante: os lisímetros foram preenchidos com material drenante, no caso deste projeto, brita 1 (Figura 3.11), com a função de receber as águas que infiltram através da cobertura e que são drenadas para a base do lisímetro;



**Figura 3.11** - Preenchimento dos lisímetros com brita 1.

- Inclinação na base dos lisímetros: os lisímetros foram construídos inclinados para possibilitar que as águas de infiltração sejam conduzidas ao sistema de coleta;
- Sistema de coleta: composto por um tubo de PVC de 32 mm, instalado no fundo do lisímetro, no seu ponto mais baixo, e conectado a um reservatório (caixa coletora). A inclinação do tubo entre a base do lisímetro e a caixa de coleta é de aproximadamente 2,5%;
- Sistema de armazenamento: galão de plástico com capacidade de 10 l, para acondicionamento e medição da água de infiltração;
- Sistema de medida: Ao sistema de armazenamento foi conectado um tubo transparente de acrílico com diâmetro de aproximadamente 10 mm, em que seriam realizadas as medidas hidráulicas por vasos comunicantes. Este sistema

não foi utilizado e preferiu-se medir a água infiltrada e retida no galão, em proveta. Na Figura 3.6 encontra-se a seção esquemática dos lisímetros indicando o sistema de drenagem interna (base inclinada dos lisímetros, tubo de coleta e sistema de medida). Na Figura 3.12 apresenta-se o tubo de saída do lisímetro e o galão coletor.



**Figura 3.12** - Tubo para coleta da água dos lisímetros e galão coletor para a realização das medidas.

De acordo com ACAP (2001), para se construir o lisímetro seria conveniente a utilização da geomembrana PEBD, texturizada dos dois lados, com espessura de 1,5 mm. Como já existia a geomembrana PEAD de 1,0 mm lisa disponível na mina, optou-se pela sua utilização, realizando algumas pequenas adaptações ao projeto original.

Uma das primeiras considerações diz respeito à utilização do geotêxtil. Como a geomembrana PEAD é mais rígida que a PEBD, houve a preocupação com eventuais danos que o material granular utilizado para o preenchimento dos lisímetros (brita 1) pudesse provocar na geomembrana em caso de contato direto entre os dois materiais. Para minimizar danos, utilizou-se o geotêxtil sobre a geomembrana e sobre o geotêxtil foi lançada a brita.

O geotêxtil instalado sobre o material drenante ainda teve a função de transicionar o material granular (brita 1) daquele que o sobrepõe, argila ou cascalho (para o caso do lisímetro 1 ou 2, respectivamente). No contato entre o solo e o material drenante presente no interior do lisímetro foi empregado o geotêxtil de gramatura 200g/ m<sup>2</sup>, portanto mais resistente do que aquele indicado de mínima gramatura, 130g/m<sup>2</sup>, pela ACAP. O geotêxtil foi ancorado em todas as extremidades do lisímetro garantindo que o mesmo não se movesse quando do lançamento dos materiais. (Figuras 3.13 a 3.15)



**Figura 3.13** - Ancoragem da geomembrana e do geotêxtil.

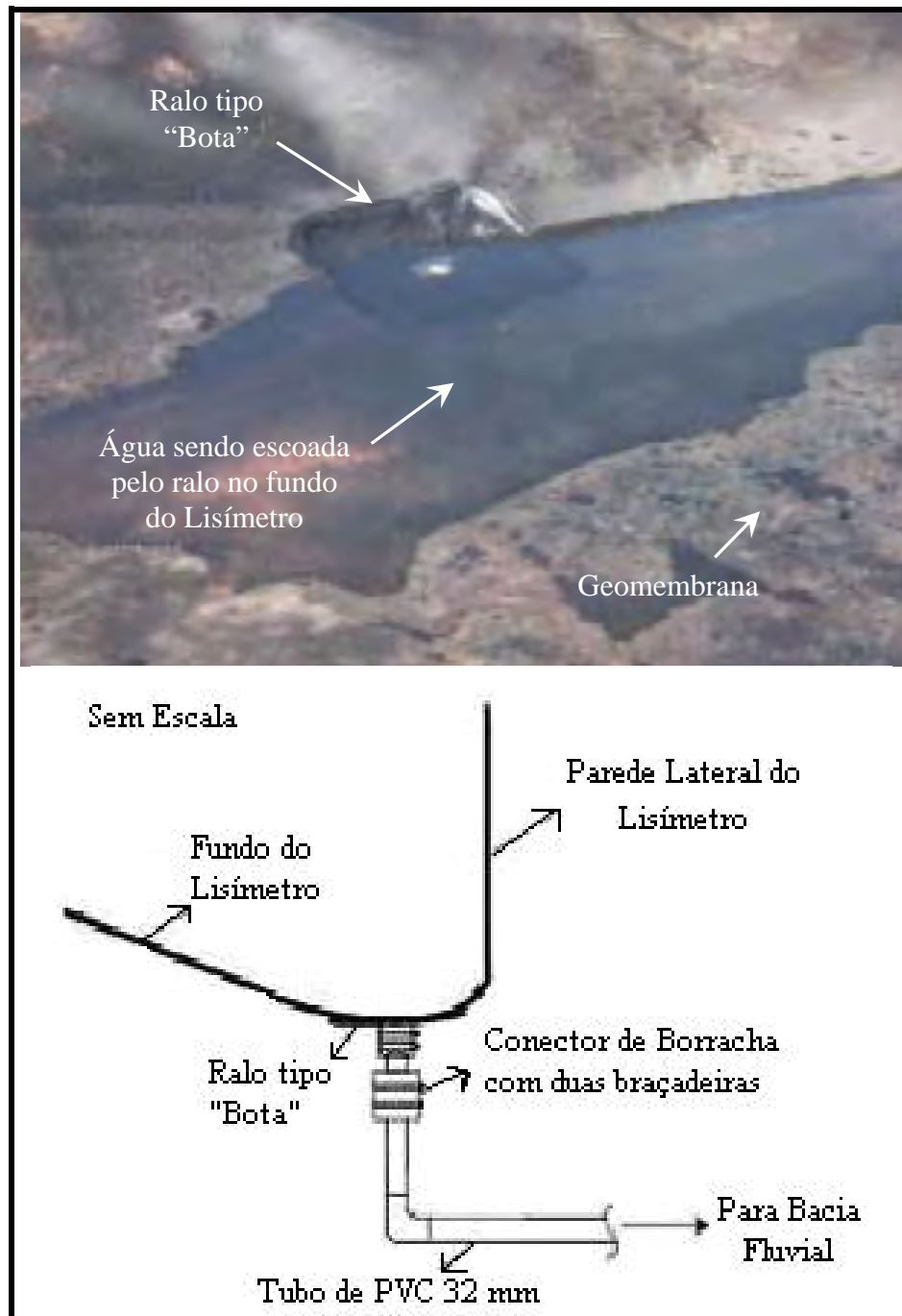


**Figura 3.14** - Detalhe da soldagem da geomembrana por fusão.



**Figura 3.15** - Lançamento do geotêxtil sobre a camada de brita 1 (observar ancoragem do geotêxtil e traspasse entre os materiais).

Existe uma preocupação com relação à qualidade da união entre os lisímetros construídos com geomembrana PEAD e as tubulações de PVC que coletam e conduzem as águas infiltradas para o sistema de armazenamento. Como são materiais distintos, não é possível soldá-los. A ACAP (2001) sugere que seja instalada uma “bota” na região mais profunda do lisímetro de acordo com a Figura 3.16, apresentada abaixo.



**Figura 3.16** - Saída da drenagem na base do lisímetro (adaptado de ACAP, 2001).

Em função da dificuldade de união dos materiais (PEAD/PVC), fez-se uma adequação simplificada no campo com base na sugestão da ACAP (Figura 3.17).



**Figura 3.17** - Detalhe da ligação do tubo PVC com a geomembrana (PEAD).

As paredes laterais foram construídas com a mesma geomembrana PEAD utilizada na construção dos lisímetros e foram ancoradas à superfície da camada do solo de fundação (Figura 3.18).



**Figura 3.18** - Instalação da geomembrana nos lisímetros e nas paredes laterais (notar profundidade dos lisímetros - parede lateral).

### **3.5.4 – Lançamento dos Solos das Coberturas**

Após a preparação da fundação descrita no item 3.5.2, e construção dos lisímetros (item 3.5.3), iniciou-se o lançamento dos solos de cada cobertura.

#### **3.5.4.1 – Solo Coesivo da Cobertura 1 (argila)**

Foi lançado, de acordo com as normas tradicionais da engenharia de obras de terra, o solo argiloso garantindo ao aterro um grau de compactação maior ou igual a 95% e teor de umidade de mais ou menos 2% com relação à umidade ótima. A espessura de cada camada foi de 25 cm com tolerância de  $\pm 5$  cm (Figura 3.19). A condutividade hidráulica saturada esperada para o material compactado nestas condições é menor que  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, dado este comprovado pela realização dos ensaios de laboratório apresentados no item 4.1 e através dos resultados de ensaios já

executados anteriormente realizados pela RPM. Este material está presente no experimento 1 e a espessura projetada para a camada final foi de 50 cm. O grau de compactação de cada camada foi comprovado através do método do cilindro biselado em dois pontos aleatórios na superfície da camada (Figura 3.20). A espessura das camadas foi controlada pela introdução de pontaletes de madeira no solo. Apesar de não ter sido possível realizar controle preciso da espessura, levantamentos topográficos realizados ao final de cada lançamento indicavam pequeno desvio com relação ao projetado.



**Figura 3.19** - Lançamento e compactação da argila.





**Figura 3.20** - Realização de ensaio para a determinação da densidade *in situ* com cilindro biselado.

#### **3.5.4.2 – Barreira Capilar (Cascalho) da Cobertura 2**

O material grosseiro (cascalho) foi lançado e espalhado sem a necessidade de compactação suplementar àquela empregada pelo próprio tráfego dos equipamentos. Esta camada está presente no experimento 2 e sua espessura foi projetada em 50 cm. Foram realizados dois ensaios de compactação relativa do material, bem como a determinação da umidade na camada final, (Figura 3.21).

Em verificação posterior ao lançamento do cascalho pode se comprovar que a espessura média da camada era de aproximadamente 50 cm.



**Figura 3.21** - Lançamento da camada de cascalho – barreira capilar.

#### **3.5.4.3 – Interface entre o Cascalho e o Solo Siltoso**

No experimento 2, onde existe a camada de cascalho sobreposta pela camada de silte, atentou-se para o fato de que a interface entre os dois materiais precisaria ser preservada, segundo orientações da EPA (2001), para garantir o funcionamento da barreira capilar. O lançamento e compactação da primeira camada de solo siltoso foram realizados de forma cuidadosa, no sentido de não haver mistura dos dois solos.

#### **3.5.4.4 – Solo Siltoso das Coberturas 1 e 2**

Segundo EPA (2002), este solo lançado na cobertura alternativa não tem função de impermeabilização como o solo argiloso e, portanto é desejável que o material seja lançado e compactado no ramo seco da curva de compactação reduzindo assim o potencial de dessecação e eventuais trincas que poderiam

aparecer. Esta condição também é favorável no que diz respeito à capacidade de armazenamento de água inicial do solo, além de se tornar menos resistente à penetração das raízes das plantas. O grau de compactação sugerido para esta camada é de aproximadamente 85% do Proctor normal. No campo, entretanto, observou-se que as camadas foram compactadas uniformemente com o grau de compactação de aproximadamente 90% do Proctor Normal com o tráfego da carregadeira sobre as camadas de espessura de 25 cm. A espessura da camada final medida em campo foi de aproximadamente 50 cm. Da mesma forma que para as demais camadas, o material passou pelo controle de densidade e umidade em cada camada com um ensaio por camada (Figura 3.22).



**Figura 3.22** - Solo siltoso lançado e início do lançamento do solo orgânico.

#### **3.5.4.5 – Solo Orgânico das Coberturas 1 e 2**

A camada de solo orgânico, superficial ou “top soil”, com espessura aproximada de 15 cm, tem como objetivo servir de substrato para a vegetação e permitir a infiltração da água. Foi utilizado um solo orgânico retirado de uma área de

decapeamento da mina que, apesar de ser lançado com compactação mínima, ao ser ensaiado em dois pontos no campo, mediu-se um grau de compactação de, aproximadamente, 90%.

### **3.5.5 – Instalação das Bermas do Sistema de Coleta das Águas Superficiais**

Para que fosse possível coletar e conduzir somente as águas superficiais que caem sobre a cobertura sem que as mesmas se espalhem por outras áreas ou recebam contribuições de fora, projetaram-se bermas na superfície da cobertura, conforme mostrado nas Figuras 3.8 a 3.10. As bermas foram compactadas com equipamento de terraplanagem e construídas nas dimensões indicadas no projeto. As águas de chuva que incidem sobre a cobertura são impedidas de sair do sistema pelas bermas e são conduzidas por gravidade para um sistema de coleta e, são posteriormente medidas, conforme será apresentado a seguir.

### **3.5.6 – Instalação do Sistema de Coleta e Medida do Escoamento Superficial**

Neste trabalho existe o interesse em quantificar diariamente as águas que escoam pela superfície dos experimentos.

Uma vez implantada a superfície da cobertura, com as declividades indicadas no projeto, esta conduziu, por gravidade, as águas pluviais para o interior da caixa de coleta conforme mostrado nas Figuras 3.6 e 3.23. A caixa coletora tem a função de receber as águas pluviais com finos e os mesmos serão retidos na primeira célula. A água percola pelo geotêxtil adentrando a caixa de carga relativamente limpa. Daí é conduzida por um tubo PVC de 50 mm à caixa de passagem 1 que, por sua vez, está conectada à caixa de passagem 2, por meio de um hidrômetro, que tem a função de medir o volume desta água. Na caixa de passagem 2 foi instalado um registro que permite, ao final do processo, que as águas sejam drenadas para o ambiente.

A caixa de contenção de sedimentos, bem como a caixa de carga, foram construídas em alvenaria com blocos de concreto grauteados. A ligação entre as

caixas é feita por meio de uma tela metálica fixa (chumbada) à alvenaria, que suporta o geotêxtil responsável em “filtrar” a água escoada superficialmente (Figuras 3.24 e 3.25).

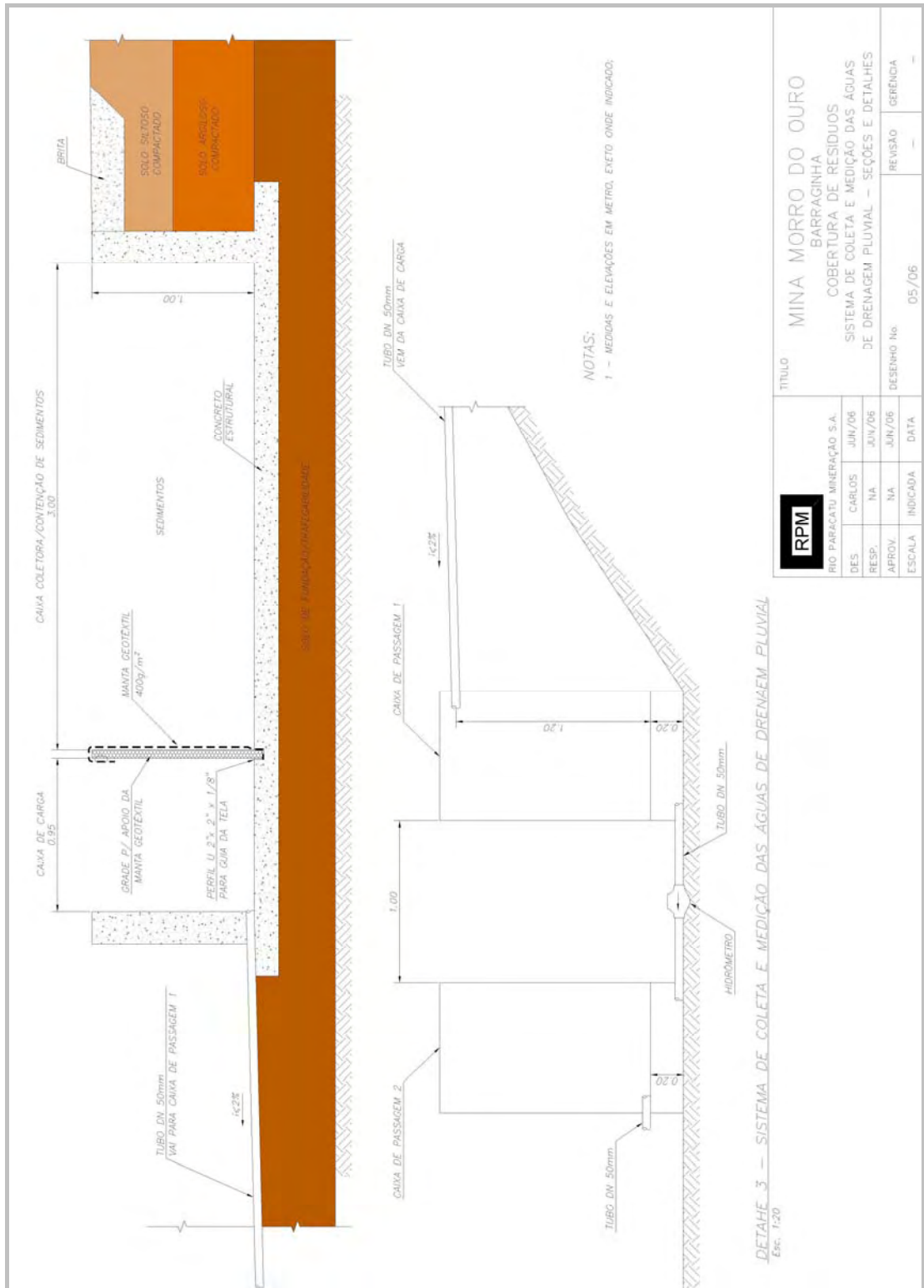


Figura 3.23 - Sistema de coleta e medida das águas pluviais.



**Figura 3.24** - Caixa coletora de água/contenção de sedimentos sem cobertura.



**Figura 3.25** - Caixa coletora da drenagem superficial em operação (notar entrada da caixa).

### **3.5.7 – Instrumentação**

#### **3.5.7.1 – Introdução**

Como apresentado por EPA (2002), o monitoramento das coberturas é necessário para confirmar seu desempenho, e atender as exigências locais. Entretanto, a geração de dados de monitoramento que refletem o desempenho de projetos de geotecnologia, tais como sistemas de coberturas, é bastante complicado em função de uma série de fatores:

- Longo período de estudos;
- Incompleto conhecimento do fenômeno e dos diversos parâmetros utilizados na modelagem, revisão periódica do modelo e necessidade da melhoria dos planos de monitoramento;
- As quantidades medidas ou as mudanças das características físicas dos materiais das coberturas são muito pequenas;
- Dificuldade em medir os parâmetros de interesse, fazendo com que os mesmos sejam obtidos de forma indireta como, por exemplo, a umidade do solo dentro do perfil da cobertura.

Nos EUA, aterros de resíduos exigem um sistema de monitoramento após seu fechamento garantindo assim a eficiência do descomissionamento após a operação. O monitoramento por um período de 30 anos exigido pela regulamentação da RCRA tem sido considerado pela EPA como o tempo mínimo de monitoramento do desempenho e manutenção do sistema, entretanto, a EPA tem autoridade para designar um período maior se houver riscos à proteção da saúde humana ou ao meio ambiente.

Segundo a EPA (2002), recomenda-se que se faça o monitoramento através de lisímetros ou do controle da umidade para sistemas de coberturas.

Antes da implantação do programa de monitoramento em uma cobertura é importante estabelecer os critérios para a aceitação do desempenho da mesma. Estes critérios são tipicamente apresentados para cada projeto e podem considerar as características dos resíduos, o risco à saúde humana ou ao meio ambiente, as



propriedades dos componentes do sistema de cobertura, as características hidrogeológicas do local e outros fatores.

### **3.5.7.2 – Monitoramento da Infiltração**

No caso do presente trabalho, este monitoramento foi realizado pelos lisímetros e se limitou a quantificar o volume de água que atravessa a cobertura. Este assunto já foi apresentado e discutido em itens anteriores.

EPA (2002) descreve que quanto maiores forem os lisímetros mais representativos serão os resultados do desempenho da cobertura. Para isto, seria necessária a construção de lisímetros com pelo menos 1 a 2 m de diâmetro. No caso, utilizaram-se de lisímetros retangulares de aproximadamente 10 x 12 m.

### **3.5.7.3 – Monitoramento do Perfil de Umidade do Solo**

Para medir a umidade no campo são freqüentemente utilizados sondas de nêutron, refletômetros de domínio de tempo (TDR) e refletômetros de domínio de freqüência (FDR). A partir de uma calibração cuidadosa, a medida da umidade pode ser convertida em potencial de sucção e vice-versa, utilizando-se para tanto as curvas de retenção de água dos materiais obtidas em laboratório.

Optou-se em utilizar o TDR, apresentado na Figura 3.26, para a medida da umidade do solo, cujas características estão apresentadas a seguir.

A técnica do TDR consiste em medir o tempo que um pulso eletromagnético leva para caminhar por hastes de comprimento conhecido. Esse tempo relaciona-se com a constante dielétrica do meio no qual as hastes estão inseridas. A constante dielétrica dos solos depende da quantidade de sólidos, água e ar. A constante dielétrica da água é, aproximadamente, 80, enquanto que a dos grãos do solo varia de 4 a 8, e do ar é igual a 1.

Assim, quanto maior for a umidade do solo, maior será sua constante dielétrica e menor será a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas nas hastes. Portanto, o teor de umidade do solo em volta do TDR poderá ser determinado por meio de uma correlação entre tempo de propagação ao longo do medidor e o teor de

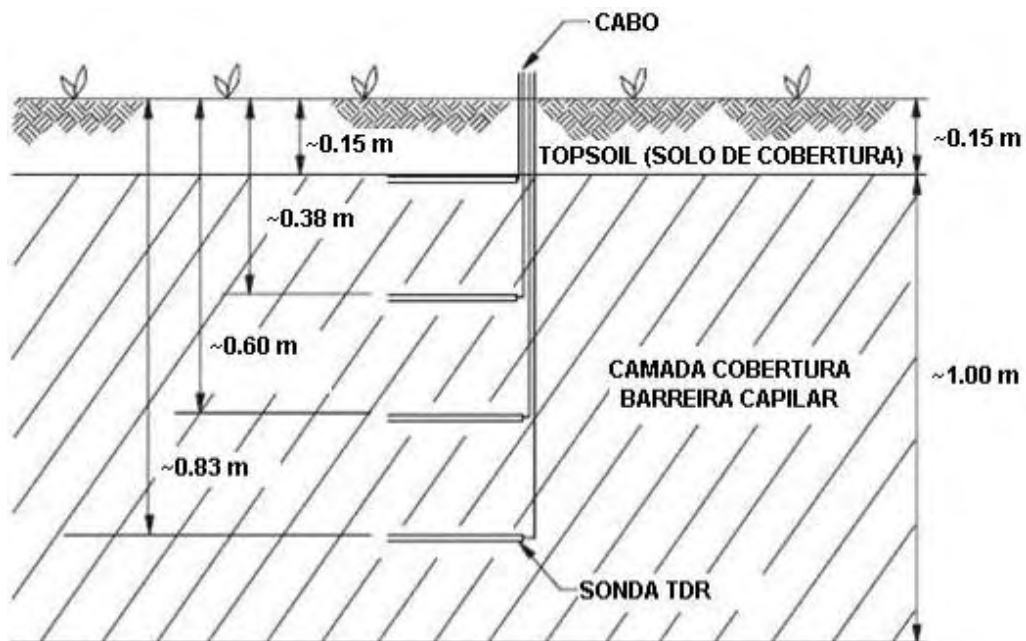
umidade do solo. Apesar de existirem calibrações genéricas (Topp et al. 1980), os TDRs devem ser calibrados de acordo com as condições locais do solo (Marinho et al. 2005).



**Figura 3.26** - Instrumento para medir umidade em campo - TDR (EPA, 2002).

A precisão do TDR para medida da umidade é relativamente boa para muitos tipos de solos e a principal desvantagem é o fato da precisão diminuir com o aumento do comprimento do cabo entre o medidor e o cabo de teste. Recomenda-se um comprimento máximo de 60 m. Além disto, solos com elevados teores de umidade e com elevada condutividade elétrica rapidamente atenuam o pulso elétrico antes que o mesmo seja refletido. Se a atenuação for muito grande não haverá retorno do sinal e o medidor não poderá ser usado. Entretanto, existem equipamentos que podem ser acoplados para reduzir a atenuação do sinal.

