

THAIS SIMÕES COELHO DE SOUZA

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE COBERTURAS COM SOLO  
PARA UM LAGO DE REJEITO POR MEIO DE SIMULAÇÕES  
NUMÉRICAS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da  
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S729d  
2015 Souza, Thais Simões Coelho de, 1979-  
Dimensionamento de sistemas de coberturas com solo  
para um lago de rejeito por meio de simulações numéricas /  
Thais Simões Coelho de Souza. - Viçosa, MG, 2015.  
xiv, 79f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador : Roberto Francisco de Azevedo.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 75-79.

1. Drenagem ácida de minas. 2. Solos - Permeabilidade.  
3. Simulação (Computadores). 4. Análise numérica .  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.1514

## Ficha catalográfica

THAIS SIMÕES COELHO DE SOUZA

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE COBERTURAS COM SOLO  
PARA UM LAGO DE REJEITO POR MEIO DE SIMULAÇÕES  
NUMÉRICAS**

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

APROVADA: 9 de fevereiro de 2015

---

Izabel Cristina Duarte Azevedo  
Coorientadora

---

André Geraldo Cornélio Ribeiro

---

Igor Rodrigues de Assis

---

Roberto Francisco de Azevedo  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me concedeu na vida todas as condições e oportunidades necessárias para a realização deste trabalho;

A minha família, pelo apoio e incentivo para continuar nos estudos, em especial aos meus pais, pelo exemplo de vida e aos meus irmãos, pela amizade;

Ao Weber, pelo amor, pelo companheirismo, carinho, paciência nessa jornada;

A todos os meus amigos, em especial aos companheiros do mestrado, Bruna, Cleverson, Daniel e Eduardo, vocês tornaram tudo mais fácil;

Ao Paulo Capelão pela ajuda nos experimentos no laboratório;

Ao meu orientador, Prof. Roberto Francisco de Azevedo, pela paciência, dedicação e estímulo dado para que eu pudesse enfrentar os desafios encontrados nessa pesquisa;

A todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelos ensinamentos;

Aos Professores André Geraldo Cornélio Ribeiro e Igor Rodrigues de Assis, pelas valiosas contribuições nesse trabalho;

À CAPES pela bolsa que proporcionou a concretização desse curso de Mestrado;

A Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, pela oportunidade ímpar de obtenção de conhecimento.

## **BIOGRAFIA**

THAIS SIMÕES COELHO DE SOUZA, filha de Sônia Simões Coelho de Souza e Tarcísio de Souza, nasceu em Conselheiro Lafaiete-MG, em 20 de outubro de 1979.

Em 1997, concluiu o ensino médio no Colégio Nossa Senhora de Nazaré, em Conselheiro Lafaiete-MG.

Graduou-se Engenheira Ambiental, em setembro de 2011, pela Universidade Federal de Ouro Preto.

Concluiu o curso de Mestrado em Engenharia Civil na área de concentração em Geotecnia Ambiental, pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, em 2015.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE QUADROS.....	xi
1.1 – Considerações Gerais .....	1
1.2 – Objetivos .....	4
1.3 – Organização da Dissertação .....	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 – Introdução.....	6
2.2 – Drenagem Ácida de Mina (DAM) e Sistemas de Cobertura .....	7
2.3 – Tipos de coberturas de solo .....	8
2.3.1 – Camada superficial .....	8
2.3.2 – Cobertura de armazenamento e liberação de água .....	8
2.3.3 – Cobertura de barreira capilar .....	9
2.3.4 – Camada de barreira hidráulica .....	10
2.4 – Tipos de sistemas de coberturas feitos com solo.....	11
2.4.1 – Coberturas alternativas ou evapotranspirativas .....	13
2.5 – Vegetação .....	17
2.5.1 – Importância em Projetos de Cobertura.....	17
2.5.2 – Espécies de Plantas .....	17
2.5.3 – Crescimento Vegetativo.....	18
2.5.4 – Profundidade das Raízes .....	18
2.5.5 – Índice de Área Foliar .....	18

2.6 – Importância da interação solo-atmosfera .....	20
2.7 – Trabalhos sobre coberturas de solo realizados na RPM .....	22
<b>3 - MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
3.1 – Tipos de Solo e Rejeito .....	25
3.2 – Ensaio.....	26
3.2.1 – Ensaio de Caracterização .....	26
3.2.2 – Ensaio de Compactação .....	26
3.2.3 – Ensaio de Permeabilidade .....	27
3.2.4 – Ensaio de Sucção (Método do Papel Filtro) .....	29
3.2.5 – Método da Centrífuga .....	33
3.3 – Análise Numérica .....	33
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
4.1 – Granulometria .....	40
4.2 – Massas Específicas, Limites de Atterberg e Condutividade Hidráulica .....	42
4.3 – Ensaio de Compactação .....	43
4.4 – Curva de Retenção de Água .....	45
4.5 – Modelos Simulados.....	52
4.5.1 – Simulações Modelos 1 e 3 .....	52
4.5.2 – Simulações Modelos 2 e 4 .....	61
4.5.3 – Saturação nas camadas de barreira hidráulica nos Modelos 1, 2, 3 e 4 .....	69
<b>5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>6 - RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> - Massa específica, Limites de Atterberg e Condutividade Hidráulica dos materiais das coberturas.....	42
<b>Tabela 4.2</b> – Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo pelo Modelo de Fredlund e Xing (1994).....	45

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Localização da Mina Do Ouro (Kinross, 2014).....	2
<b>Figura 1.2:</b> Barragem Santo Antônio (Kinross, 2014).....	3
<b>Figura 2.1:</b> (a) Perfil esquemático de uma barreira capilar (b) Curvas de retenção de umidade de solo fino e granular (c) Curvas de condutividade hidráulica de solo fino e granular. (Ribeiro, 2011).....	9
<b>Figura 2.2:</b> Desenho esquemático de um sistema de cobertura prescritiva (convencional)-Solo 1(camada superficial); Solo 2 (camada barreira hidráulica)..	11
<b>Figura 2.3:</b> Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa (Ribeiro, 2011).....	14
<b>Figura 2.4:</b> Perfis de Coberturas Evapotranspirativas sem e com Barreira Capilar..	15
<b>Figura 3.1:</b> Solos utilizados nos ensaios.....	24
<b>Figura 3.2:</b> (a) Configuração do Ensaio no Permeâmetro; (b) Ensaio em funcionamento.....	27
<b>Figura 3.3:</b> Compactação das amostras no anel de PVC. (Ribeiro, 2011).....	29
<b>Figura 3.4:</b> (a) Corpos de Prova para Ensaio do Papel Filtro; (b) Saturação dos Corpos de Prova para o Ensaio do Papel Filtro.....	30
<b>Figura 3.5:</b> Detalhes da preparação dos corpos de prova (Guimarães, 2013).....	31
<b>Figura 3.6:</b> Equipamentos usados na centrífuga e posição dos mesmos na centrífuga.....	33
<b>Figura 3.7:</b> Variação do Índice de Área Foliar com o Tempo.....	34
<b>Figura 3.8:</b> Variação do Ponto de Murcha com o Tempo.....	34
<b>Figura 3.9:</b> Profundidade da Raiz com o Tempo.....	35
<b>Figura 3.10:</b> Precipitação entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).....	36
<b>Figura 3.11:</b> Temperatura Máxima e Mínima entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).....	36
<b>Figura 3.12:</b> Umidade Média Relativa entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).....	37

<b>Figura 3.13:</b> Velocidade do Vento entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).....	37
<b>Figura 4.1:</b> Granulometria Solo.1.....	40
<b>Figura 4.2:</b> Granulometria Solo 2.....	40
<b>Figura 4.2:</b> Granulometria Solo 3.....	41
<b>Figura 4.4:</b> Granulometria Rejeito.....	41
<b>Figura 4.5:</b> Curva de Compactação Solo 1.....	43
<b>Figura 4.6:</b> Curva de Compactação Solo 2.....	43
<b>Figura 4.7:</b> Curva de Compactação Solo 3.....	44
<b>Figura 4.8:</b> Curva de Compactação Rejeito.....	44
<b>Figura 4.9:</b> Curva de Retenção de Água - Solo 1 ( <i>Topsoil</i> ).....	46
<b>Figura 4.10:</b> Curva de Retenção de Água - Solo 2 (Camada de Armazenamento e Liberação).....	46
<b>Figura 4.11:</b> Curva de Retenção de Água - Solo 3 (BH) .....	47
<b>Figura 4.12:</b> Curva de Retenção de Água - Rejeito.....	47
<b>Figura 4.13:</b> Curva de Condutividade Hidráulica - Solo 1 ( <i>Topsoil</i> ).....	48
<b>Figura 4.14:</b> Curva de Condutividade Hidráulica - Solo 2 (Camada de Armazenamento e Liberação).....	49
<b>Figura 4.15:</b> Curva de Condutividade Hidráulica - Solo 3 (Barreira Hidráulica).....	49
<b>Figura 4.16:</b> Curva de Condutividade Hidráulica - Rejeito.....	50
<b>Figura 4.17:</b> Curva de Condutividade Hidráulica - ( <i>Topsoil</i> ) - Cobertura Prescritiva.....	50
<b>Figura 4.18:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo - ( <i>Topsoil</i> ) - Modelo 1.....	51
<b>Figura 4.19:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo - ( <i>Topsoil</i> ) - Modelo 3.....	51
<b>Figura 4.20:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo - (Camada de Armazenamento e Liberação) - Modelo 1.....	52