Estes equipamentos podem ser instalados durante ou após a construção. Eles podem ser instalados em qualquer direção, entretanto quando forem instalados após a construção da cobertura eles usualmente são inseridos horizontalmente e devem ser tomados cuidados para minimizar as perturbações em torno do equipamento para que o mesmo se acople bem ao solo (Figura 3.27). Existem casos em que houve entrada de água entre o equipamento e o solo durante a instalação causando curto-circuito no sistema durante períodos de chuvas fortes, o que impossibilitou o aproveitamento das leituras realizadas pelo equipamento. A última versão deste equipamento, igual ao que foi utilizado neste trabalho, não requer a utilização do cabo teste ou da unidade do TDR e conecta o equipamento diretamente ao “data logger”. Este equipamento consiste em duas hastes de aço inox conectado a um circuito periférico. Um cabo condutor com quatro fios é conectado ao circuito periférico para suprimento de energia, ativação do equipamento e monitoramento do pulso de saída. O circuito periférico se instala em um bloco de epóxi.



**Figura 3.27** - Instalação do TDR (EPA, 2002).

Neste trabalho utilizaram-se os instrumentos CS616, produzidos pela Campbell Scientific, Inc.

Segundo o fabricante, o equipamento consiste em duas barras de aço inox, com 30 cm de comprimento, conectadas a um circuito.

O refletômetro se conecta diretamente ao “datalogger” onde são programados os tempos em que as medidas devem ser realizadas (Figura 3.28).



**Figura 3.28** - TDR utilizado nos experimentos e datalogger, Campbell Scientific, Inc.

#### 3.5.7.3.1 – Calibração dos TDRs

Antes da utilização dos equipamentos no campo, todos os oito TDRs receberam um número de identificação e foram calibrados. Os equipamentos foram introduzidos em amostras indeformadas do mesmo solo em que eles seriam acoplados no campo.

O procedimento de calibração pode ser descrito da seguinte forma:

- Retirada das amostras indeformadas de todos os materiais no campo, conforme pode ser visto na Figura 3.29.



**Figura 3.29** - Escavação de poços na cobertura e retirada de amostras indeformadas.

- Saturação das amostras imergindo-as em tanques cheios de água por um período suficiente para que a água que infiltra na pela base da amostra chegasse ao topo (Figura 3.30);
- Identificação das amostras e instalação dos instrumentos específicos em cada uma delas;
- Determinação da umidade da amostra de solo e leitura do instrumento;
- Obtenção dos demais pontos de calibração através da secagem das amostras em estufa com a medida de umidade da amostra e leitura do instrumento (Figura 3.31).



**Figura 3.30** - Saturação das amostras para calibração dos equipamentos.



**Figura 3.31** - Amostras indeformadas com os TDRs e cabos, dentro da estufa.

### 3.5.7.4 – Monitoramento da Sucção no Solo

Foram utilizados Sensores de Dissipação de Calor (HDU) também chamados de sensores termais (TC) ou de sensores de potencial de sucção, em que existe uma relação entre a dissipação de calor da matriz cerâmica em contato com o solo e o potencial de sucção do solo. Estes sensores também têm uma longa história nos estudos agrícolas. O sensor (Figura 3.32) consiste em um aquecedor e um sensor de temperatura ambos inseridos numa matriz cerâmica. A corrente é aplicada no aquecedor e a temperatura do sensor é medida em certos intervalos de tempo, tipicamente de 1 a 20 segundos após o início do calor. A mudança de temperatura, isto é, a dissipação do calor, é controlada pelo teor de umidade na matriz cerâmica, que está inserida no solo, uma vez que a água conduz calor muito mais rapidamente que o ar. O aumento da temperatura medida representa o calor que não é dissipado. Assim, quanto maior a temperatura medida menor será a umidade (não houve dissipação do calor uma vez que o meio está mais seco e, portanto, menos condutor). Estes valores de variação de temperatura quando levados ao gráfico de calibração, fornecem os valores de sucção desejada. Estes sensores têm sido utilizados para monitorar a sucção potencial em sistemas de coberturas em muitos locais.



**Figura 3.32** - Unidade de dissipação de calor (EPA, 2002).

#### **3.5.7.4.1 – Calibração dos HDUs**

Da mesma forma que para os TDRs, estes equipamentos precisaram ser calibrados com o solo específico com o qual vão estar em contato. Para tanto foi necessário inserir o HDU em uma amostra de solo indeformada (o mesmo solo com o qual este equipamento estará em contato no campo) e aplicar uma sucção conhecida através, por exemplo, da técnica do Extrator de Richards. Após a estabilização das tensões no interior da amostra, faz-se a leitura do HDU e a correlaciona com a sucção conhecida aplicada.

Este procedimento não foi possível de ser realizado em função da logística (experimento em Paracatu, extrator de Richards em Viçosa, pessoal responsável pelos instrumentos em São Paulo), dos custos envolvidos e dos prazos de execução.

Como não houve calibração, não foi possível obter as sucções correspondentes ao perfil do solo.

#### **3.5.7.5 – Instalação dos Instrumentos**

Nos experimentos relativos a este trabalho, os TDRs e os HDUs foram instalados em quatro nichos, como mostrado no esquema apresentado na Figura 3.33, sendo que para o solo superficial só foram instalados os TDRs.

Os instrumentos foram instalados após a construção de todas as camadas da cobertura, no mesmo poço em que foram retiradas as amostras indeformadas, introduzindo os equipamentos horizontalmente no perfil dos solos e em pares (TDR e HDU) próximo ao contato entre as camadas. Ao posicioná-los assim, objetivou-se facilitar a comparação entre os dados obtidos nos instrumentos adjacentes buscando um melhor entendimento do comportamento da umidade e sucção no perfil do solo.

Os HDUs foram imersos em água antes da sua instalação e o solo em volta deles estava úmido o bastante para garantir um contato hidráulico entre o sensor e o solo. Os fios foram conduzidos manualmente para um ponto do lado de fora da seção teste e conectados ao “data logger”.

As Figuras 3.34 a 3.37 ilustram todo o processo de instalação dos instrumentos, enquanto nas Figuras 3.38 e 3.39 apresentam-se uma visão geral do experimento após a instalação dos instrumentos.



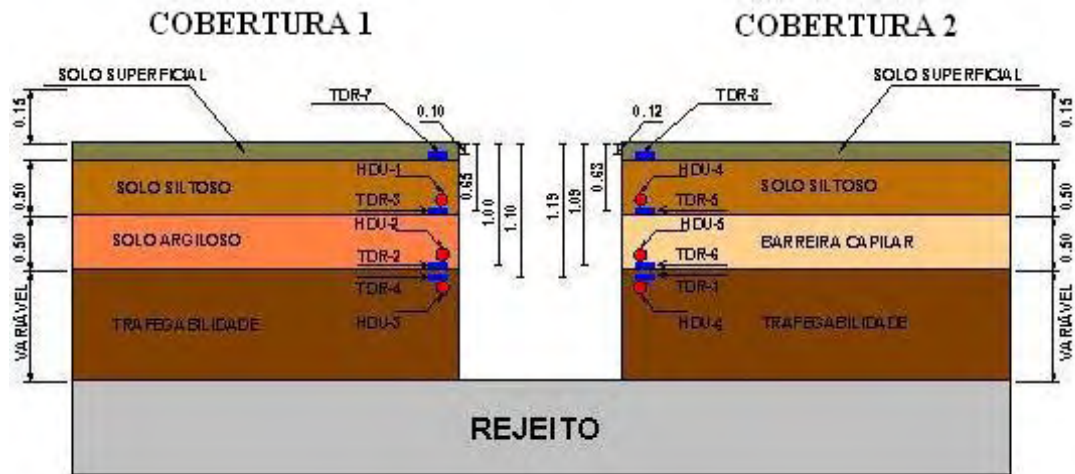
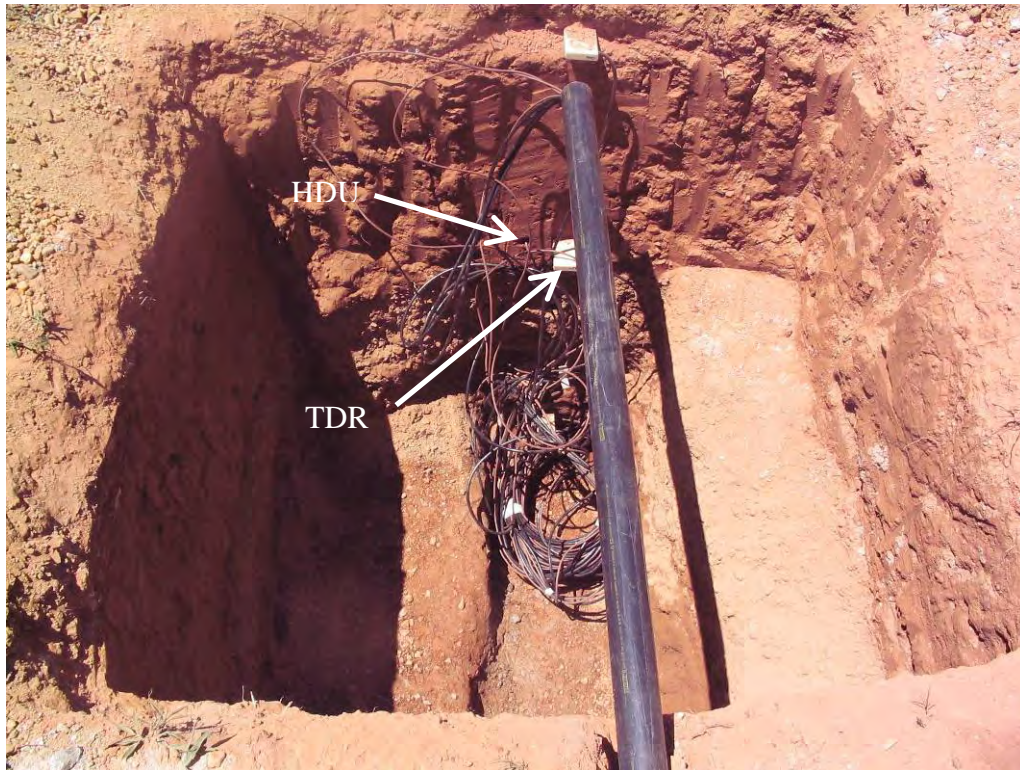


Figura 3.33 - Esquema de instalação do monitoramento (TDR/HDU).



Figura 3.34 - Instalação dos equipamentos na parede do poço, no solo de cobertura.



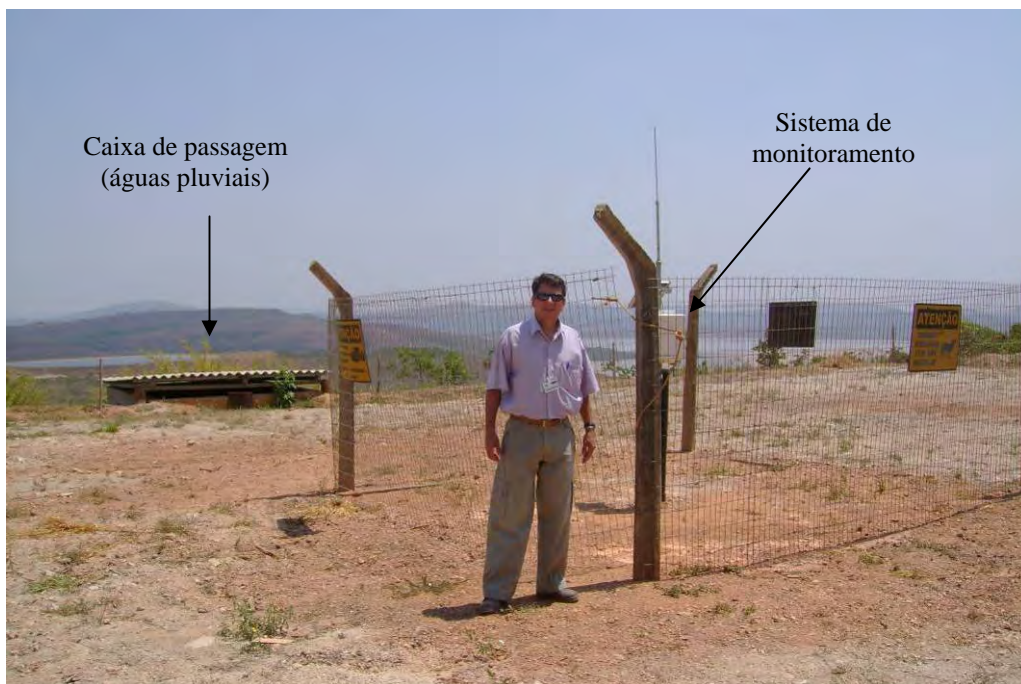
**Figura 3.35** - TDRs e HDUs instalados em diferentes profundidades e solos.



**Figura 3.36** - Instalação da caixa de controle e painel solar.



**Figura 3.37** - Caixa de controle onde são realizadas as leituras dos TDRs.



**Figura 3.38** - Visão geral da cobertura (Notar o sistema de monitoramento protegido com cerca. Ao fundo, caixa de passagem das águas pluviais coberta com telha).



**Figura 3.39** - Vista dos experimentos já com a instrumentação instalada.

### 3.5.8 – Vegetação

Como existem alguns aterros já vegetados na região da mina com uma mistura de espécies vegetais que suportam as condições tanto climáticas quanto geoquímicas do local, optou-se por utilizar estas mesmas espécies vegetais para o experimento em questão.

Foi realizada uma mistura de sementes conforme descrito na Tabela 3.2, que foi lançada sobre toda a cobertura.

**Tabela 3.2** – Espécies e densidade de sementes utilizada para compor a cobertura vegetal do experimento.

Espécie	Semeadura (g/m <sup>2</sup> )
Crotalária ( <i>Crotalaria spectabilis</i> )	5
Capim gordura ( <i>Melinis minutiflora</i> )	10
Nabo ( <i>Raphanus sativus</i> )	5
Aveia Preta ( <i>Avena stringosa</i> )	10
Stylosantes	2,5
Feijão Guandu ( <i>Cajanus indicus</i> )	5

### 3.6 – Ensaio Especiais de Laboratório

#### 3.6.1 – Determinação da Curva de Retenção de Água

Foram empregados dois métodos para a obtenção das curvas de retenção de água dos solos. O método do papel filtro foi usado nos solos do sistema de cobertura, inclusive o solo de fundação (trafegabilidade), com exceção do solo da camada de barreira capilar, para o qual se utilizou o método do extrator de Richards.

##### 3.6.1.1. – Método do Papel Filtro

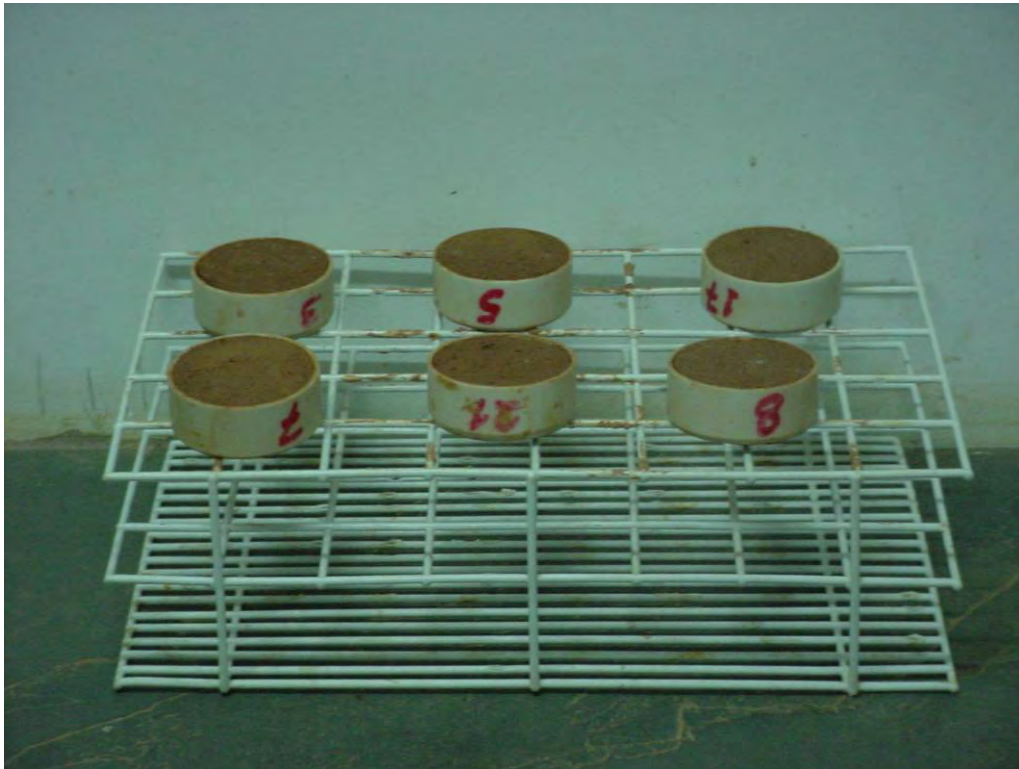
Para as curvas determinadas pela técnica do papel filtro, utilizou-se o papel filtro Whatman nº. 42, procedendo-se da seguinte maneira:

- Primeiramente foram coletadas amostras indeformadas dos solos em cilindros de PVC, com aproximadamente 30 cm de diâmetro e 45 cm altura. Na Figura 3.40 apresentam-se detalhes da coleta do solo.



**Figura 3.40** - Amostras de solo para realização dos ensaios de laboratório.

- A partir destas amostras, moldaram-se vários corpos de prova cilíndricos, em anéis de PVC. No caso do solo superficial, como a amostra indeformada apresentava-se com bastante pedregulho, destorroou-se a amostra e compactou-se no mesmo peso específico e umidade de campo.
- Após a moldagem, todos os corpos de prova foram umedecidos, através de um borrifador, até atingir um grau de saturação próximo a 100%, para que fosse seguida a mesma trajetória hídrica, ou seja, trajetória de secagem.
- Posteriormente os corpos de prova foram colocados para secar ao ar, como apresentado na Figura 3.41, sendo recolhidos em tempos diferentes à medida que estes alcançavam o grau de saturação desejado (90 a 5%).

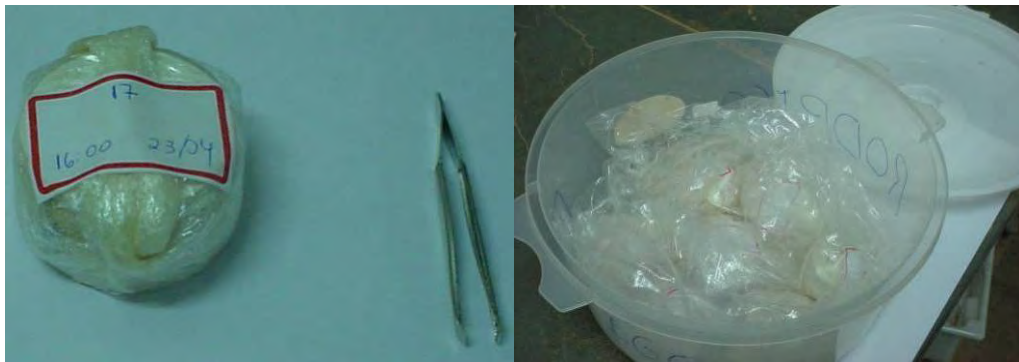


**Figura 3.41** - Amostra secando ao ar até atingir a saturação desejada.

- Atendida a saturação desejada, colocavam-se, então, dois papéis filtro, um na face superior e outro na inferior de cada corpo de prova, e este conjunto era imediatamente envolto em filme plástico, devidamente identificado e levado à câmara úmida em uma vasilha plástica, onde permanecia por 7 dias. (Figuras 3.42 e 3.43).



**Figura 3.42** - Detalhe da colocação do papel filtro no corpo de prova e posterior embalagem com papel filme.



**Figura 3.43** - Corpo de prova devidamente embalado e etiquetado, posteriormente colocado na embalagem plástica e levado para câmara úmida.

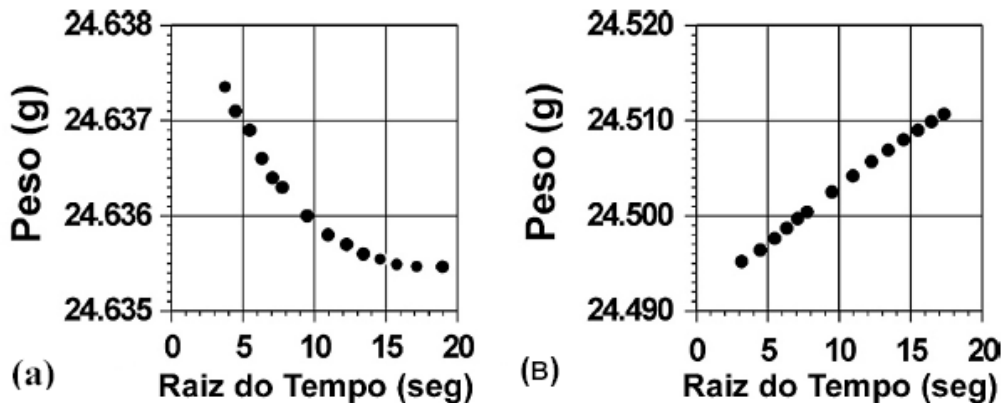
- Após o período de 7 dias, os corpos de prova eram abertos, retiravam-se os papéis filtro com auxílio de uma pinça, não devendo ficar exposto ao ar por mais que 5 segundos, e pesado em balança analítica com precisão de 0,0005g. A partir daí, começava-se a monitorar a perda de umidade do papel por uns cinco minutos, com leituras durante o primeiro minuto de 10 em 10 segundos, depois de 30 em 30 segundos, conforme sugerido por Villar (2002). Com estes dados, se montava um gráfico (Figura 3.44) de variação do peso versus a raiz do tempo e assim era possível fazer uma extrapolação para o tempo  $t$  igual a zero. Em seguida, o papel filtro úmido era colocado na estufa a uma temperatura de 105°C, por um período mínimo de 2 horas, e novamente pesado para obtenção do seu peso seco, sendo que o ganho de umidade também era monitorado para se conseguir o valor no tempo  $t = 0$ . Conhecida a umidade do papel filtro,

utilizaram-se curvas de calibração para determinação do valor da sucção do corpo de prova. No presente trabalho não foi realizado o ensaio de calibração do papel filtro, tendo-se utilizado as curvas de calibração de Chandler et al. (1992), dadas pelas equações 3.1 e 3.2:

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4.842 - 0.0622w)}, \text{ para umidades do papel filtro } \leq 47\%. \quad (3.1)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6.050 - 2.48 \cdot \log w)}, \text{ para umidades do papel filtro } > 47\%. \quad (3.2)$$

em que  $w$  é o teor de umidade do papel filtro.



**Figura 3.44** - Curvas de acompanhamento da variação do peso do papel filtro: (a) após retirar o papel filtro em contato com o solo (Perda de Umidade) e (b) após retirar da estufa (ganho de umidade), (Villar, 2002).

- Os diferentes pontos da curva de retenção de água foram determinados, repetindo-se esse procedimento com corpos de prova bastante umedecidos ( $S_r \approx 100\%$ ) depois expostos ao ar durante diferentes intervalos de tempo (horas, dias).

### 3.6.1.2. – Método do Extrator de Richards

O método consiste em determinar a umidade gravimétrica do solo em função da sucção aplicada. No aparelho Extrator de Richards, as amostras de solo saturadas são colocadas em placas de cerâmica ou membrana previamente saturadas e submetidas a uma determinada pressão, até atingir a drenagem máxima de água



contida nos seus poros, correspondente à tensão (sucção) aplicada. Determina-se então a umidade da amostra. A seguir apresenta-se o procedimento do ensaio realizado para o cascalho:

- Utilizaram-se cinco placas de cerâmica referentes a 0.1, 0.5, 1, 5 e 15 bars para as tensões aplicadas de 10, 30, 100, 500 e 1500 kPa, respectivamente.
- Distribuiu-se os anéis de borracha de 5 cm de diâmetro e 1 cm de altura na placas porosas e em seguida derramou-se no interior destes cerca de 25 a 30 g de solo (cascalho), sem compactá-lo.
- Adicionou-se água na placa de cerâmica, até que o nível deste ficasse bem próximo da borda do anel de borracha, como pode ser visto na Figura 3.45, deixando as amostras nestas condições, até completa saturação, geralmente durante uma noite.



**Figura 3.45** - Placa de cerâmica e amostras do solo em processo de saturação durante aproximadamente 12 horas.

- Após a saturação, inclinou-se levemente a placa, a fim de eliminar o excesso de água, colocando-a em seguida no aparelho Extrator de Richards. Apertaram-se

bem os parafusos, iniciando o ensaio com a aplicação da pressão desejada. (Figura 3.46).