<b>Figura 4.21:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Camada de Armazenamento e Liberação) - Modelo 3.....	53
<b>Figura 4.22:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Barreira Hidráulica) - Modelo 1.....	54
<b>Figura 4.23:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Barreira Hidráulica) - Modelo 3.....	54
<b>Figura 4.24:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Rejeito) - Modelo 1.....	55
<b>Figura 4.25:</b> : Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Rejeito) - Modelo 3.....	56
<b>Figura 4.26:</b> Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014-Modelo 1.....	56
<b>Figura 4.27:</b> Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014-Modelo 3.....	57
<b>Figura 4.28:</b> Figura 4.29: Relação Umidade Volumétrica x Profundidade - Modelo 1.....	57
<b>Figura 4.29:</b> Relação Umidade Volumétrica x Profundidade - Modelo 3.....	58
<b>Figura 4.30:</b> Relação Vazão na Base da Camada de Rejeito x Tempo - Modelo 1.....	58
<b>Figura 4.31:</b> Relação Vazão na Base da Camada de Rejeito x Tempo - Modelo 3.....	59
<b>Figura 4.32:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo - ( <i>Topsoil</i> ) - Modelo 2.....	60
<b>Figura 4.33:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo - ( <i>Topsoil</i> ) - Modelo 4.....	60
<b>Figura 4.34:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo - (Barreira Hidráulica) - Modelo 2.....	61
<b>Figura 4.35:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo - (Barreira Hidráulica) - Modelo 4.....	62
<b>Figura 4.36:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo - (Rejeito) - Modelo 2.....	63
<b>Figura 4.37:</b> Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Rejeito) - Modelo 4.....	63
<b>Figura 4.38:</b> Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014 - Modelo 2.....	64
<b>Figura 4.39:</b> Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014 - Modelo 4.....	64

<b>Figura 4.40:</b> Relação Umidade Volumétrica x Profundidade no ano de 2014-Modelo 2.....	65
<b>Figura 4.41:</b> Relação Umidade Volumétrica x Profundidade no ano de 2014-Modelo 4.....	66
<b>Figura 4.42:</b> Relação Vazão na Base da Camada de Rejeito x Tempo - Modelo 2.....	66
<b>Figura 4.43:</b> Relação Vazão na Base da Camada de Rejeito x Tempo - Modelo 4...67	
<b>Figura 4.44:</b> Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo 1.....	68
<b>Figura 4.45:</b> Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo 3.....	68
<b>Figura 4.46:</b> Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo 2.....	69
<b>Figura 4.47:</b> Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo 4.....	69

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 3.1</b> - Modelos numéricos inseridos no Vadose/W.....	39
--	----

## RESUMO

**SOUZA, Thais Simões Coelho de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2015. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE COBERTURAS COM SOLO PARA UM LAGO DE REJEITO POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadora: Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

A Drenagem Ácida de Mina (DAM) é um dos principais problemas ambientais de algumas minerações nas quais minerais sulfetados são expostos à ação do oxigênio e da água na presença ou não de bactérias oxidantes. Trata-se de um efluente caracterizado pela elevada acidez e pelas altas concentrações de metais lixiviados como As (arsênio), Al (alumínio), Cu (cobre), Fe (ferro), Mg (magnésio), Mn (manganês) e Zn (zinco). Por isso, propõe-se como uma possível ação para descomissionar os reservatórios das barragens, a utilização de um sistema de cobertura de solo capaz de reduzir a infiltração de água e a entrada de oxigênio nas mesmas, evitando assim a formação da DAM, que é um processo, que uma vez iniciado, pode continuar a produzir drenagem contaminada ao longo de décadas ou mesmo séculos após a mineração ter encerrado suas atividades. O objetivo desse trabalho é a aplicação de uma metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura de solos que utiliza modelos numéricos implementados no software VADOSE/W, determinar se os solos e o rejeito utilizados nas simulações servem para a construção de modelos reais de sistemas de coberturas para análises em campo e ainda, quais modelos são os melhores para ser implantados, verificar a influência do nível d'água nos sistemas simulados, verificar a entrada de oxigênio no sistema a partir do levantamento do grau de saturação nas camadas barreira hidráulica nos modelos simulados. Três solos e um rejeito foram disponibilizados por uma mineradora de ouro e caracterizados em laboratório, juntamente com parâmetros climáticos diários e análises paramétricas são os parâmetros de entrada dos modelos. Assim, o presente trabalho apresenta os principais resultados dos ensaios de laboratório, detalhes das análises numéricas, bem como os perfis de umidade, sucção, saturação e vazão nos solos do sistema de cobertura no período compreendido entre Janeiro de 2013 e Dezembro de 2014. Foram simulados modelos de sistemas de coberturas evapotranspirativas e prescritivas, quatro, no total. O nível d'água foi a condição de contorno modificada que permitiu a comparação entre os modelos. Um modelo prescritivo e um outro evapotranspirativo foram escolhidos como os melhores para ser implantados. Ao se considerar somente termos econômicos, o prescritivo é

melhor para ser implantado. No entanto, em termos de eficiência a longo prazo, apesar de um custo maior para ser implantado, o modelo evapotranspirativo é melhor.

## ABSTRACT

SOUZA, Thais Simões Coelho de, M.Sc., University Federal of Viçosa, February 2015. **ROOFING SYSTEMS SIZING WITH SOIL FOR A WASTE LAKE BY SIMULATIONS NUMBER.** Advisor: Roberto Francisco de Azevedo. Co-advisor: Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

The Acid Mine Drainage (AMD) is one of the main environmental problems of some mines in which sulphide minerals are exposed to the action of oxygen and water in the presence or absence of oxidizing bacteria. It is an effluent wherein the acidity and the high concentration of metals leached as As (arsenic), Al (aluminum), Cu (Copper), Fe (iron), Mg (magnesium), Mn (manganese) and Zn (zinc). Therefore, it is proposed as a possible action to decommission the dams of reservoirs, use of a ground cover system capable of reducing the infiltration of water and oxygen from entering therein, thereby preventing the formation of the DAM, which is a process that once started, can continue to produce contaminated drainage for decades or even centuries after mining has ended its activities. The objective of this work is the application of a methodology for scaling solos roofing systems using numerical models implemented in the VADOSE/W software, to determine whether the soil and the waste used in the simulations serve to build real models roofing systems for analysis in the field and also which models are best to be deployed, check the influence of the water level in the simulated systems, check the oxygen from entering the system from lifting the degree of saturation in the hydraulic barrier layers in simulated models. Three soil and waste were made available by a gold mining and characterized in the laboratory, together with the daily climate parameters and parametric analyzes are the input parameters of the models. Thus, this paper presents the main results of laboratory tests, details of the numerical analysis and the moisture profiles, suction, saturation and flow in the cover system of soils in the period between January 2013 and December 2014 were simulated models of evapotranspiration and prescriptive roofing systems, four in total. The water level was adjusted boundary conditions that allowed a comparison of the models. A prescriptive model and another evapotranspiration were chosen as the best to be deployed. When considering only economic terms, the prescriptive is better to be deployed. However, in terms of long term effectiveness, although a higher cost to be deployed, the best model is evapotranspiration.