- Para cada ponto da curva de retenção de água (Umidade, Sucção), utilizou-se um Extrator de Richards, com uma placa de cerâmica especificada anteriormente. A Figura 3.47 ilustra os aparelhos utilizados nos ensaios.



**Figura 3.46** - Detalhe do aparelho Extrator de Richards.



**Figura 3.47** - Visão geral do ensaio sendo realizado.

- As amostras foram ensaiadas num período mínimo de 3 dias ou mais caso se observasse drenagem proveniente das amostras.
- Após esse período, separou-se uma quantidade de cápsulas de alumínio numeradas e de peso conhecido, igual ao número de amostras, descarregou-se a pressão, retiraram-se as placas e transferiram-se as amostras imediatamente para as cápsulas, com auxílio de uma espátula de aço inoxidável. Após a pesagem, as amostras foram levadas para a estufa e determinou-se a umidade gravimétrica.

No presente trabalho, procurou-se trabalhar com umidade volumétrica em função da sucção aplicada para traçar a curva de retenção do solo. Em função disso, para o solo barreira capilar (cascalho), a umidade gravimétrica obtida no ensaio do Extrator de Richards foi transformada em umidade volumétrica segundo a equação 3.3:

$$\theta = \frac{\gamma_D}{\gamma_w} \times w \quad (3.3)$$

onde,

$\theta$  é a umidade volumétrica (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);

$w$  é a umidade gravimétrica (kg/kg)

$\gamma_D$  é a massa específica seca do solo;

$\gamma_w$  é a massa específica da água.

### 3.6.2 – Ajuste da Curva de Retenção

Depois de obtidos os pontos da curva de retenção pelos métodos acima citados, realizaram-se os ajustes dos pontos experimentais pela equação de Fredlund and Xing (1994) (equações 3.4 e 3.5), para cada solo utilizado no sistema de cobertura.

$$\theta(\psi) = \theta_s \cdot C(\psi) \cdot \left[ \frac{1}{\ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (3.4)$$

$$C(\psi) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right] \quad (3.5)$$

em que,  $\theta_s$  é o conteúdo de umidade volumétrica correspondente ao grau de saturação de 100%,  $C(\psi)$  é uma função de correção que considera o limite superior de sucção, e  $\psi_r$  é o valor de sucção correspondente ao conteúdo de umidade volumétrica residual,  $\theta_r$ .

Os parâmetros “n”, “m” e “a” são parâmetros de ajuste, e foram obtidos com o auxílio do programa Excel.

### 3.6.3 – Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada

Foram realizados ensaios de condutividade hidráulica na condição saturada para todas as amostras. Para o solo referente à camada de barreira capilar, o ensaio realizado foi o de carga constante e para os demais solos realizou-se o ensaio de carga variável.

## 3.7 – Análise Numérica

O modelo numérico foi desenvolvido utilizando o software VADOSE/W do pacote Geo Slope, 2002. O VADOSE/W é um programa bi-dimensional que usa a solução de Darcy e Fick's para simular o transporte de água, calor e solutos através de uma variedade de meios saturados. É um programa de elementos finitos que utiliza o método de Penman-Wilson para calcular a evaporação real (AE) na superfície do solo de cobertura de forma que AE é calculada variando a função do

potencial de evaporação em função da poro pressão e temperatura. Ao se juntar as equações de transporte do calor e massa com fluxo de vapor no VADOSE/W, é possível calcular a evaporação através do método de Penman-Wilson utilizando os parâmetros da superfície do solo.

O VADOSE/W considera a precipitação, evaporação, acumulação de neve/gelo/escoamento superficial, percolação de água, congelamento e degelo, fluxo de vapor e transpiração real das plantas. Todos os parâmetros podem ser aplicados de forma semelhante atendendo às necessidades do local. As características climáticas locais foram incorporadas ao modelo.

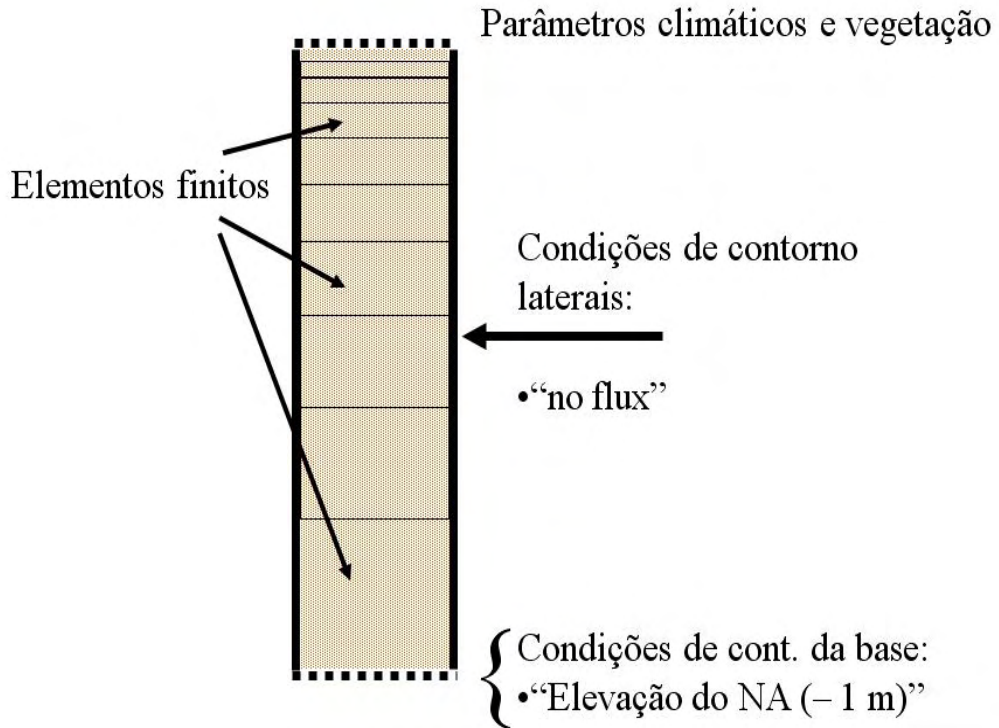
### **3.7.1 – Modelo Matemático**

Como apresentado anteriormente, foram modelados dois tipos de coberturas evapotranspirativas:

- Cobertura 1: composta por uma camada de 15 cm de top-soil que se sobrepõe a uma camada de 50 cm de material siltoso que, por sua vez, é sobreposta a uma camada de 50 cm de argila compactada (barreira hidráulica).
- Cobertura 2: composta por uma camada de 15 cm de top-soil que se sobrepõe a uma camada de 50 cm de material siltoso que, por sua vez, é sobreposta a uma camada de 50 cm de cascalho (barreira capilar).

Os dois sistemas de coberturas foram lançados sobre uma camada de fundação (trafegabilidade).

N Figura 3.48 é apresentando um “croquis” com a indicação das condições de contorno solicitadas pelo sistema.



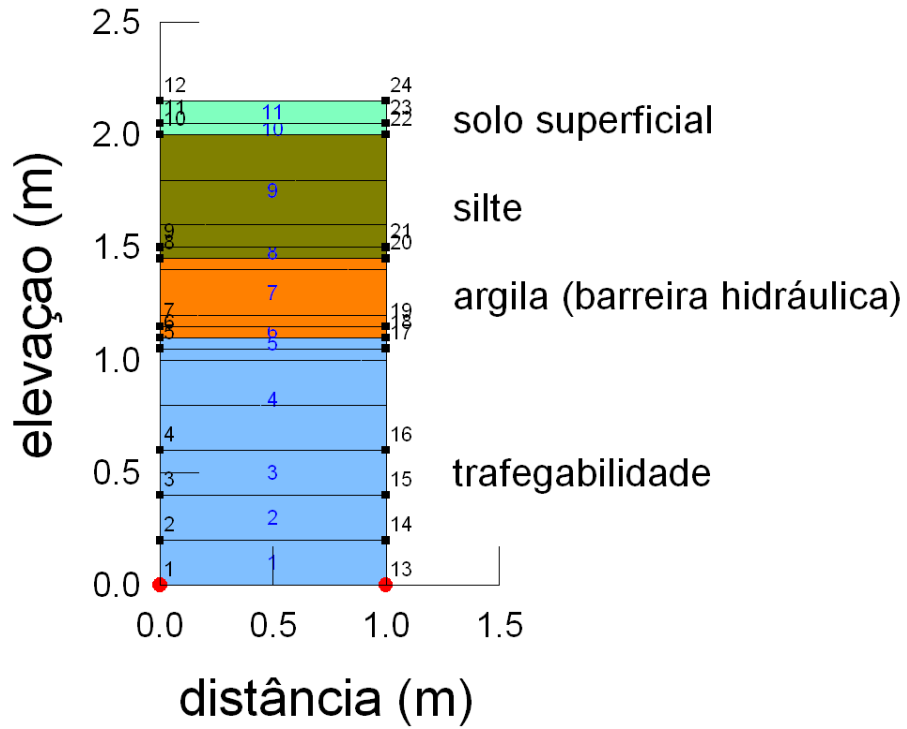
**Figura 3.48** – Croquis do modelo matemático.

Os parâmetros climáticos, a vegetação e a elevação do nível de água foram obtidos no local. Admitiu-se que o lençol freático estava posicionado a 1,0m abaixo do solo de trafegabilidade, ou seja, no interior dos rejeitos.

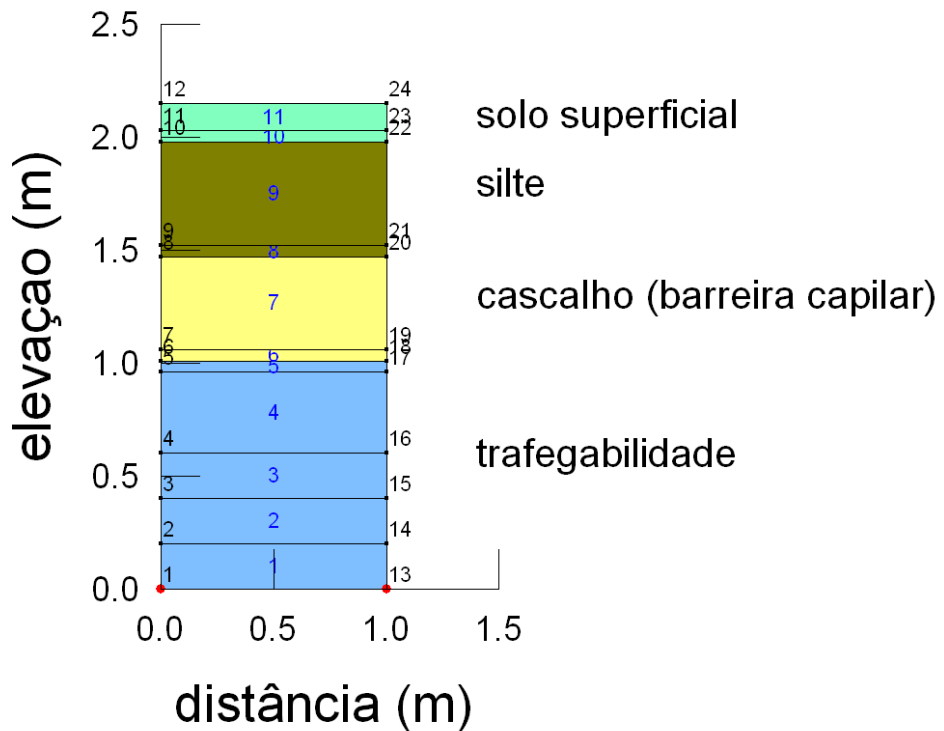
Considerou-se que o perfil encontrava-se com uma temperatura inicial de 20<sup>0</sup>C.

O tempo considerado para análise foi idêntico ao tempo de coleta de dados (Tabela 3.1) foi de um ano, compreendendo um período chuvoso.

As Figuras 3.49 e 3.50 ilustram as malhas de elementos finitos dos modelos considerando a cobertura 1 e 2, respectivamente.



**Figura 3.49** – Malha de elementos finitos da cobertura 1 gerado no VADOSE/W.



**Figura 3.50** – Malha de elementos finitos da cobertura 2 gerado no VADOSE/W.

### **3.7.2 - Parâmetros de Entrada do Modelo**

Para a realização das análises numéricas são necessários parâmetros climáticos, parâmetros geotécnicos dos solos componentes do modelo e dos parâmetros da vegetação, que estão apresentados a seguir.

#### **3.7.2.1 - Parâmetros Geotécnicos**

Para cada solo que compõe o modelo numérico foram fornecidos as curvas de retenção de água e o coeficiente de permeabilidade saturada dos materiais. Estes parâmetros, bem como os resultados de caracterização dos materiais, estão apresentados no próximo capítulo, no item 4.2.

#### **3.7.2.2 - Parâmetros Climáticos**

Os parâmetros climáticos diários usados no programa foram: precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, que são impostos no topo da cobertura. Apresentam-se, nas Figuras 3.51 a 3.55 as informações obtidas da estação metereológica situada na Rio Paracatu Mineração (RPM), no período de 15/05/2007 a 15/05/2008.



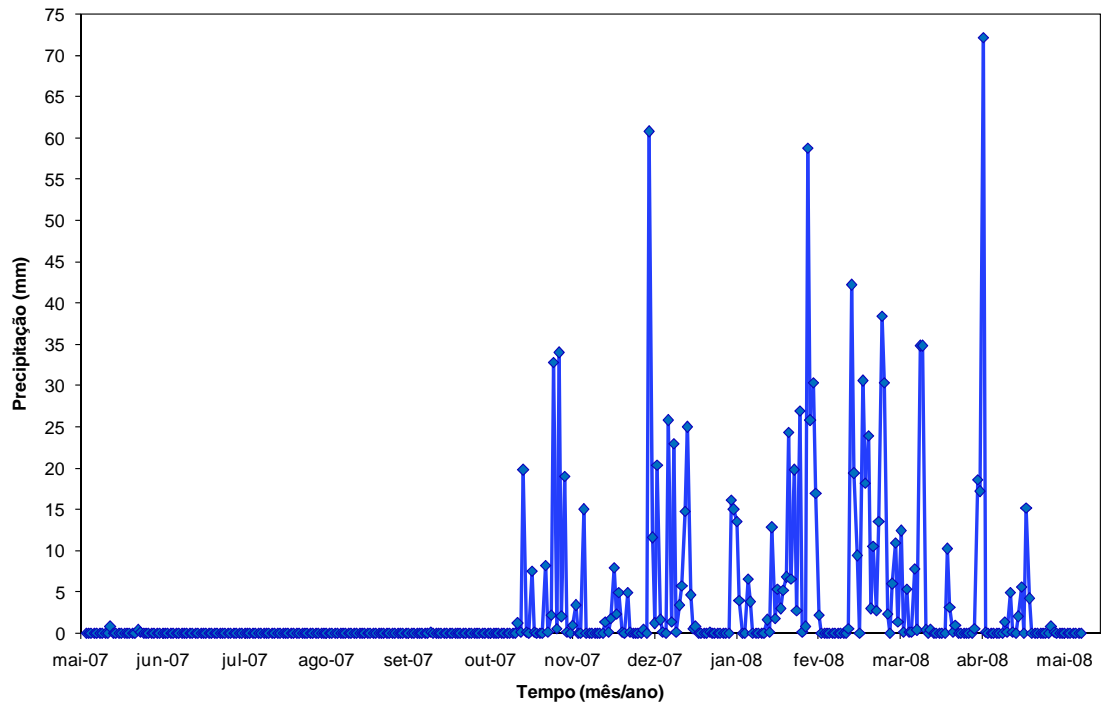


Figura 3.51 - Dados de precipitação obtidos da estação metereológica na RPM.

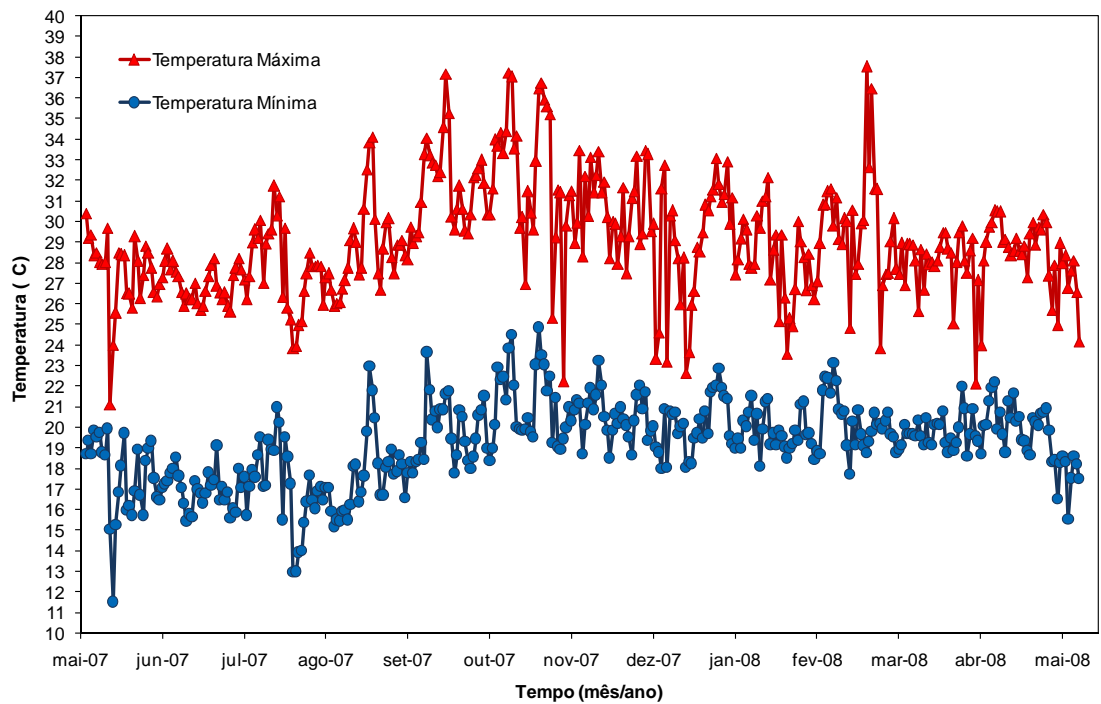
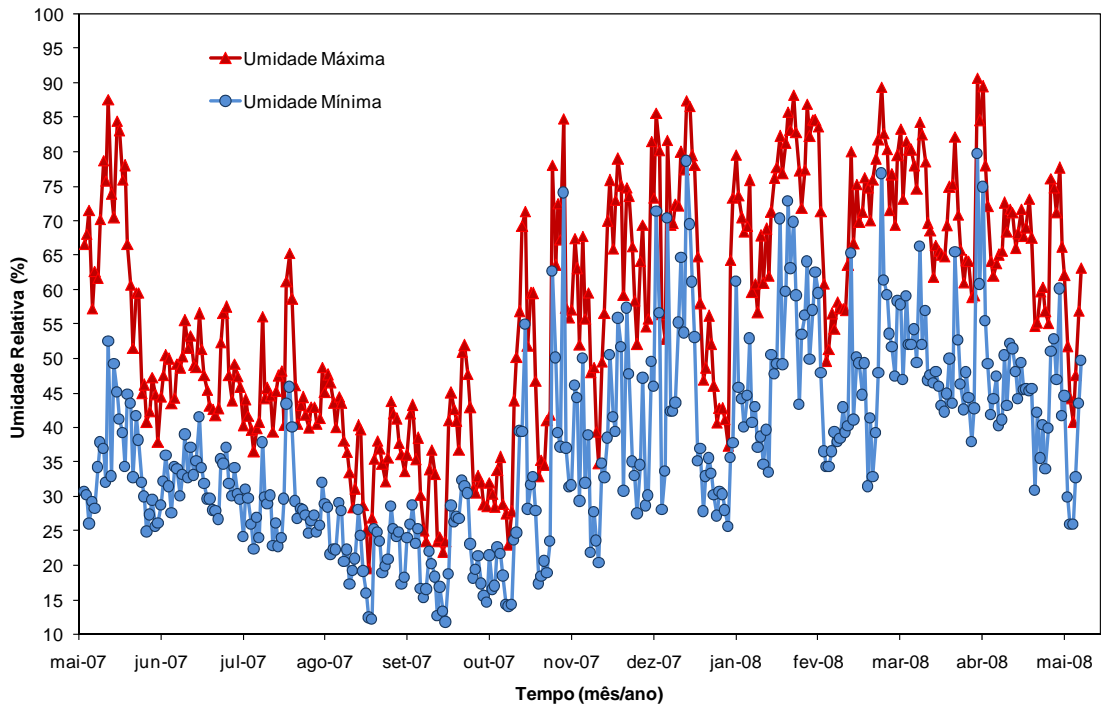
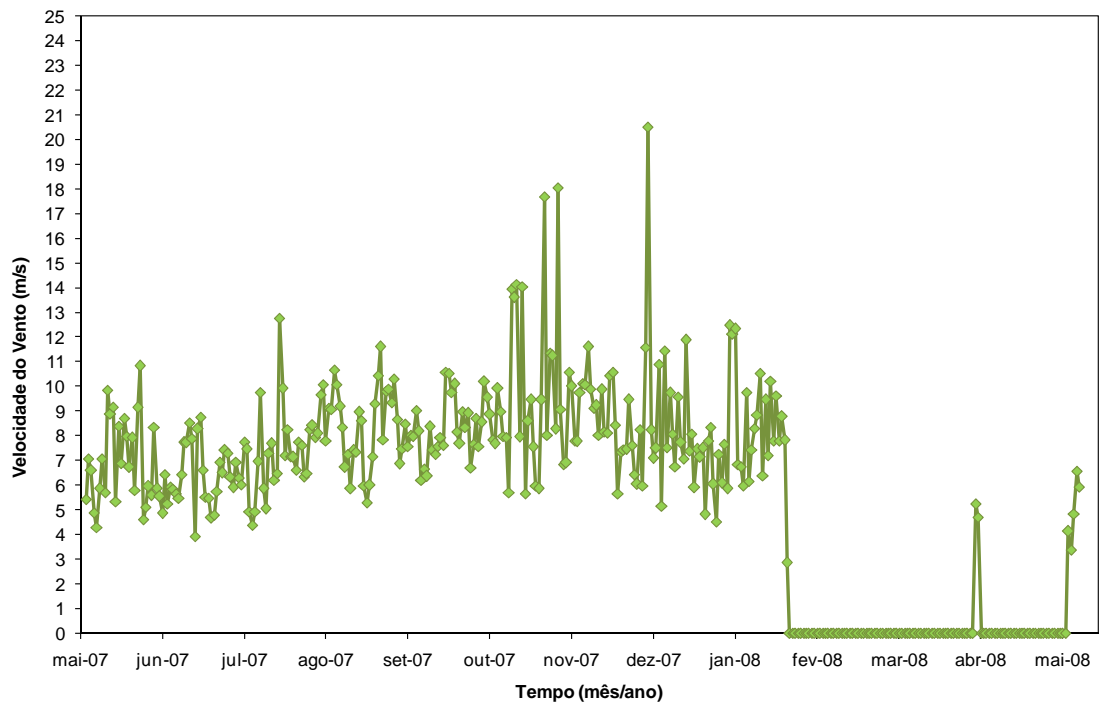


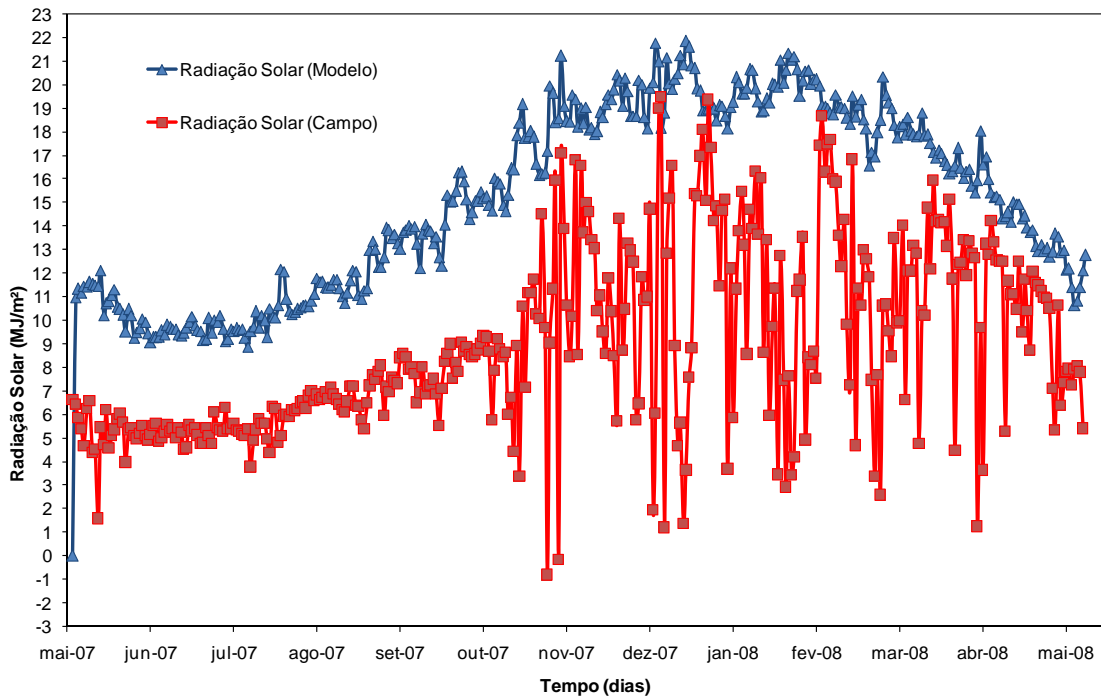
Figura 3.52 - Dados de temperatura obtidos da estação metereológica na RPM.



**Figura 3.53** - Dados de umidade relativa obtidos da estação metereológica na RPM.



**Figura 3.54** - Dados de velocidade do vento obtidos da estação metereológica na RPM.



**Figura 3.55** - Dados de radiação solar obtidos da estação metereológica na RPM.

Com relação à Figura 3.55, observa-se que a radiação solar obtida da estação metereológica apresentou variação de valores não muito coerentes, a partir de novembro de 2007. Devido a este fato, preferiu-se utilizar dados gerados pelo próprio programa, a partir da localização da cidade de Paracatu, conforme apresentado na mesma figura.

### 3.7.2.3 - Parâmetros da Vegetação

Os parâmetros de entrada da vegetação para o programa são: índice de área foliar, profundidade das raízes e as tensões que se referem ao ponto de murcha e capacidade de campo do solo superficial.

Conforme apresentado no item 3.5.8, a cobertura vegetal foi constituída a partir do semeio de sementes de um mix de espécies que, por motivos expostos acima, só começaram a germinar no mês de novembro de 2007. Assim, os parâmetros da vegetação foram estimados considerando esta especificidade local.

Os parâmetros vegetais necessários para a análise numérica são:

- Índice de Área Foliar (LAI)

Como houve problemas para o crescimento da vegetação no local, este índice foi estimado baseando-se nos dados disponíveis na biblioteca do software. Para vegetação já instalada o índice LAI era no máximo igual a 3.

Admitiu-se aqui também, por falta de outros dados mais precisos, que o LAI máximo a ser alcançado pelas espécies instaladas nos experimentos seria igual a 3 e que as espécies começaram a germinar em novembro de 2007, com LAI = 0,5. Nos meses seguintes, com o início das chuvas, este índice passou de 0,5 para 3.

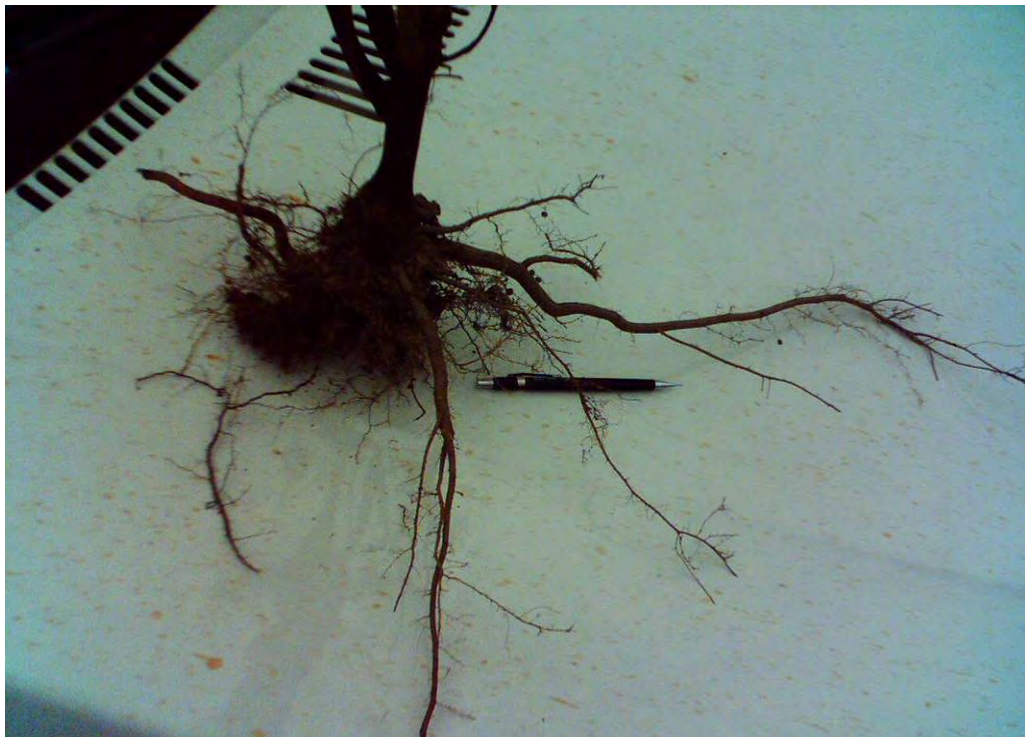
- Profundidade das Raízes

Com as mesmas considerações do item anterior, admitiu-se que até os 180 dias do início do experimento (aproximadamente 15/11/08) ainda não existia vegetação e, portanto, não haviam raízes. A partir desta data e considerando o porte e as características das espécies plantadas, considerou-se que as raízes cresceram até atingir uma profundidade de 30 cm no dia 15/03/08 (300 dias do início do experimento).

O comprimento máximo de 30 cm foi determinado a partir de medidas do comprimento das raízes das espécies utilizadas quando adultas (Figuras 3.56 e 3.57).



**Figura 3.56** - Coleta da espécie vegetal para medição das raízes.



**Figura 3.57** - Medição das raízes e obtenção do parâmetro.

- Tensões relacionadas ao Ponto de Murcha e Capacidade de Campo

As tensões consideradas para o ponto de murcha e para a capacidade de campo foram, respectivamente, -1500,0 kPa e -100 kPa, respectivamente, conforme sugerido pelo software Vadose.

## 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 – Plantio e Crescimento das Espécies

Das espécies selecionadas para o plantio, nem todas tiveram um bom desempenho. As primeiras espécies que nasceram foram a Aveia e o Nabo Forrageiro que logo produziram sementes, secaram e desapareceram do experimento. A Crotalaria e o Feijão Guandu começaram a aparecer em seguida, mas não se desenvolveram como esperado e houve pouca germinação devido ao fato do solo superficial estar parcialmente compactado. Das que conseguiram germinar boa parte foi arrancada por pássaros. A partir deste momento, o experimento foi totalmente coberto pelo Capim Gordura e Stylozante, que ainda prevalecem no local. Além das espécies plantadas apareceram várias outras que vieram junto com o solo orgânico, dentre elas, a Brachiaria e as Leucenas. Após seis meses do início do plantio, as Brachiarias foram arrancadas para não dificultar o bom desenvolvimento das espécies plantadas. Retiraram-se também todas as Leucenas para evitar a dispersão de sementes sobre o experimento.

A Figura 4.1, apresenta a cobertura vegetal em Maio de 2008.



**Figura 4.1** – Cobertura vegetal (Maio/2008)-experimentos em operação.

## 4.2 – Resultado dos Ensaio de Laboratório

### 4.2.1 – Resultado dos Ensaio de Caracterização e Permeabilidade

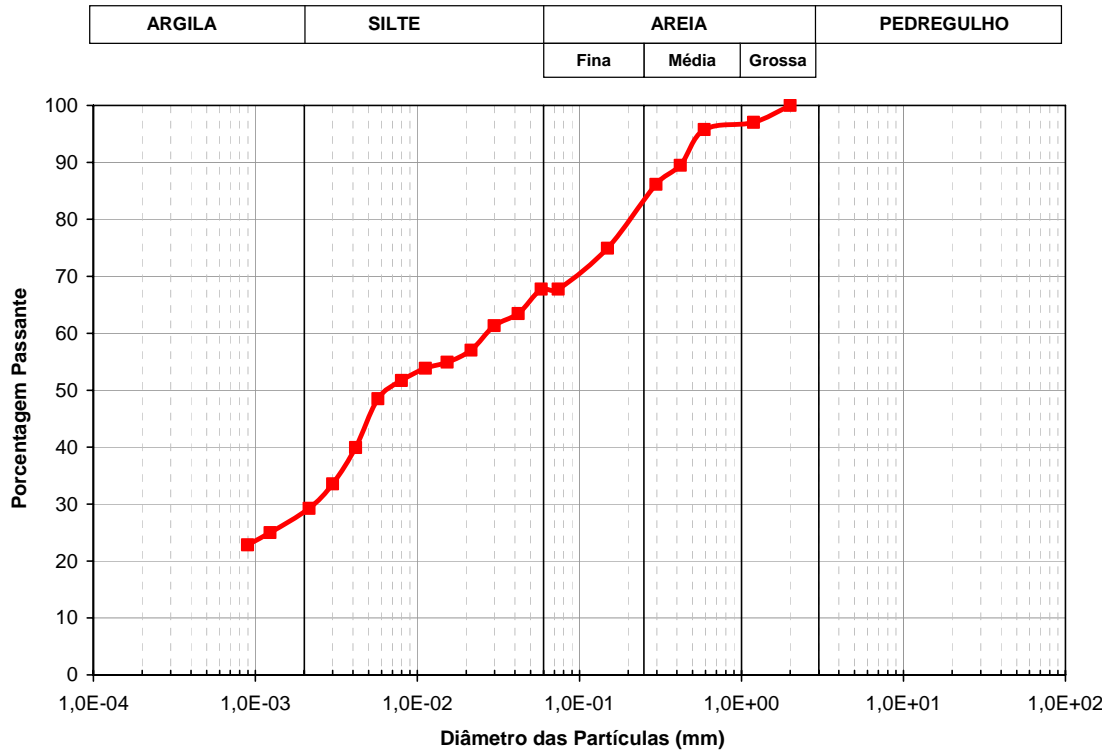
Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados de caracterização, massa específica e Limites de Atterberg, bem como os valores obtidos nos ensaios de permeabilidade saturada para os solos componentes do experimento.

**Tabela 4.1** – Massa específica, Limites de Atterberg e condutividade hidráulica dos materiais das coberturas.

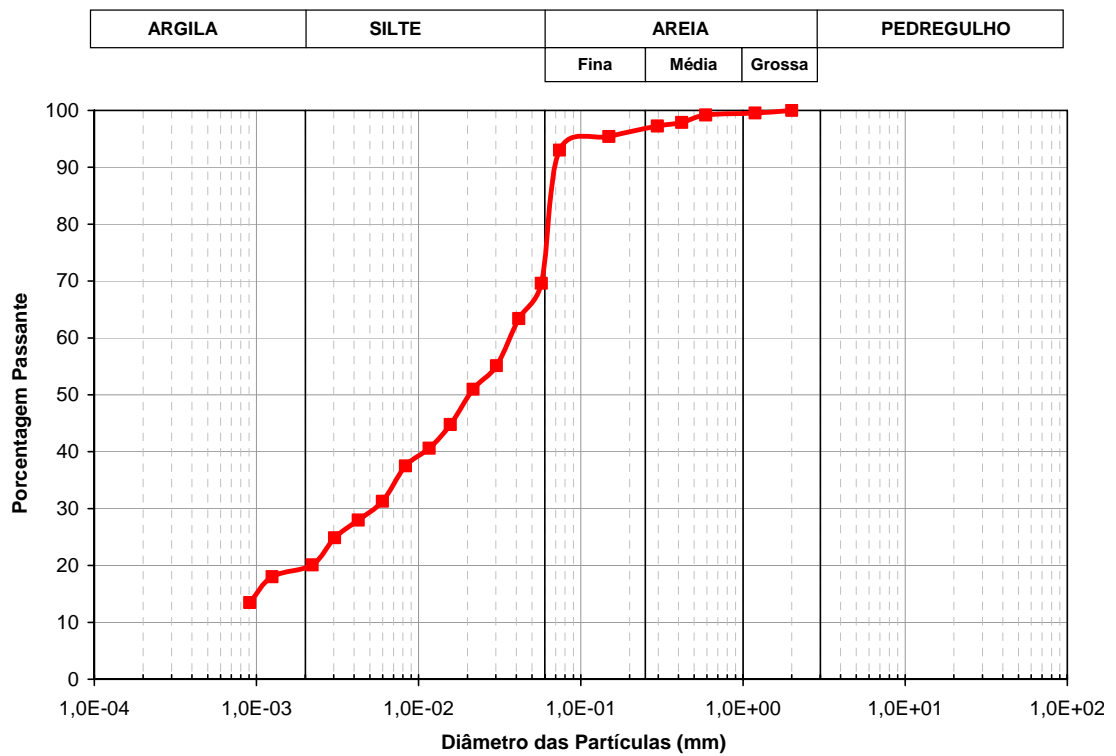
Solo	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	LL (%)	LP (%)	$K_s$ (cm/s)
Superficial	2,867	0,80	28,14	20,56	$8,2 \times 10^{-06}$
Siltoso	2,754	0,98	45,00	26,30	$1,5 \times 10^{-05}$
Argiloso	2,807	0,87	55,60	34,30	$1,2 \times 10^{-06}$
Barreira Capilar	2,669	0,85	Não Plástico	Não Plástico	$7,5 \times 10^{-03}$
Trafegabilidade	2,731	0,72	34,20	21,70	$5,5 \times 10^{-06}$

Nas Figuras 4.2 a 4.6 apresentam-se as curvas granulométricas obtidas por sedimentação e peneiramento dos solos usados no sistema de cobertura para os Lisímetros 1 e 2.





**Figura 4.2** - Curva granulométrica do solo superficial (top-soil) – NBR 6502/95.



**Figura 4.3** - Curva granulométrica do solo siltoso – NBR 6502/95.

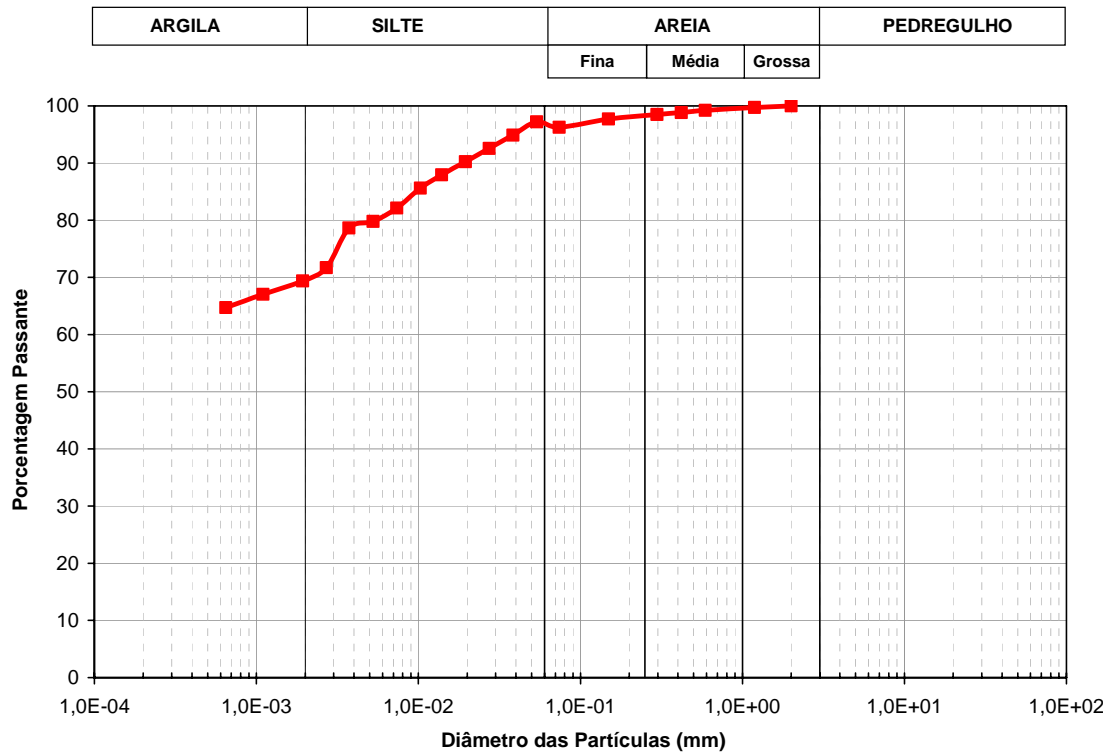


Figura 4.4 - Curva granulométrica do solo argiloso – NBR 6502/95.

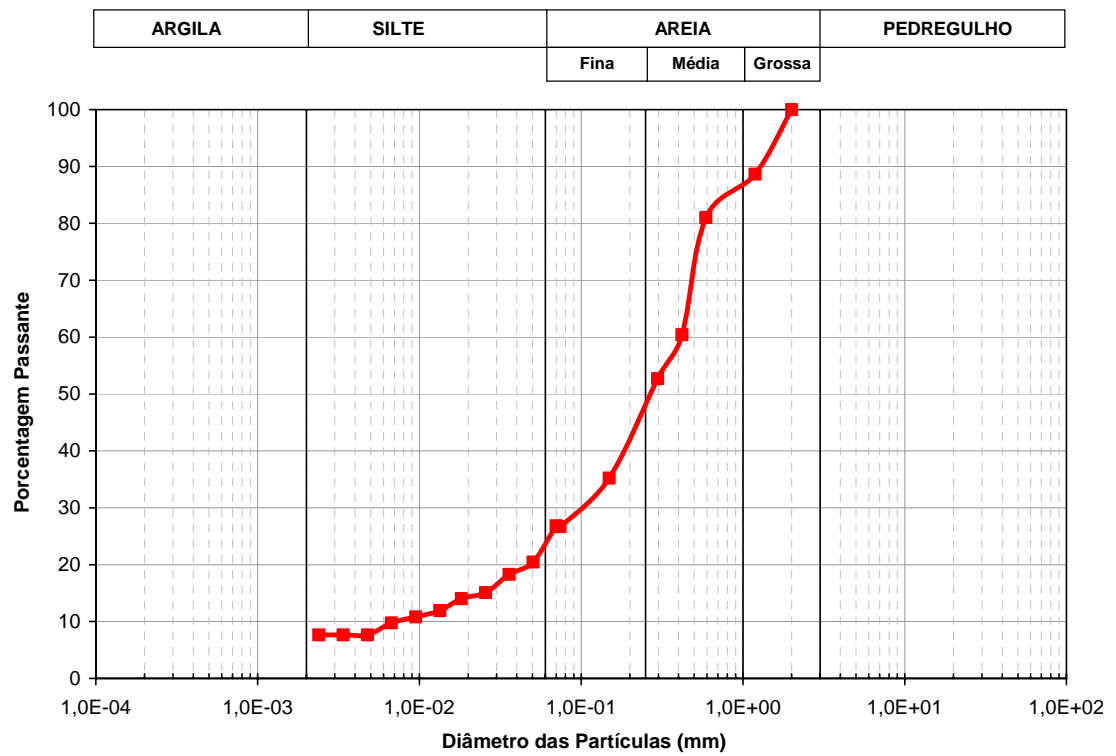
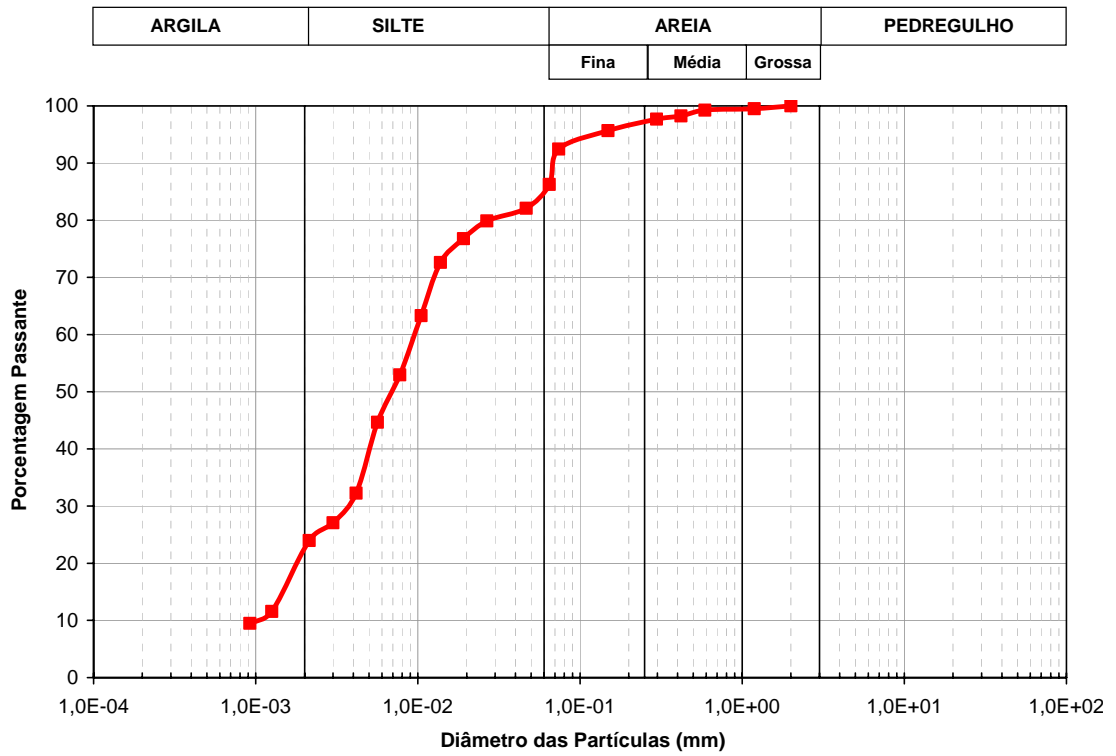


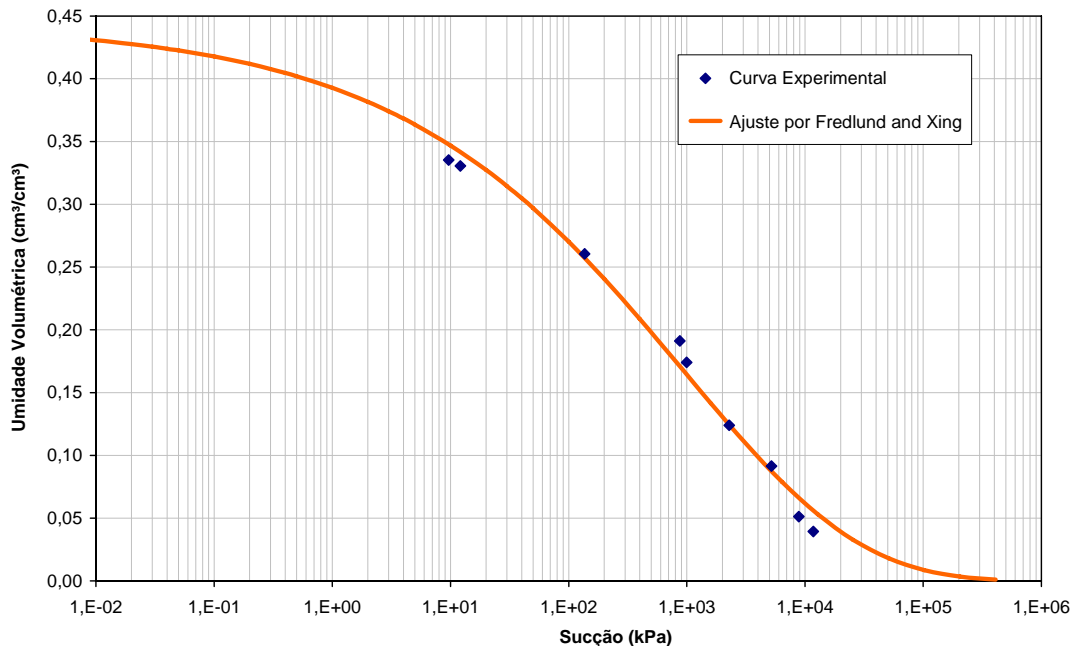
Figura 4.5 - Curva granulométrica do solo granular (barreira capilar) – NBR 6502/95.