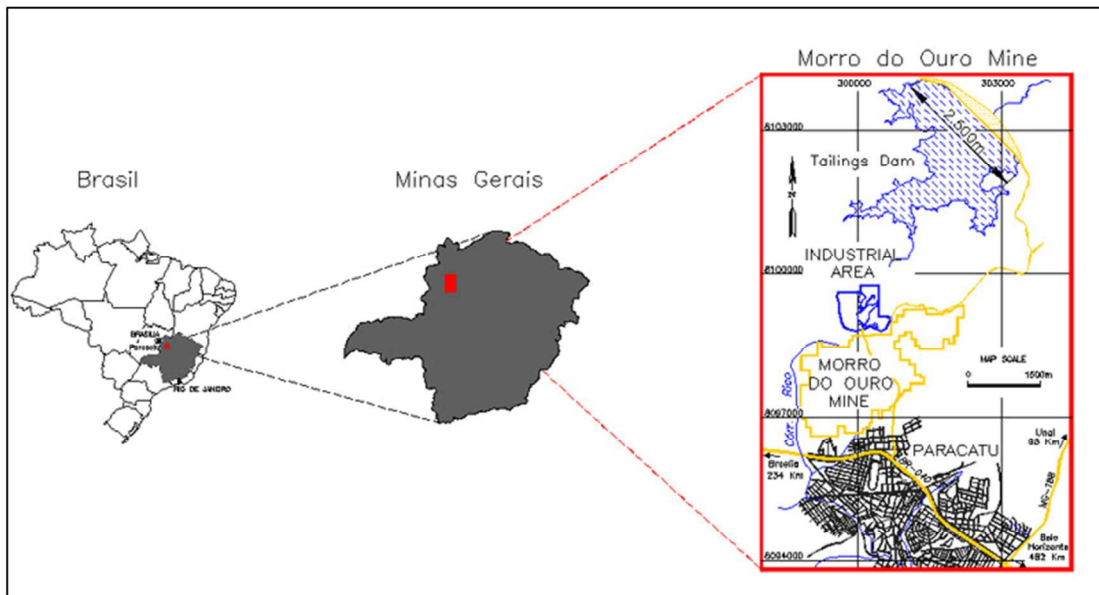
# **1- INTRODUÇÃO**

## **1.1 – Considerações Gerais**

O Brasil produz um grande número de substâncias minerais, e mesmo que a atividade mineral tenha sofrido uma redução em relação às expectativas de crescimento devido à crise internacional ainda se encontra em franca expansão (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO-IBRAM, 2012).

A Produção Mineral Brasileira (PMB) ganhou um impulso a partir dos anos 2000, principalmente por causa do aumento do índice de crescimento mundial, que resultou no aumento da demanda por recursos minerais. Em 2011, com uma produção de 66 toneladas, o Brasil foi considerado o décimo terceiro maior produtor de Ouro, segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2012). A Kinross, com 29 % da produção de ouro, se encontra entre as principais empresas produtoras no Brasil. A unidade da Kinross em Paracatu, na época Rio Paracatu Mineração (RPM), iniciou suas atividades de mineração de ouro em 1987 (IBRAM, 2012).

A mina a céu aberto (Morro do Ouro) está localizada a menos de 2 km ao norte da cidade de Paracatu, tem o menor teor aurífero do mundo (0,40 gramas de ouro por tonelada de minério) e por causa do investimento da empresa em tecnologias de extração produz, em média, 15 toneladas por ano. O local possui além da mina, duas usinas e duas bacias de rejeito e infraestrutura superficial. A localização da Mina Morro do Ouro é apresentada na Figura 1.1.



**Figura 1.1: Localização da Mina Morro do Ouro (Kinross, 2014).**

A mina atingiria a exaustão em 2016. No entanto, após a realização de pesquisas, constatou-se a existência de reservas antes desconhecidas do minério no município, o que originou a decisão de realizar investimentos que visam a ampliação das atividades de mineração mantidas pela empresa em Paracatu. Por isso, a vida útil da mina se estendeu até 2040 (KINROSS, 2014).

Um dos principais problemas ambientais associados à mineração de ouro é a Drenagem Ácida de Mina (DAM) que resulta da oxidação do enxofre (no estado reduzido) existente nas espécies minerais associadas ao minério quando expostas à ação do oxigênio e da água na presença ou não de bactérias oxidantes. Trata-se de um efluente caracterizado pela elevada acidez e pelas altas concentrações de metais como As (Arsênio), Al (alumínio), Cu (cobre), Fe (ferro), Mg (magnésio), Mn (mangânês) e Zn (zinco), além de ânions sulfato. Caso esse efluente alcance corpos hídricos, pode contaminá-los, tornando-os impróprios para o uso por um longo tempo, mesmo depois de cessadas as atividades de mineração (AMORIM, 2008).