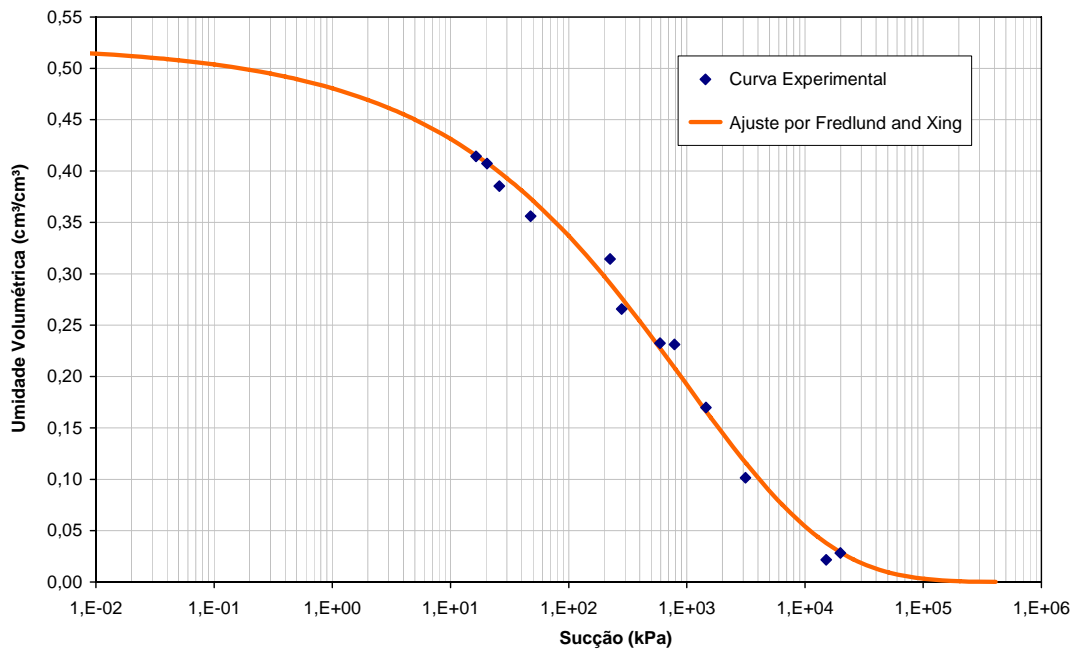
**Figura 4.6** - Curva granulométrica do solo de fundação (trafegabilidade) – NBR 6502/95.

#### 4.2.2 – Resultado dos Ensaio Especials

As Figuras 4.7 a 4.11 ilustram as curvas de retenção de água de cada solo usado no sistema de cobertura, obtidas experimentalmente e pela equação de Fredlund and Xing (1994).



**Figura 4.7** - Curva de retenção do solo superficial (top-soil).



**Figura 4.8** - Curva de retenção do solo siltoso.

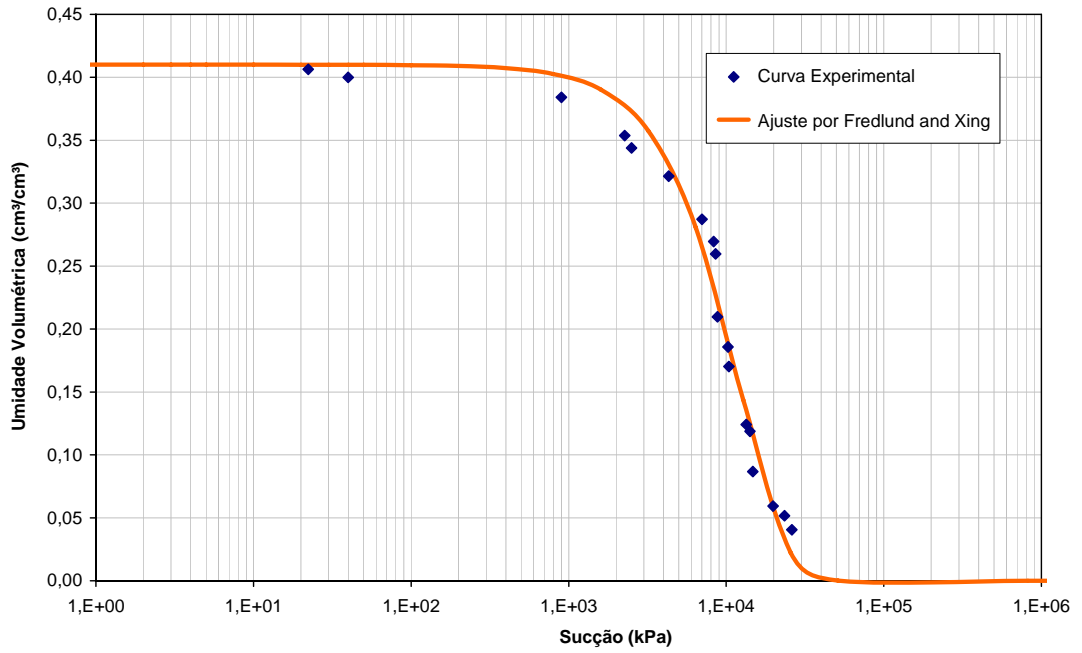


Figura 4.9 - Curva de retenção do solo argiloso.

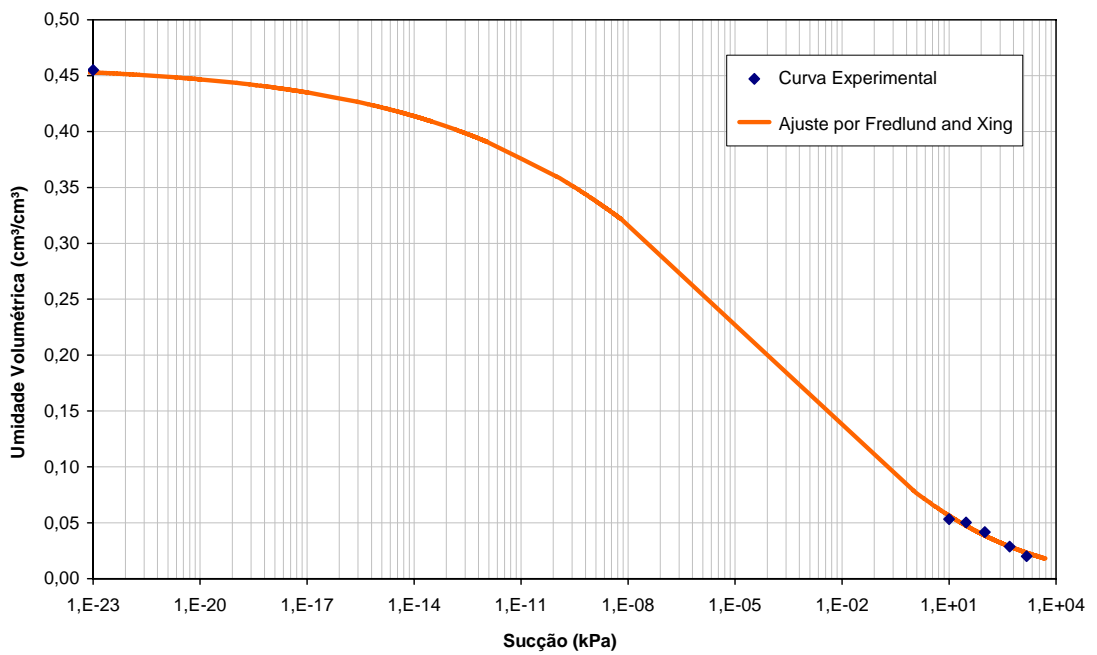
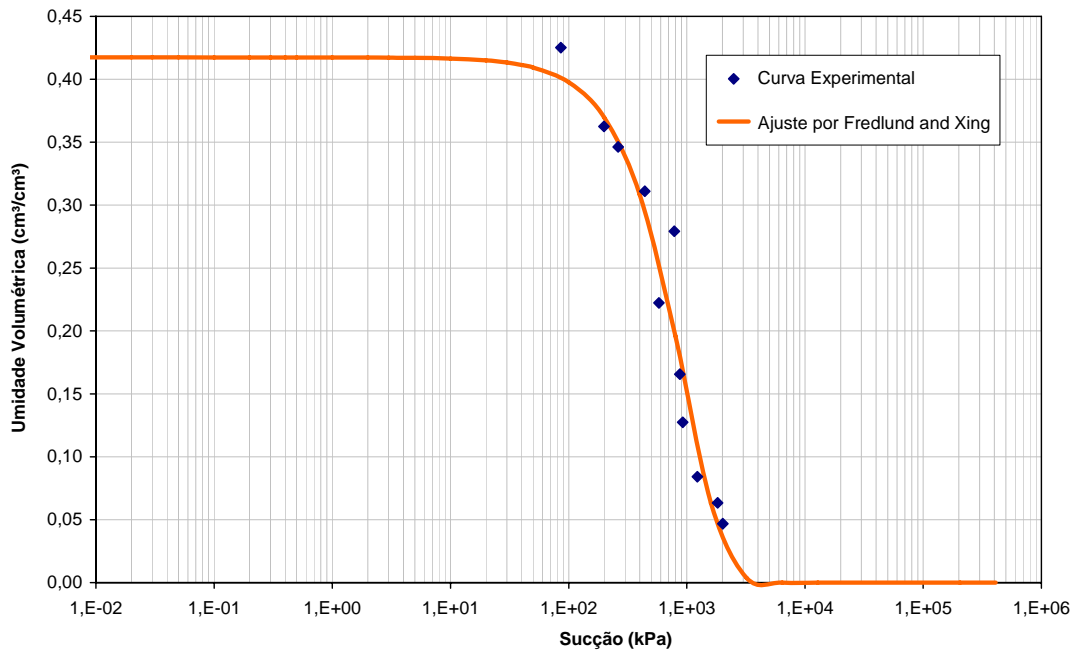


Figura 4.10 - Curva de retenção do solo granular (barreira capilar).



**Figura 4.11** - Curva de retenção do solo de fundação (trafegabilidade).

### 4.3 – Resultados de Campo

A partir da instrumentação instalada nas diversas profundidades do perfil da cobertura foi possível medir a umidade volumétrica e a variação de temperatura.

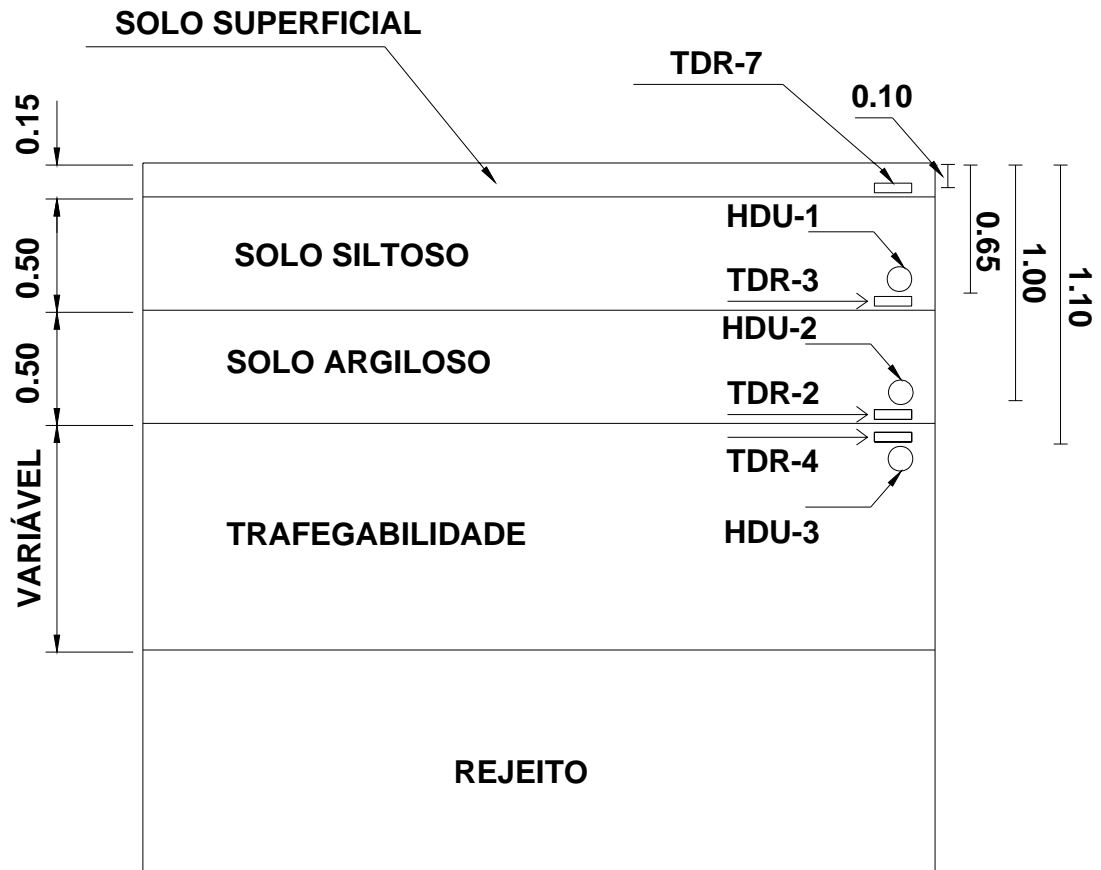
Os dados de umidade foram obtidos a partir das leituras dos TDRs. Estes equipamentos foram calibrados conforme já descrito no item 3.5.7.3.1.

Estes dados serviram como verificação do comportamento dos TDRs, uma vez que quanto mais úmido o solo menor a variação de temperatura medida.

As Figuras 4.12 e 4.13, representam esquematicamente os perfis dos lisímetros 1 e 2, respectivamente, na qual é possível notar o posicionamento e os nomes dos medidores de umidade (TDRs) e temperatura (HDUs) nos diversos solos da cobertura, facilitando assim, uma melhor compreensão das figuras apresentadas posteriormente.

Como na primeira camada, solo superficial, não foi instalado o HDU, apresenta-se nas Figuras 4.14 e 4.15 a variação da umidade volumétrica com o tempo para este solo, obtidos através das leituras dos TDRs, bem como a precipitação durante o período de análise.

As Figuras 4.16 a 4.21 ilustram a variação de temperatura e umidade volumétrica com o tempo no interior das demais camadas de cobertura. Notar que os conjuntos de TDRs e HDUs apresentados nos gráficos foram instalados em nichos, em um mesmo local nas camadas dos solos.



**Figura 4.12** - Perfil esquemático do lisímetro 1 com a posição dos instrumentos.

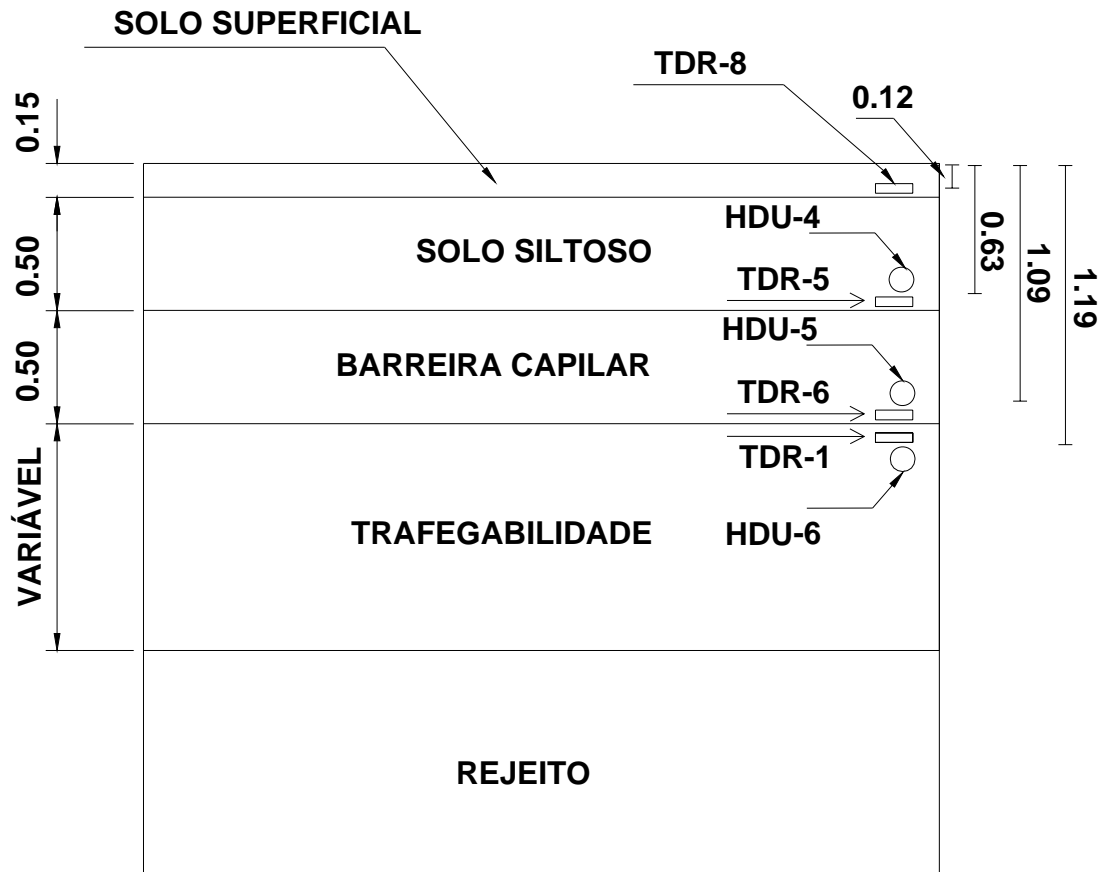


Figura 4.13 - Perfil esquemático do lisímetro 2 com a posição dos instrumentos.

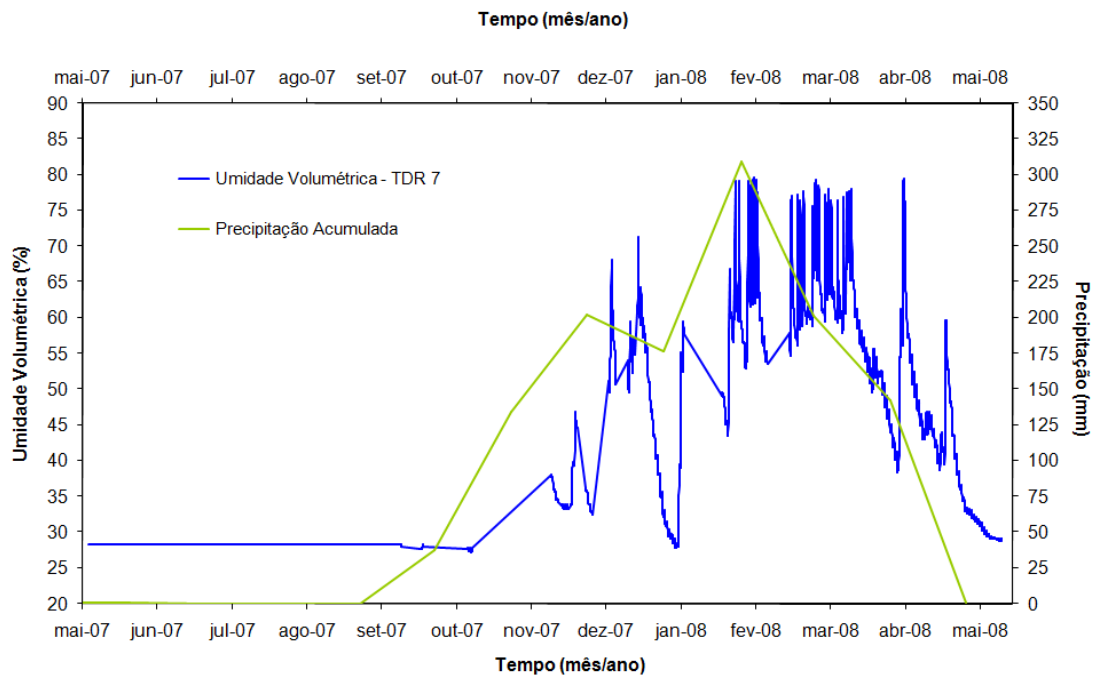
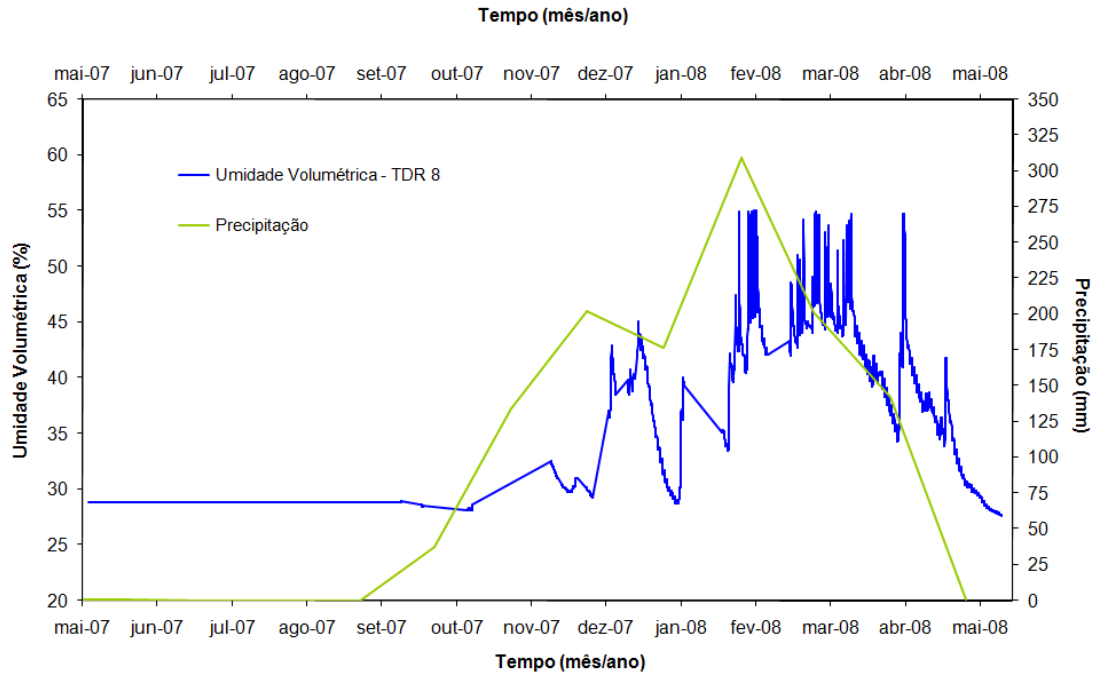


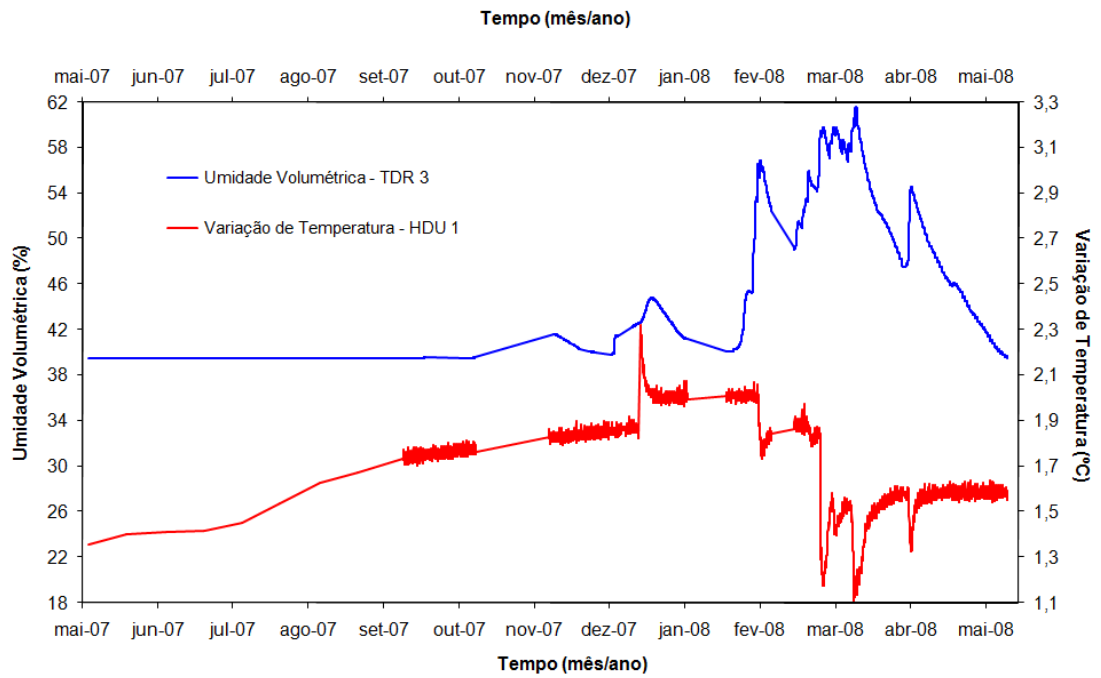
Figura 4.14 – Lisímetro 1 (solo superficial): Umidade Volumétrica X Precipitação X Tempo.



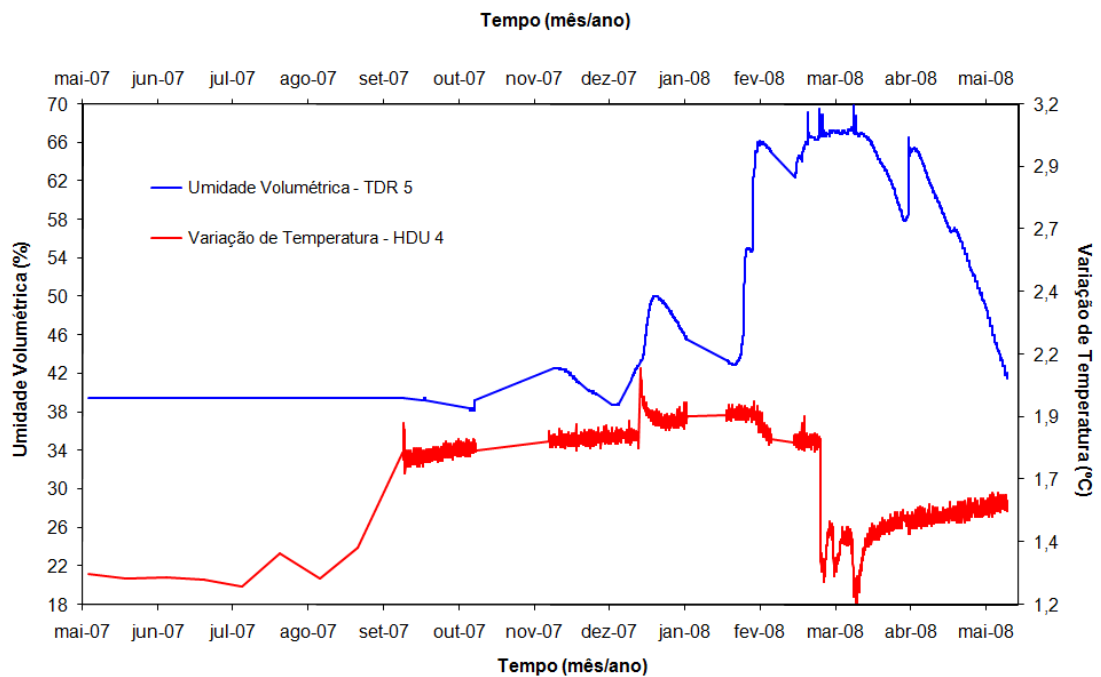


**Figura 4.15** – Lisímetro 2 (solo superficial): Umidade Volumétrica X Precipitação X Tempo.

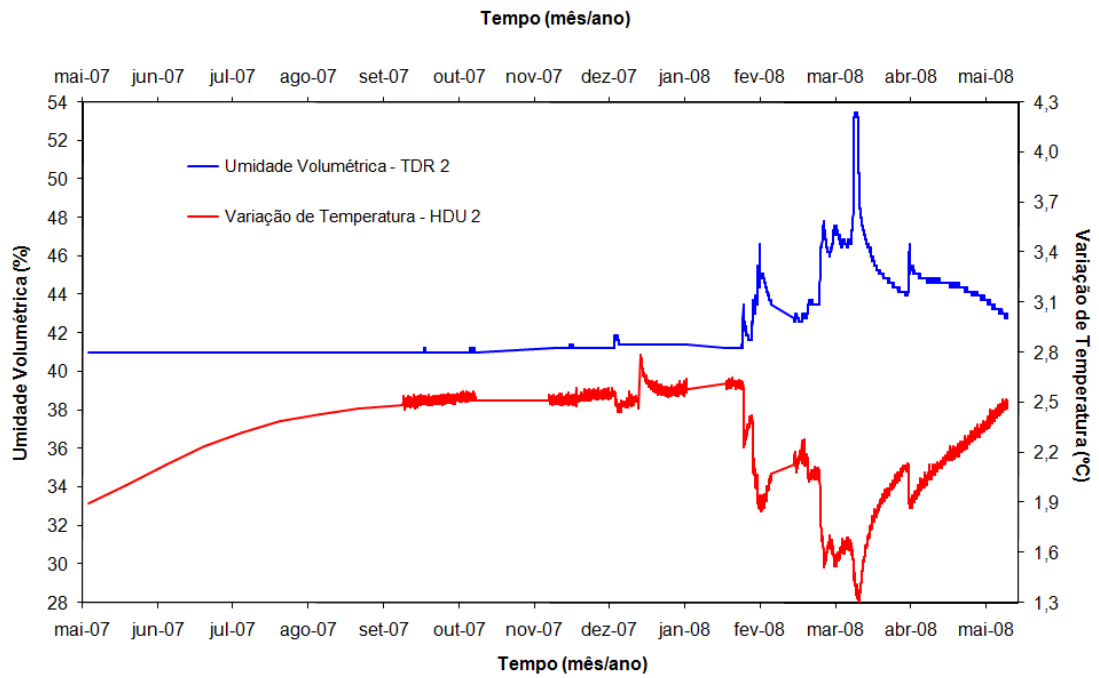
Como os dois TDRs foram instalados relativamente próximos um do outro na superfície da cobertura, notar, como era de se esperar, o comportamento similar dos mesmos. Verifica-se, também, que a camada superficial do lisímetro 1 ficou bem mais úmida ( $\theta = 85\%$ ) que a do lisímetro 2 ( $\theta = 60\%$ ).



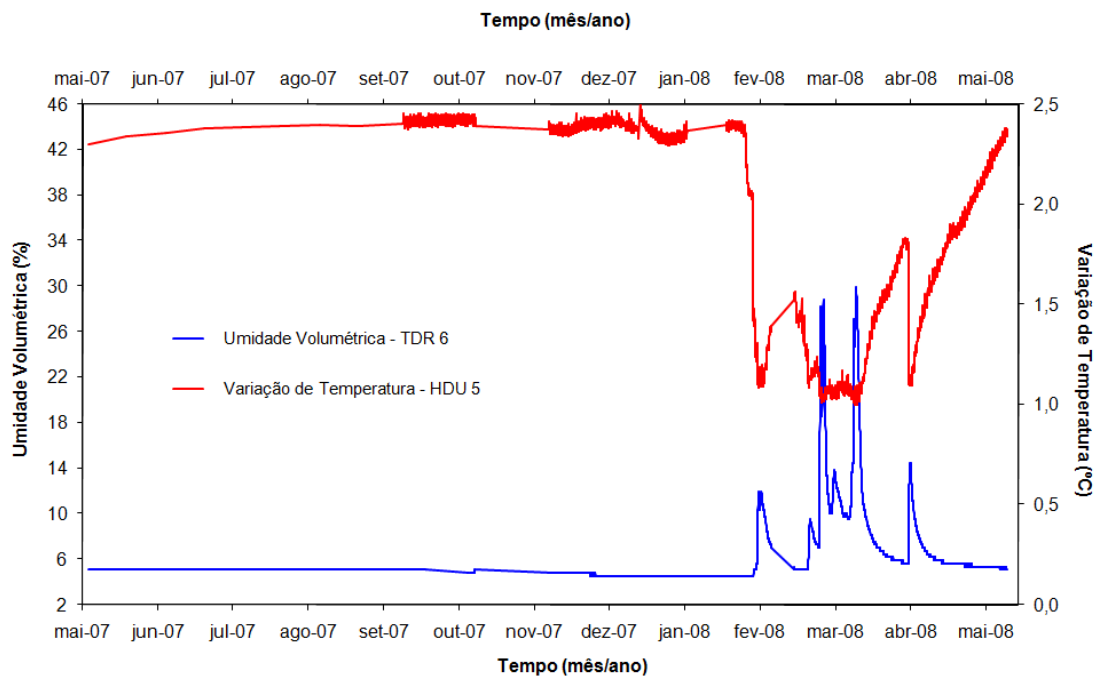
**Figura 4.16** – Lisímetro 1 (solo siltoso): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo.



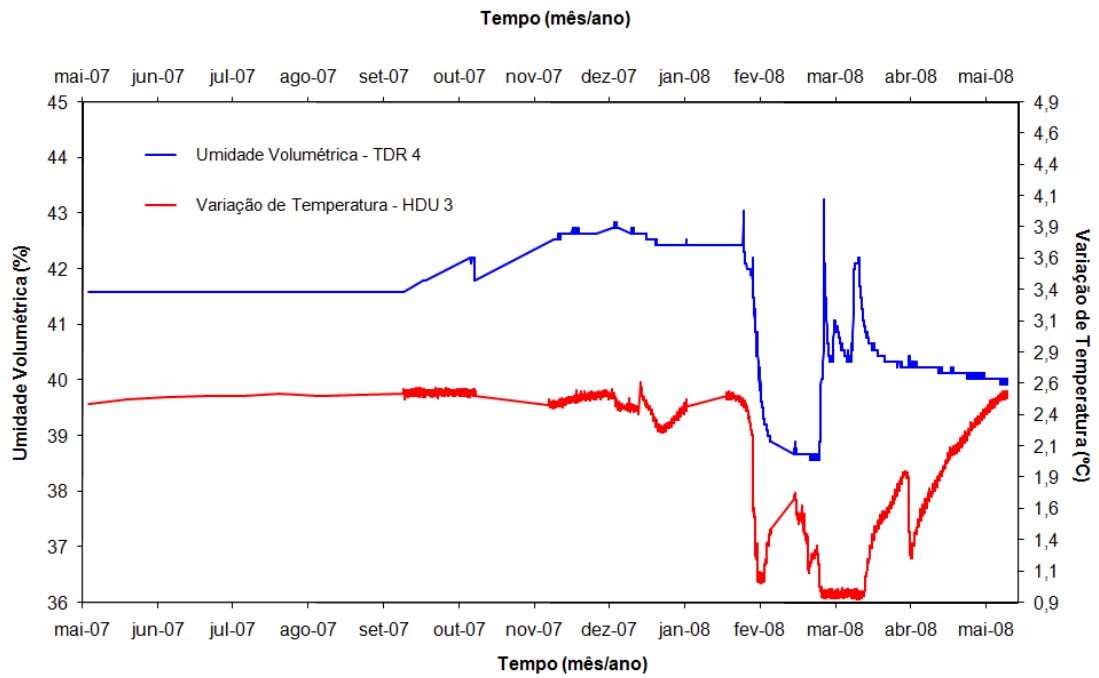
**Figura 4.17** – Lisímetro 2 (solo siltoso): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo.



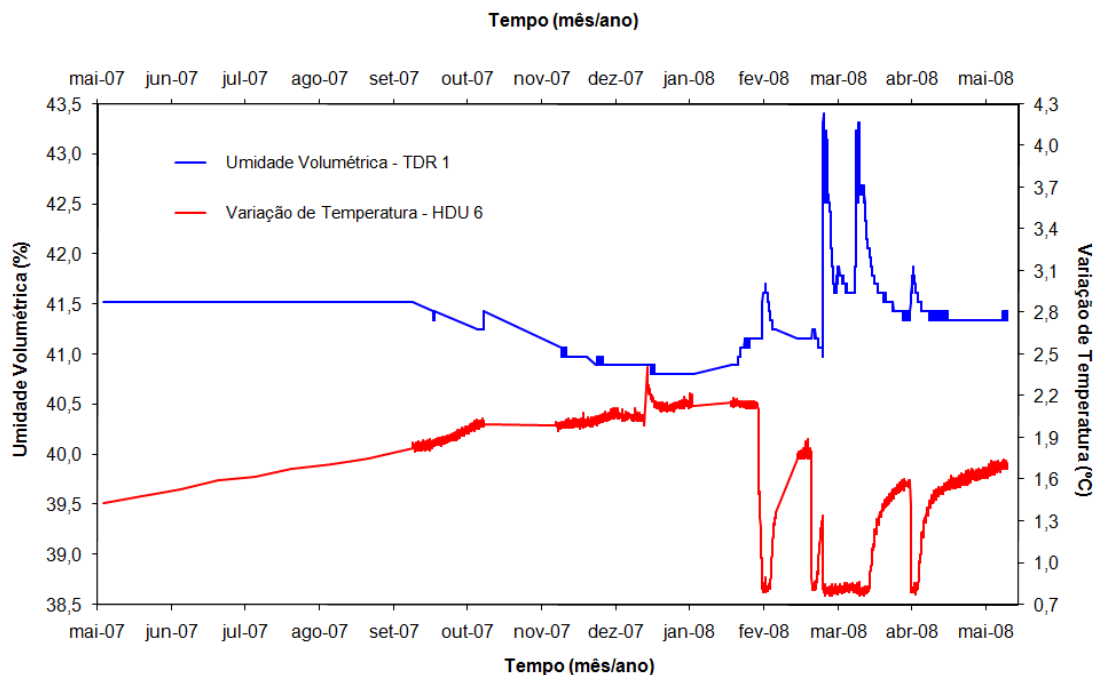
**Figura 4.18** – Lisímetro 1 (solo argiloso): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo.



**Figura 4.19** – Lisímetro 2 (barreira capilar): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo.



**Figura 4.20** – Lisímetro 1 (trafegabilidade): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo.



**Figura 4.21** – Lisímetro 2 (trafegabilidade): Umidade Volumétrica X Variação de Temperatura X Tempo.

Conforme descrito no item 3.5.7.4, se o elemento poroso do sensor estiver mais úmido o calor emitido pelo instrumento se dissipará com maior facilidade,

conseqüentemente, as variações de temperatura e as sucções serão menores. Por outro lado, se o elemento poroso estiver mais seco, haverá dificuldade em dissipar o calor emitido pelos instrumentos, conseqüentemente os mesmos indicarão valores mais elevados de variações de temperatura e sucções. Ora, como se sabe que a sucção diminui quando a umidade aumenta, é de se esperar que toda vez que a umidade aumentar nos TDRs a variação de temperatura nos HDUs diminua e vice-versa. Analisando-se as figuras apresentadas anteriormente, observa-se que quase sempre se verifica esse comportamento entre as variações de temperatura e umidades.

Com relação ao escoamento superficial medido no campo, muitas foram as dificuldades para a realização das leituras dos hidrômetros. A água que escoava pela cobertura e chegava à caixa coletora de concreto arrastava muitos sedimentos, dificultando e/ou impossibilitando a passagem pelos hidrômetros. Mesmo assim, foi possível realizar algumas medições que foram incorporadas aos estudos e estes dados serão apresentados no próximo item.

Um dos objetivos dos trabalhos de campo não foi atingido que era o de se medir a eventual infiltração que percolaria pela cobertura.

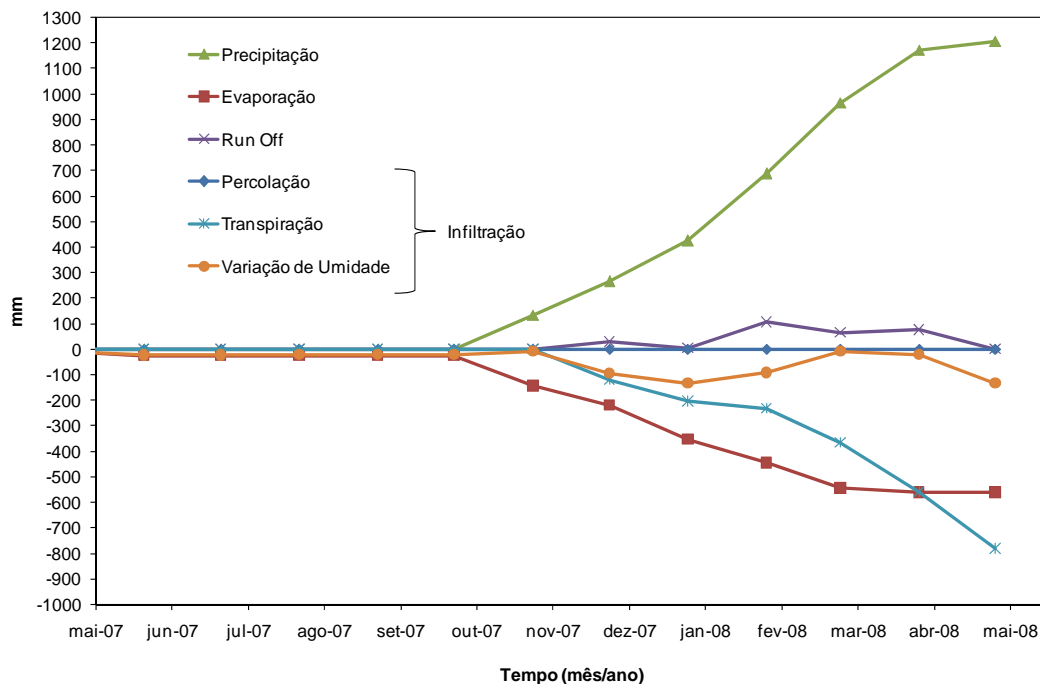
Caso a cobertura experimental não fosse capaz de suportar a precipitação e ocorresse a infiltração da água pelas camadas da cobertura, esta seria interceptada pelos lisímetros e conduzida para os equipamentos de medida. Entretanto, como os experimentos foram construídos em uma bacia (Barraginha), ao se construir a cobertura, as camadas dos solos ficaram em contato direto com o solo natural adjacente. Como o perfil do solo natural é bastante estratificado as águas que infiltravam a montante do experimento eram conduzidas por estas camadas até os experimentos. Estas águas continuavam percolando subhorizontalmente pelos solos da cobertura até atingir os lisímetros, produzindo falsos resultados de infiltração.

Esta constatação já havia sido realizada visualmente quando da instalação dos experimentos e para mitigar este problema, foi escavado um canal profundo que interceptaria estas águas de percolação. Notou-se, entretanto, que este canal não foi suficiente para resolver o problema, por algumas possíveis razões: profundidade insuficiente do canal e/ou acúmulo de vegetação e sedimentos no fundo do mesmo que acabaram por elevar o nível da água fazendo com que houvesse percolação pelo solo da cobertura até atingir os lisímetros.

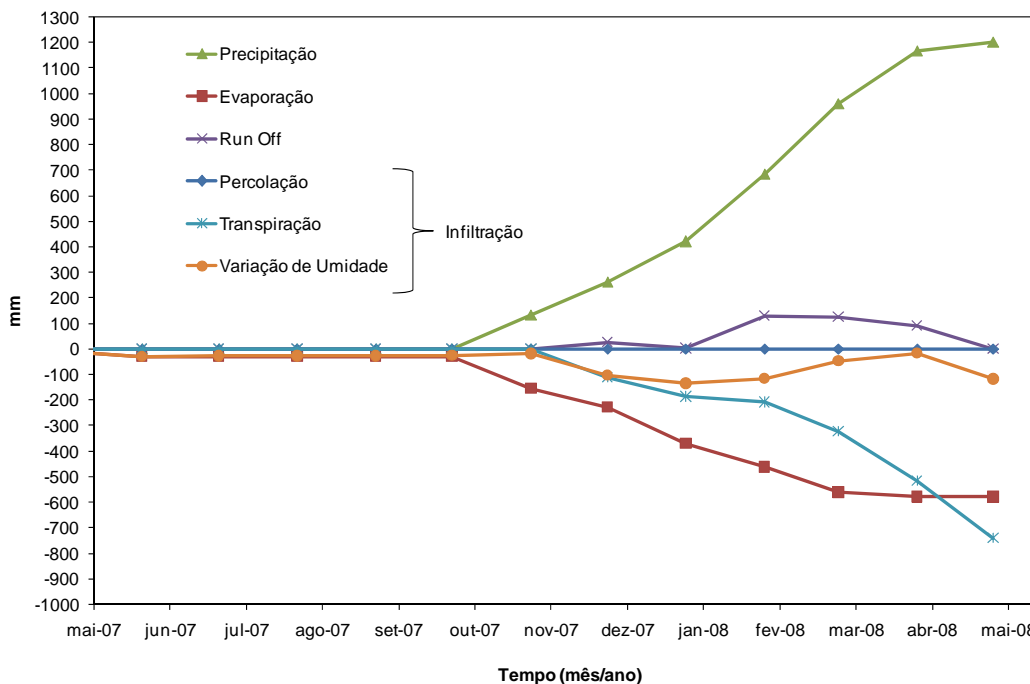
#### 4.4 – Resultados do Modelo Numérico

Dentre os inúmeros resultados disponibilizados pelo modelo e diferentes formas de apresentação dos mesmos, escolheu-se alguns gráficos que ilustram o desempenho da cobertura com o tempo frente às condições de contorno e características dos materiais impostos ao modelo. Ressalta-se que estes resultados podem não representar com precisão a realidade por razões a serem comentadas posteriormente, mas todos os esforços foram despendidos para que esta aproximação fosse a melhor possível.

As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam o Balanço Hídrico para os sistemas de cobertura 1 e 2, respectivamente.



**Figura 4.22** - Balanço hídrico gerado pelo modelo referente ao sistema de cobertura 1.



**Figura 4.23** - Balanço hídrico gerado pelo modelo referente ao sistema de cobertura 2.

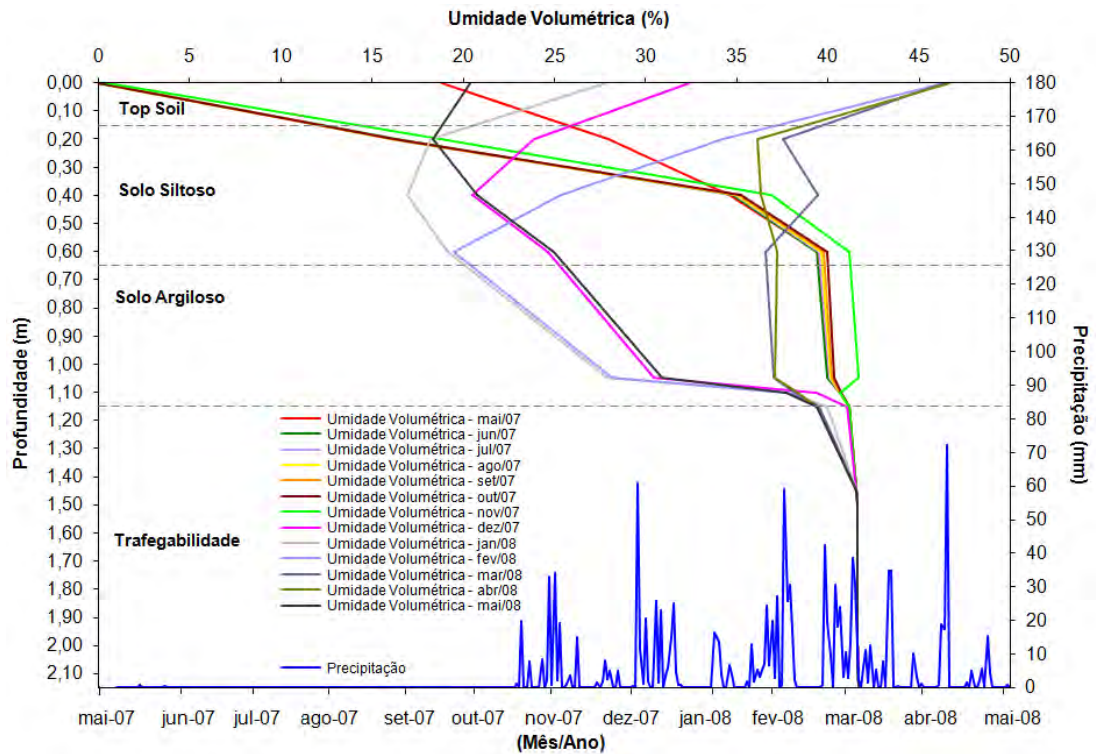
Observa-se nas Figuras 4.22 e 4.23, que grande parte da precipitação é removida da cobertura pela evapotranspiração restando pouco para escoar superficialmente e quase nada para percolar pelas camadas da cobertura.

Parte da água que infiltra pela cobertura é absorvida pelo solo (variação de umidade) e outra parte, maior do que aquela é removida por transpiração, de forma que a percolação é praticamente nula.

A condição em que o solo, juntamente com a vegetação, exerce o papel de armazenar e liberar a água é sempre a desejada, simulando uma condição natural do solo coberto com vegetação.

Nas Figuras 4.24 e 4.25 apresentam-se o perfil de umidade referente ao período de chuvas, para os sistemas de cobertura 1 e 2, respectivamente.

Ao se fazer esta análise dos resultados do modelo deve-se ter em mente as Figuras 4.12 e 4.13 e as respectivas malhas de elementos finitos apresentadas pelas Figuras 3.49 e 3.50. Os gráficos 4.24 e 4.25 foram gerados considerando somente os resultados dos modelos nos nós cujas elevações eram coincidentes com as dos TDRs. Assim, não se pretende aqui extrapolar os dados de umidade obtidos em alguns nós para todo o perfil do solo, apesar dos gráficos poder estar sugerindo isto.



**Figura 4.24** - Perfil de umidade gerado pelo modelo referente ao sistema de cobertura 1.

Ao observar o perfil do solo representado pela Figura 4.24, nota-se que o solo que mais sofreu variações de umidade foi o solo superficial (Top Soil) (0,00 a 0,15 m), abaixo dele, o solo siltoso com profundidade variando entre (0,15 a 0,65 m) também secou e umedeceu com o passar dos meses do experimento. No solo argiloso (0,65 a 1,15 m), como era de se esperar, não houve grandes variações de umidade volumétrica e, finalmente, no solo de fundação (1,15 a 2,15 m) a umidade se manteve em 42% desde maio de 2007 a maio de 2008, portanto durante todo o período de análise.

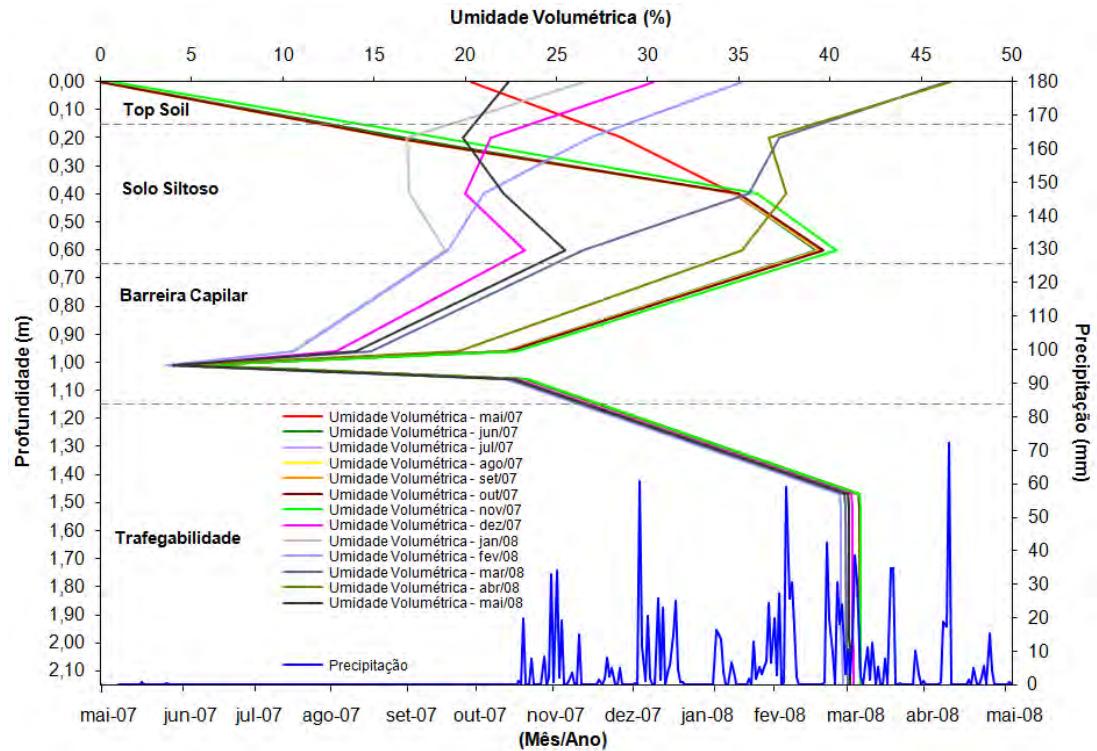
Nota-se também o umedecimento dos solos nos meses chuvosos e a subsequente perda de umidade na ausência das chuvas.

Observa-se, pelos resultados do modelo, que o desempenho da cobertura foi satisfatório uma vez que não houve fluxo atravessando o solo de fundação, fato comprovado pela manutenção da umidade da argila ao redor de 30 a 42% (no nó referente a elevação do TDR 2), o que implica em uma saturação em torno de 80%. Segundo a bibliografia apresentada, caso a barreira hidráulica consiga permanecer durante todo o ano com grau de saturação maior que 80%, esta funcionará também



como uma barreira contra o ingresso do oxigênio, elemento fundamental para a ocorrência da drenagem ácida.

Assim, sem entrada de água e de oxigênio os rejeitos estarão protegidos da ocorrência da oxidação de sulfetos.



**Figura 4.25** - Perfil de umidade gerado pelo modelo referente ao sistema de cobertura 2.

Ao observar o perfil do solo representado pela Figura 4.25, nota-se que todos os solos do perfil sofreram variações de umidade com exceção do solo de trafegabilidade que permaneceu inalterado do início ao fim do ensaio. O cascalho, apesar de não ter passado por grandes variações de umidade volumétrica (aprox. 5% no nó onde foram realizadas as leituras) não se umedeceu durante todo o período, indicando que houve a quebra capilar almejada pelo sistema. Finalmente, a umidade do solo de fundação/trafegabilidade (1,15 a 2,15 m) não se alterou, uma vez que se manteve com 42% de umidade volumétrica desde maio de 2007 a maio de 2008, atravessando todo o período de análise.

Observa-se, pelos resultados do modelo, que o desempenho da cobertura 2 também foi satisfatório uma vez que não houve fluxo atravessando o solo de

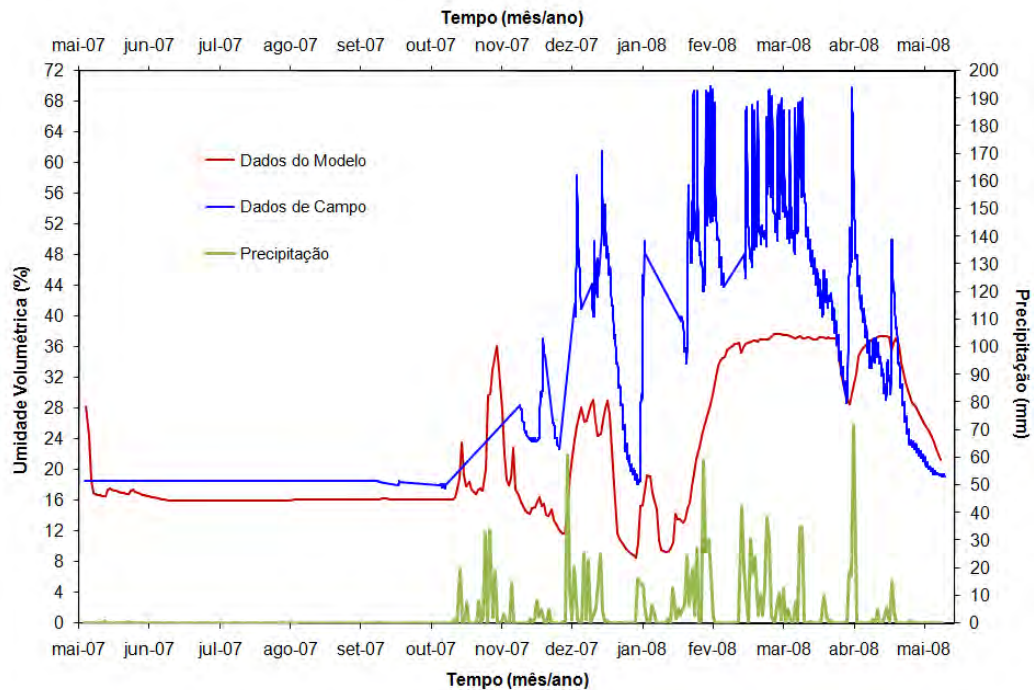
fundação que atingiria os resíduos (rejeitos) depositados na barraginha. Para atingir tal objetivo, o cascalho exerceu um papel de extrema importância no modelo através da quebra capilar, que impediu que o fluxo de água o ultrapassasse, mantendo desta forma a camada de silte que o sobrepõe mais úmida, disponibilizando água para que a vegetação de forma que os raios solares possam retirá-la. Além disto, impediu que a água atingisse os rejeitos e, portanto, não houvesse geração de drenagem ácida.

#### **4.5 – Comparação dos Resultados (Campo X Modelo)**

Para avaliar o comportamento das coberturas e na tentativa de calibrar o modelo, compararam-se os resultados obtidos em campo com aqueles resultantes do modelo.

As variações de umidade volumétrica com o tempo medidas no campo nas diferentes camadas dos dois sistemas de cobertura, e as obtidas com o modelo são apresentadas nas Figuras 4.26 a 4.33, na ordem do mais superficial para o mais profundo.

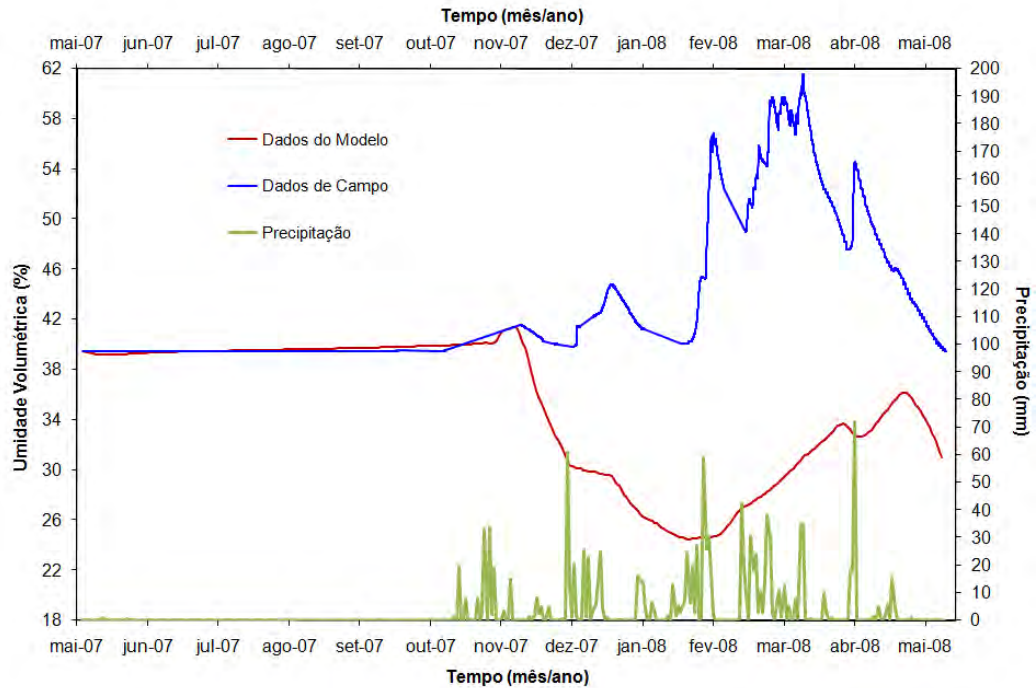
- Cobertura 1



**Figura 4.26** – Solo superficial (TDR 7): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO).

A partir da Figura 4.26, pode-se dizer que:

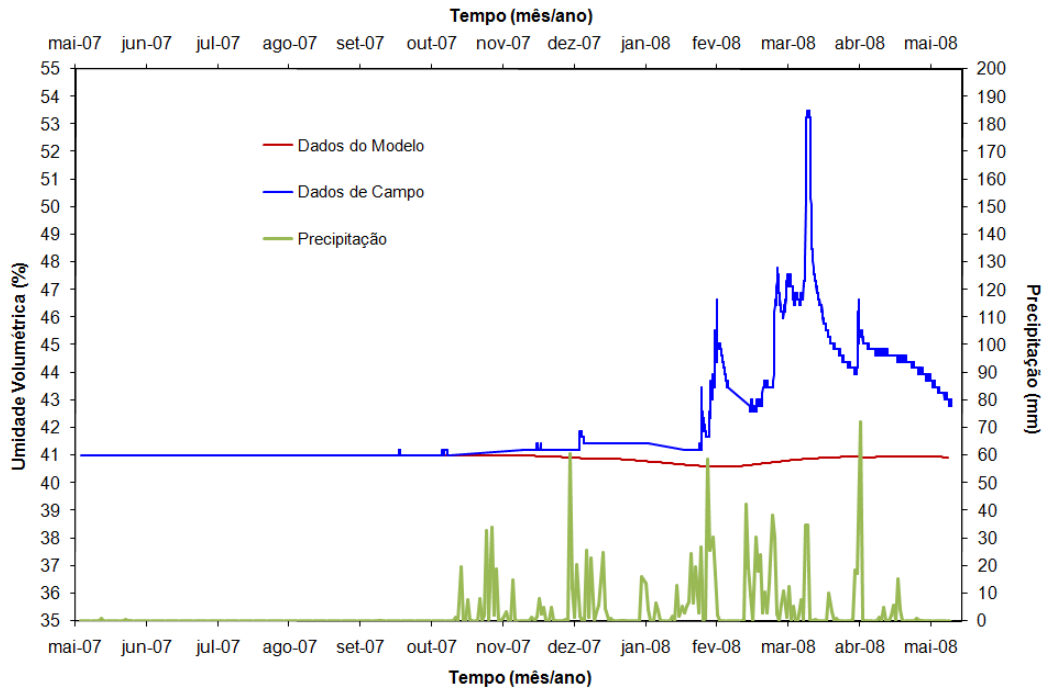
- O comportamento da umidade medida em campo é compatível com o comportamento da precipitação.
- A variação da umidade no modelo é menos sensível às variações da precipitação, porém mantendo o mesmo comportamento dos dados de campo.
- Não há defasagem entre a umidade de campo ou do modelo e a precipitação, ou seja, ao chover, imediatamente o solo umedece o que pode ser facilmente explicado pelo fato do solo em questão ser superficial e sujeito às intempéries.
- Não há variações expressivas da umidade no modelo a partir de fevereiro de 2008.



**Figura 4.27** – Solo siltoso (TDR 3): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO).

A partir da Figura 4.27, pode-se dizer que:

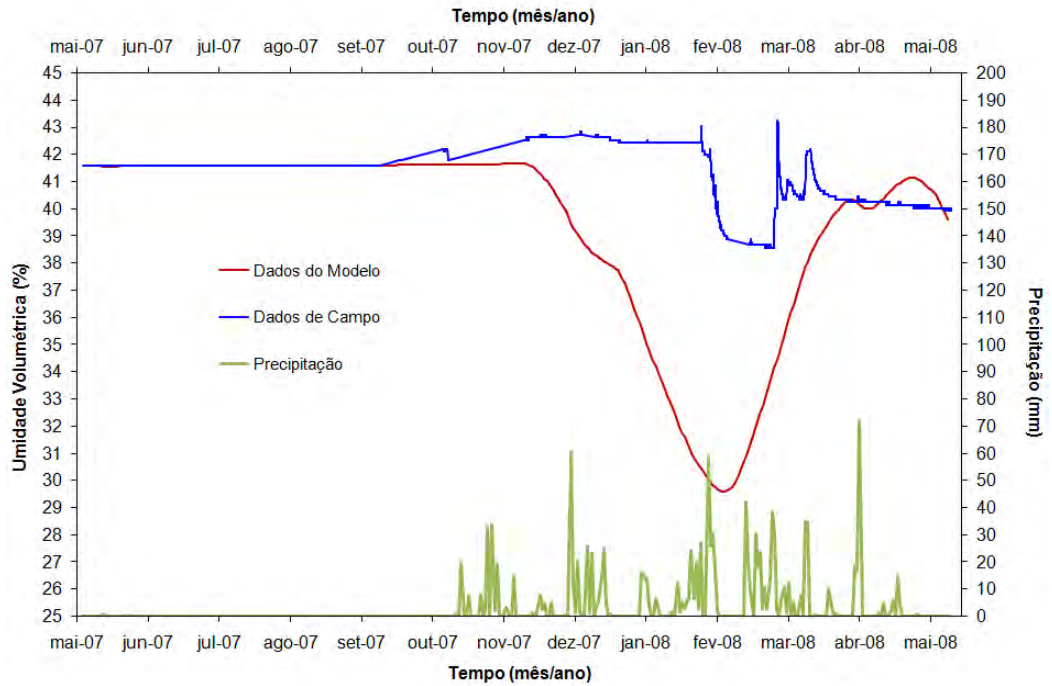
- O comportamento da umidade de campo entre os meses de outubro/2007 a dezembro/2008 não foi influenciado pela precipitação indicando que a chuva neste período não teria sido suficiente para umedecer esta camada. A partir deste período, o comportamento da umidade de campo se assemelha ao comportamento das precipitações.
- O comportamento da umidade do modelo apresenta-se praticamente “espelhado” em relação ao de campo, indicando que a camada do solo siltoso se encontra mais seca do que realmente está.
- A partir de fevereiro/2008 a umidade do solo segundo o modelo é incrementada e, ao se observar a Figura 4.26, que representa o solo superficial, nota-se que neste mesmo período a umidade dada pelo modelo se manteve constante, ou seja, quando o solo superficial se manteve úmido o solo imediatamente abaixo dele se umedeceu.



**Figura 4.28** – Solo argiloso (TDR 2): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO).

A partir da Figura 4.28, pode-se dizer que:

- As precipitações ocorridas entre outubro/2007 a fevereiro/2008 não influenciaram as leituras da umidade de campo. A partir de fevereiro/2008 o comportamento da umidade de campo se assemelhou ao comportamento das precipitações no período de comparação.
- O modelo não indicou variações de umidade durante todo o período de análise.

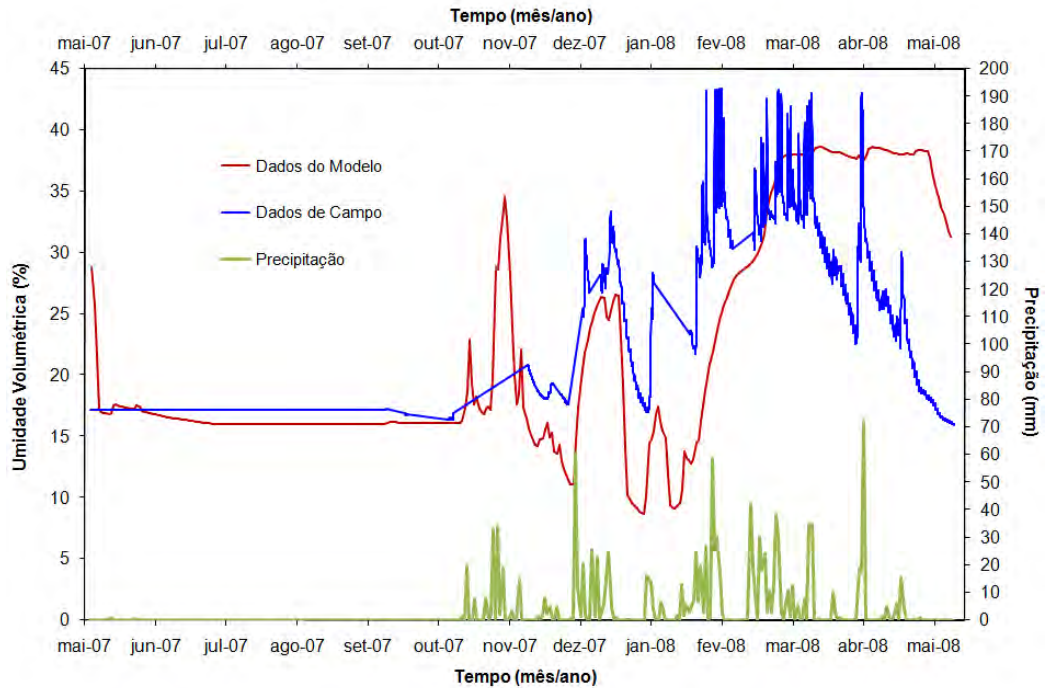


**Figura 4.29** – Trafegabilidade (TDR 4): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO).

A partir da Figura 4.29, pode-se dizer que:

- Apesar do pequeno umedecimento desta camada observado em campo no período de outubro/2007 e fevereiro/2008, a variação de umidade não seguiu a mesma tendência que a precipitação o que pode ser explicado pelo fato desta camada estar mais profunda e, portanto, distante da interferência dos fenômenos naturais (chuvas, evaporação, raízes, etc).
- A variação de umidade nesta camada está mais relacionada com a variação da umidade da camada imediatamente superior.

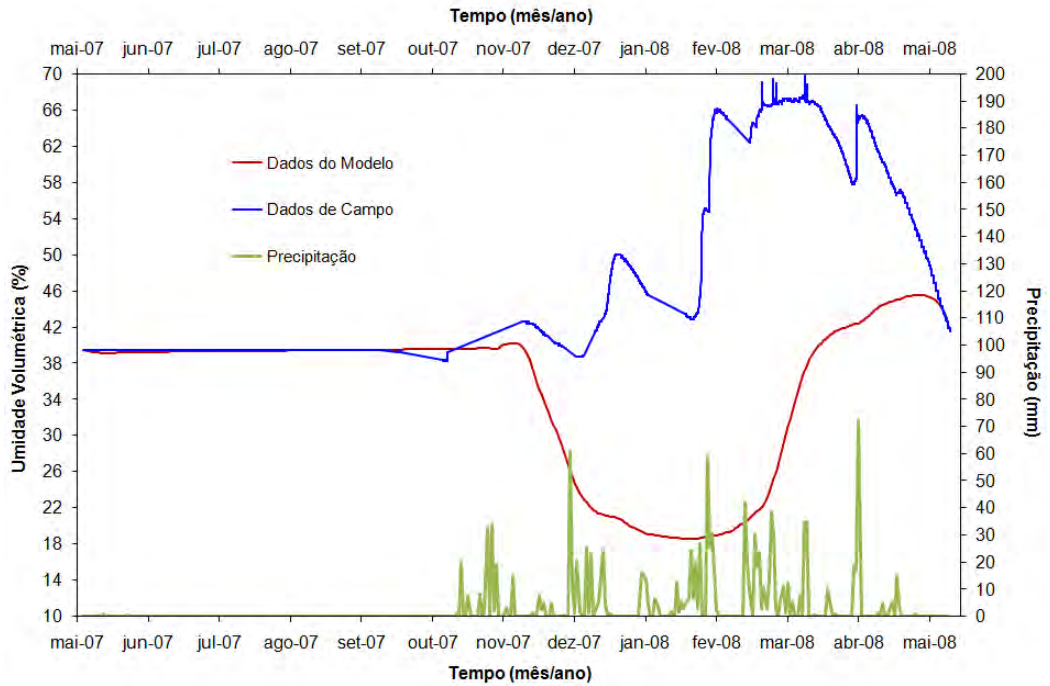
- Cobertura 2



**Figura 4.30** – Solo superficial (TDR 8): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO).

A partir da Figura 4.30, pode-se dizer que:

- O comportamento da umidade medida em campo é compatível com o comportamento da precipitação.
- A variação da umidade no modelo é menos sensível às variações da precipitação, porém mantendo o mesmo comportamento dos dados de campo.
- Não há defasagem entre a umidade de campo ou do modelo e a precipitação, ou seja, ao chover, imediatamente o solo umedece o que pode ser facilmente explicado pelo fato do solo em questão ser superficial e sujeito as intempéries.
- Não há variações expressivas da umidade no modelo a partir de março de 2008.

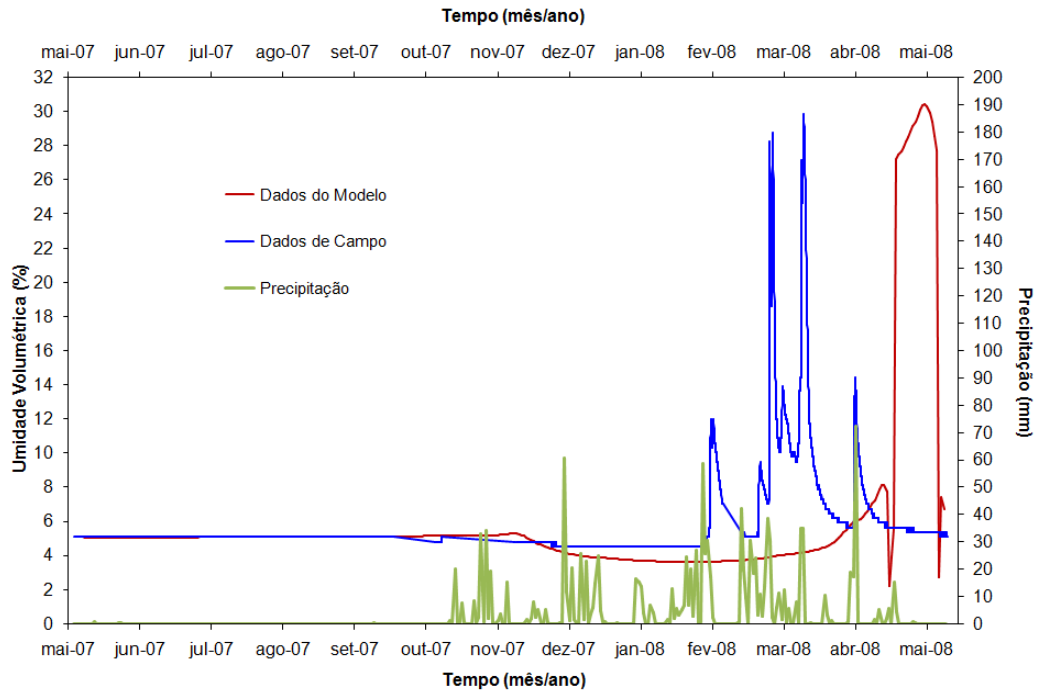


**Figura 4.31** – Solo siltoso (TDR 5): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO).

A partir da Figura 4.31, pode-se dizer que:

- O comportamento da umidade de campo entre os meses de outubro/2007 a dezembro/2008 não foi influenciado pela precipitação indicando que a chuva neste período não teria sido suficiente para umedecer esta camada. A partir deste período, o comportamento da umidade de campo se assemelha ao comportamento das precipitações.
- O comportamento da umidade do modelo no período de novembro/07 a março/08 o solo continua secando mesmo com a ocorrência das chuvas.
- A partir de março/2008 a umidade do solo segundo o modelo é incrementada e, ao se observar a Figura 4.30, que representa o solo superficial, nota-se que neste mesmo período a umidade dada pelo modelo se manteve constante, ou seja, quando o solo superficial se manteve úmido o solo imediatamente abaixo dele se umedeceu.

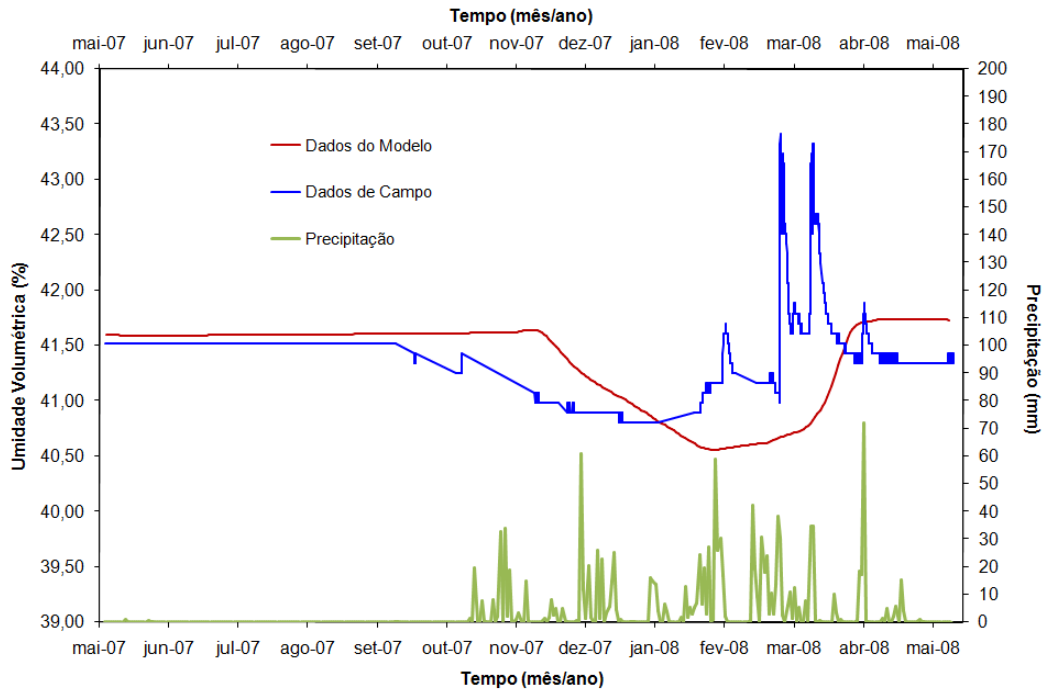




**Figura 4.32** – Barreira capilar (TDR 6): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO).

A partir da Figura 4.32, pode-se dizer que:

- As precipitações ocorridas entre outubro/2007 e fevereiro/2008 não influenciaram a umidade de campo. A partir de fevereiro/2008 o comportamento da umidade de campo apresentou-se razoavelmente semelhante ao comportamento das precipitações.
- Os resultados do modelo apresentam-se compatíveis com os resultados de campo, porém com uma defasagem de aproximadamente 2 meses.



**Figura 4.33** – Trafegabilidade (TDR 1): Umidade Volumétrica (CAMPO X MODELO).

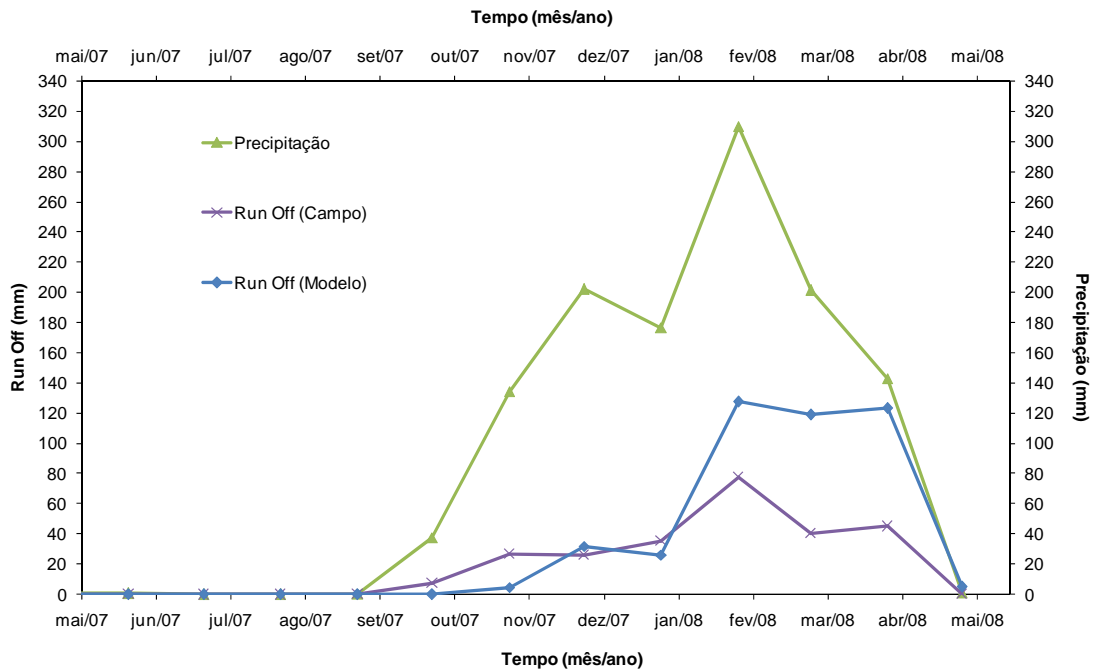
A partir da Figura 4.33, pode-se dizer que:

- O comportamento da umidade no campo e modelo se assemelha. Observa-se que a variação de umidade não está relacionada com a precipitação, mas sim com o comportamento da umidade da camada imediatamente superior a esta, ou seja, quando a camada de barreira capilar seca esta também e vice-versa.

De uma maneira geral as distribuições no campo foram, qualitativamente, razoavelmente parecidas com as previstas pelo modelo numérico. Entretanto, ainda existem discrepâncias que precisam ser elucidadas. A explicação tais discrepâncias pode ser dada por uma série de fatores, tais como: eventuais erros na calibração dos TDRs ou erros nas leituras das umidades de campo quando da retirada das amostras indeformadas, etc.

Com exceção dos TDRs 6 e 1 (Figuras 4.32 e 4.33, respectivamente) o modelo numérico apresenta menores umidades (mais seco) que o campo.

A Figura 4.34 ilustra as variações do escoamento superficial (Run Off) ao longo do ano, medidas no campo e fornecidas pelo modelo numérico.



**Figura 4.34** - Escoamento superficial (Run Off) (CAMPO X MODELO).

Observa-se que valores medidos no campo e calculados pelo modelo numérico ficaram razoavelmente parecidos.

Apesar de o modelo numérico ter fornecido maiores valores, isto pode ser justificado pela falta de dados de campo ao longo de todo o período do monitoramento. Como comentado anteriormente, muitas vezes o hidrômetro estava obstruído pela água suja com sedimentos impossibilitando a realização das medidas.

## 5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Esta tese teve com principal objetivo a construção de dois sistemas de cobertura no campo, a instalação de um sistema de monitoramento dos mesmos, o acompanhamento do sistema de monitoramento e análises numéricas preliminares dos sistemas de cobertura nas quais foram usados parâmetros dos solos obtidos com ensaios laboratoriais.

O desenvolvimento da tese conduziu às seguintes conclusões:

- A construção do experimento com os dois sistemas de cobertura foi bem sucedida;
- O sistema de monitoramento foi instalado com sucesso, porém necessitou de diversos ajustes como:
  - ✓ Durante o período estudado foram realizadas apenas algumas medidas do escoamento superficial em função do entupimento contínuo do hidrômetro, provocado pelo mau funcionamento da caixa de retenção de finos, uma vez que a cobertura vegetal não estava completamente instalada sobre o experimento. Para resolver o problema, foi necessário instalar filtros (tela de nylon) na caixa de retenção de finos e um segundo hidrômetro na sua saída;
  - ✓ A medição da percolação realizada foi pouco precisa porque, muito provavelmente, os lisímetros coletaram água do lençol freático em função do mau funcionamento do canal de drenagem que circunda o experimento;
  - ✓ Houve alguns problemas na germinação das espécies vegetais no início do experimento fazendo com que a vegetação exercesse um papel secundário na cobertura;
- A calibração dos TDR e dos HDU exige que os instrumentos sejam instalados nos solos nas mesmas condições que trabalharão no campo. A calibração dos TDR foi executada com relativa facilidade, na RPM, em Paracatu, pois para isso basicamente era necessário um laboratório de solos que pudesse medir o teor de umidade gravimétrico de amostras de solo. Já a calibração rigorosa dos HDU exigia uma câmara na qual as amostras de solo deveriam ser submetidas a diferentes valores de sucção. Como não se dispunha dessa facilidade na RPM

onde estava o sistema de aquisição dos dados da instrumentação, a calibração dos HDU não pode ser feita de forma rigorosa.

- Os resultados dos ensaios de laboratório apresentaram comportamento esperado e condizente com a bibliografia consultada.
- Com relação às análises numéricas realizadas pode-se dizer:
  - ✓ Os dois sistemas de cobertura evapotranspirativos propostos praticamente não permitiram a passagem das águas pluviais para o rejeito;
  - ✓ Como também se quer evitar a passagem de oxigênio, o sistema de cobertura 1, que apresenta a camada de argila (barreira hidráulica), parece ser o que mais atende às necessidades da RPM;
  - ✓ As variações de umidade volumétrica com o tempo medidas no campo nas diferentes camadas dos dois sistemas de cobertura foram razoavelmente parecidas com as previstas pelo modelo numérico. Entretanto, ainda existem discrepâncias nos valores, de tal forma que, de uma forma geral no campo, os solos estão mais úmidos do que no modelo numérico.
  - ✓ Os escoamentos superficiais (run off) medidos no campo e calculados pelo modelo numérico ficaram razoavelmente parecidos, os de campo fornecendo maiores valores, muito provavelmente porque o sistema de medição não funcionou a contento o ano inteiro.
  - ✓ Ainda existem incertezas sobre os parâmetros da vegetação adotados uma vez, que em grande parte do tempo analisado, a vegetação ainda não estava instalada.

Como apresentado no capítulo 2 e nos itens acima, inúmeras são as variáveis que podem afetar o projeto de uma cobertura, mesmo que este tenha sido executado atendendo a todos os critérios da engenharia contemporânea. Sabe-se que o assunto de coberturas evapotranspirativas é recente e que ainda existem incertezas a serem esclarecidas, mas, mesmo assim, é imprescindível e indispensável que projetos de cobertura que se propõe a limitar a infiltração de água e/ou de oxigênio sigam as diretrizes consagradas no meio técnico internacional, atentando às especificidades locais, sob o risco de se investir grandes somas em dinheiro sem nenhuma garantia de sucesso.

Em resumo, em vista do exposto acima, conclui-se que o trabalho alcançou os objetivos propostos. Apresentam-se, a seguir, algumas sugestões para a continuidade dos trabalhos:

- Realizar sondagens a trado, um em cada camada de cobertura, para determinar a umidade no campo ao mesmo tempo em que se faz a sua leitura pelos instrumentos. Isso deve ser realizado no período de seca, e no período das chuvas.
- Realizar limpeza e aprofundamento da vala de drenagem das águas pluviais no entorno do experimento de forma a garantir que as águas pluviais não mais infiltrem lateralmente pelas camadas de cobertura, possibilitando que as leituras realizadas nos lisímetros sejam exclusivamente das águas que eventualmente infiltrem pela superfície da cobertura;
- Instalação de medidores de nível d'água (NA) que possibilitem a medição da profundidade do lençol freático, desta forma eliminando a incerteza sobre qual é a origem das águas que estão percolando pelos lisímetros;
- Execução de ensaios de campo para a determinação da condutividade hidráulica saturada do solo superficial com a utilização do permeâmetro de Guelph;
- Instalação de mais instrumentos de medição de umidade e sucção, estes últimos devidamente calibrados;
- Melhor definição dos parâmetros de vegetação para serem incorporados nas análises numéricas, uma vez que as espécies já estão completamente instaladas sobre o experimento;
- Calibração da estação meteorológica existente de forma que os dados climáticos sejam mais confiáveis, principalmente no que se refere à radiação solar;
- Verificar a possibilidade de se instalar instrumentos de medida para as águas de percolação (saída dos lisímetros) capazes de captar e medir pequenos volumes de água;
- Repetição de todos os procedimentos de monitoramento e análise por um período de, pelo menos, dois anos de tal forma que se passe por uma nova avaliação dos seus desempenhos por, no mínimo, mais dois períodos chuvosos;

Ajustes finais na calibração do modelo matemático de forma que atenda aos anseios da RPM, no sentido de que o modelo e metodologia adotada possam ser utilizados, com segurança, no dimensionamento de sistemas de coberturas para a mina.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHOU, T.; LIU, X. AND TAWFIQ, K. (2004). *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, 88 p.
- ABICHOU T. (2003). Technical Academic Meeting of Field Evaluation of Evapotranspiration Caps.
- ABICHOU, T. AND TAWFIQ K. (2001). “*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, pp.06
- ACAP – *Alternative Cover Assessment Program: Phase II Report*, (2001). Department of civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison, USA.
- AMABILE, R.F.; FANCELLI, A.L.; CARVALHO, A.M.(2000). Comportamento de espécies de adubos verdes em diferentes épocas de semeadura e espaçamentos na região dos cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.1, p.47-54.
- BENSON, C., ABICHOU, T., ALBRIGHT, W, G.GEE, AND ROESLER, A. (2001). *Field Evaluation of Alternative Earthen Final Covers*. International J. of Phytoremediation, Vol.3, P105-127.
- BENSON, C. (2000). *Liners and covers for waste containment*, in Proc. Fourth kansai International Geotechnical Forum, Creation of a New Geo-Environment, Japanese Geotechnical Society, Kyoto, Japan, 1-40.
- BENSON, C.H., DANIEL, D.E., AND BOUTWELL, G.P. (1999). “Field Performance of Compacted Clay Liners,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 5, pp. 390-403.
- BENSON, C. AND GRIBB, M. (1997). *Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field*. Unsaturated Soil Engineering Practice, GSP No. 68, ASCE, Houston, S. and Fredlund, C, Eds., 113-168.
- BENSON, C. H. AND KHIRE, M. V. (1995). “*Earthen Covers for Semiarid and Arid Climates*,” *Landfill Closures – Environmental Protection and Land Recovery*, ASCE, Geotechnical Special Publication, No. 53, R. Jeffrey Dunn and Udai P. Singh, Eds., New York, NY, p. 201-217.
- BEWS, B., WICKLAND, B., AND BARBOUR, S. (1999). *Lysimeter Design in Theory and Practice*, Tailing and Mine Waste '99, Balkema, Rotterdam, 13-21.



- CALEGARI, A. (1998). Leguminosas para adubação verde de verão no Paraná. Londrina: IAPAR, 118p. (IAPAR, Circular, 80)
- CARLSSON, E. (2002). *Sulphide-Rich Tailings Remediated by Soil Cover*, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
- CARRIER, W. D., BROMWELL, L. G., AND SOMOGYI, F (1983). Design Capacity of Slurried Mineral Waste Ponds, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 109, No. GT5, p. 699-716.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). *A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings*. Proceeding of the Institute of Civil Engineering.
- CHIU, T. AND SHACKELFORD, C. (2000). *Laboratory evaluation of sand underdrains*, J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE 126(1), 990-1002.
- CHIU T. AND SHACKELFORD C. (1994). Practical Aspects of the Capillary Barrier Effect for Landfills, *Proc. 17th Int Madison Waste Conference*, Dept. of Eng. Prof. Development, University of Wisconsin – Madison, 357 – 375.
- DIAS, L.E; PENEDO, A.P; RIBEIRO, E.S; MELO, R.; ASSIS, I.R. (2005). Revegetação de substratos sulfetados remanescentes da exploração de ouro em Paracatu-MG. *I Workshop Brasileiro sobre Drenagem Ácida de Minas – Nova Lima, Minas Gerais – CD-ROM*.
- DIAS, L.E. E RIBEIRO E.S. (2004). Revegetação de Áreas de Substrato B2 na Rio Paracatu Mineração S.A. em Paracatu – MG. *Relatorio Parcial de Atividades 03*. Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Solos, 32 p.
- DIAS, L.E.;CAMPELLO, E.F.C; RIBEIRO JR., E.S.; MELLO, J.W.V. (2000) Reconstrução topográfica e crescimento de leguminosas arbóreas e arbustivas em substrato contendo sulfetos metálicos In: IV Simpósio Nacional de Recuperação de Áreas Degradadas. *Silvicultura Ambiental*. Blumenau – SC, Cd-Rom.
- DWYER, F. S. (2003). *Water Balance Measurements and Computer Simulations of Landfill Covers* Doctoral Thesis, The University of New Mexico, USA.
- EPA (1999). “Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Permeable Reactive Barriers,” EPA/542/R-99/002, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C., 114 p.
- EPA (2001). “Reuse Assessments: A Tool to Implement the Superfund Land Use Directive,” OSWER Directive No. 9355.7-06P, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Remedial Response, Washington, D.C., 24 p.
- EPA (2002). “*Technical Guidance For RCRA/CERCLA Final Covers*”. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency

- Response, Washington DC.
- FAHL, J.I.; CAMARGO, M. B. P. De; PIZZINATTO, M. A.; BETTI, J. A.; MELO, A. M. T. de; De Maria, I. C.; FURLANI, A. M. C. et al. (Eds.) (1998). Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas. Campinas, Instituto Agrônomo, 6.ed. rev. atual. 396p. (Boletim 200)
- FREDLUND, D.; XING, A.; AND HUANG, S. (1994). *Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil – water characteristic curve*, Canad. Geotechn. J. 31, 533-546.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2002). *VADOSE/W User's Manual*, Version 1.01, Calgary, Alberta, Canada, September, 2001
- GUIMARÃES, L. M., (2008). Desenvolvimento De Um Permeômetro Para Determinação Da Condutividade Hidráulica Saturada E Não Saturada De Solos, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 64 p.
- HANSEN, J. B.; HOLM, P. E.; HANSEN; E. A. AND HJELMAR, O. (2000). “*Use of lysimeters for Characterization of Leaching from Soil and Mainly Inorganic Waste Materials*”, Nordest Technical Report 473, Hørsholm, Denmark.
- ITRC - The Interstate Technology & Regulatory Council, (2003), “*Technical and Regulatory Guidance for Design, Installation, and Monitoring of Alternative Final Landfill Covers*”, Alternative Landfill Technologies Team. [www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org).
- KISCH, M. (1959). The theory of seepage from clay-blanketed reservoirs. *Geotechnique* 9.
- LANGONI, G. (2002). *Feasibility of Evapotranspiration Covers for Florida Landfills*. M.S.Thesis, Florida State University, 100pp.
- LU, N. & LIKOS, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*, John Willey & Sons, New Jersey, 556p.
- MARINHO, F.A.M.; VIEIRA, A. M.; OLIVEIRA, O.M., (2005). *Aspectos da curva de calibração do TDR para um solo residual compactado*; Solos e Rochas, v. 28, n. 3, p.inicial 295, p.final 306, ISSN: 0103-7021, Impresso.
- MCCORD, J. AND STEPHENS, D. (1987). *Lateral moisture flow beneath a sandy hillslope without an apparent impeding layer*. J. Hydrol. Pro. 1(3), 225-238
- MEERDINK, J., BENSON, C., AND KHIRE, M. (1995). *Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils*, J. Geotech. Eng, ASCE 122(7), 565-576.
- MORRIS AND STORMONT (1997). *Capillarity Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency*, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 123,

- N. 1, p. 3-10.
- NYHAN, J. W.; HAKONSON, T. E.; AND DRENNON, B. J. (1993). A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions. *J. Environmental Quality*, 19:281- 288.
- O’KANE, M. AND BARBOUR, S. L. (2003). Predicting Field Performance of Lysimeters Used to evaluate Cover Systems for Waste. *6th ICARD*, Cairns, QLD, p. 327–339.
- PARENT, S-É. AND CABRAL, G.(2006). “*Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect*”, *Geotechnical and Geological Engineering* (2006) 24: 689–710, Department of Civil Engineering, Faculty of Applied Science, University of Sherbrooke, Quebec J1K 2R1, Canadá
- PARENT, S-É.; CABRAL, G.; A., G. AND MARINHO, F. (2005). “*Design and Installation of Zero-Tension Lysimeters in an Inclined Cover.*” *Geotechnical and Geological Engineering Journal*.
- QIAN, X.; KOERNER, R. M. AND GRAY, D. H. (2002). “Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction”, in *Michigan Department of Environmental Quality*, Waste Management Division, USA, p 399–437
- ROSS B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers, *Water Resources Research*, 26, 2625–2629.
- SAIC (2000). *Quality Assurance Project Plan, Alternative Cover Assessment Project*, Science Applications International Corp., Report to USEPA, Contract No. 68-C5-0036.
- SCANLON, B. AND MILLY, P. (1994). *Water and heat flux in desert soils*, 2, numerical simulations. *Water Resour. Res.* 30, 721 – 733.
- SRK Consulting. (2003). Rio Paracatu Mineração, Morro do Ouro, Closure Design Aspects, December 2003 *Site Visit Report. Report to Rio Paracatu Mineração S.A.*, Brazil. Project Number 1UR007.00, November.
- SRK Consulting Engineers and Scientists (2005). “Rio Paracatu Mineração, Morro do Ouro, *Conceptual Mine and Tailings Cover Design*”. Relatório interno da RPM.
- STEPHENS, D. 1996. *Vadose Zone Hydrology*, *Lewis Publishers*, Boca Raton, FL.
- STORMONT, J.C. STOCKTON, T. & RAY, C. (1999). “*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. 20p.
- TORNTHWAITE, C. W., (1948). “*An Approach toward a Rational Classification of Climate*”, *Geographic Review*, Vol. 38, pp. 89-99.

- TOPP, G., DAVIS, J., AND ANNAN, A. (1980). *Electromagnetic determination of soil water content*. Water Resour. Res. 16(3), 574-582.
- VAN BAVEL, C.H.M. (1961). *Lysimetric Measurements of Evapotranspiration in the Eastern United States*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 25: 138 – 141
- VIEIRA, ADERSON MARTHA (2005). Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos. *Tese Doutorado* - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 285 p.
- VILLAR, L. F. S.; CAMPOS, T. M. P. (2002). Obtaining the soil moisture characteristic curve of a highly compressible waste submitted to drying. *In: 3rd Int. Conf. Unsaturated Soils, UNSAT, 2002*, Recife, Pernambuco. Proc. 3rd Int. Conf. Unsaturated Soils, UNSAT, 2002.
- WUTKE, E.B. (1993). Adubação verde: manejo da fitomassa e espécies utilizadas no Estado de São Paulo. In: WUTKE, E.B.; BULISANI, E.A.; MASCARENHAS, H.A.A. (Coords.) *CURSO SOBRE ADUBAÇÃO VERDE NO INSTITUTO AGRONÔMICO*, Campinas: Instituto Agrônômico, p.17-29. (Documentos IAC, 35).
- XINGFA H.; VIRIYASENAKUL, V.; AND DECHAO, Z. (1999). “*Design, Construction and Installation of Filled-in Drainage Lysimeter and Its Applications*” Proceedings of 99 International Conference on Agricultural Engineering Beijing, China, December, 1999, pp. 162-168
- ZORNBERG, J.; LAFOUNTAIN, J.; CALDWELL, A. (2003). *Analysis and Design of Evapotranspiration Cover for Hazardous Waste Landfill*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 129, No.6. P427 – 438.