Por isso, é fundamental promover a disposição adequada dos resíduos nas operações da mina de ouro com o intuito de impedir que as superfícies de rejeitos e/ou estéreis que contém minerais sulfetados fiquem expostas às condições oxidantes em presença de água para a prevenção e minimização da DAM.

Sabe-se que a reabilitação ambiental é uma das ferramentas da desativação de um empreendimento e começa a fazer parte de todos os projetos de mineração em função de

exigências legais. Um dos quesitos impostos ao minerador, para a obtenção da licença ambiental de operação, é a apresentação do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), que estabelece, em linhas gerais, os programas de recuperação a serem adotadas durante a lavra e após a exaustão da jazida (LOTT, 2004).

Assim, propõe-se como uma possível ação para descomissionar os reservatórios das barragens, a utilização de um sistema de cobertura de solo capaz de reduzir a infiltração de água e a entrada de oxigênio nas mesmas, evitando assim a formação da DAM, que é um processo, que uma vez iniciado, pode continuar a produzir drenagem contaminada ao longo de décadas ou mesmo séculos após a mineração ter encerrado suas atividades (The International Network for Acid Prevention-INAP, 2014). As coberturas secas têm sido estudadas como alternativa de prevenção, visto que a remediação tem se mostrado de custo elevado (Abreu, 2012). O custo de remediação da DAM em minas abandonadas na América do Norte foi estimado em dezenas de milhares de milhões de dólares (INAP, 2014). No estudo, em questão, o que se pretende é impedir ou diminuir a percolação da água dentro do sistema de modo que ela não chegue ao rejeito gerador de drenagem ácida, com uma abordagem hidromecânica do problema (problema de engenharia), por isso as coberturas são usadas. Esse processo de descomissionamento se iniciará na Barragem Santo Antônio, apresentada na Figura 1.2 a seguir, pois nela já foi realizado o último alteamento, além da mesma se encontrar em processo de fechamento.



**Figura 1.2: Barragem de rejeitos Santo Antônio (Kinross, 2014).**

O caso mais simples (ou seja, o projeto de uma cobertura convencional) é avaliado primeiramente durante a fase de projeto conceitual de um sistema de coberturas, e, em

seguida, a complexidade do sistema aumenta (número de camadas, inclusão de geotêxteis, etc.) até que se cumpram os objetivos de projeto desejados. Em geral, o aumento da complexidade na concepção de um sistema de cobertura implica em um maior desempenho sistema de cobertura, mas também significa, normalmente, um aumento dos custos e um aumento na complexidade da construção do sistema de coberturas (INAP, 2014). Por isso, no presente trabalho, são apresentados Modelos convencionais e evapotranspirativos, o que, na prática, permite avaliar a viabilidade econômica de cada um, uma vez que a quantidade de material e a disponibilidade in-situ são fatores que influenciam no custo final de um projeto de sistemas de cobertura. Assim, a importância da simulação de Modelos numéricos computacionais se justifica, pois possibilita a implantação de projetos mais eficientes em campo.

## **1.2 – Objetivos**

O objetivo desse trabalho é a aplicação de uma metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura de solos que utiliza modelos numéricos implementados no software VADOSE/W.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver modelos numéricos unidimensionais dos sistemas de cobertura de solos para um lago de rejeitos, usando o programa VADOSE/W do pacote GEOSTUDIO®, com a utilização de dados geotécnicos referentes a três tipos de solos e a um rejeito em associação com as análises paramétricas realizadas por RIBEIRO (2011).
- Determinar se os solos e o rejeito utilizados nas simulações servem para a construção de modelos reais para análises em campo e ainda, quais Modelos são os melhores para ser implantados.
- Verificar a influência do nível d'água nos sistemas simulados.
- Verificar a entrada de oxigênio no sistema a partir do levantamento do grau de saturação nas camadas barreira hidráulica nos modelos simulados.

## **1.3 – Organização da Dissertação**

Esta Dissertação foi dividida em seis capítulos:

- No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta-se uma breve revisão sobre sistemas de cobertura de solos, trabalhos sobre análises numéricas de sistemas de cobertura, bem como trabalhos anteriormente desenvolvidos na Kinross, em Paracatu.

- No Capítulo 3, Materiais e Métodos, descrevem-se primeiramente a concepção do experimento: os ensaios de laboratório para determinação dos parâmetros dos solos, estudos feitos para determinar alguns parâmetros dos Modelos numéricos dos sistemas de coberturas.
- No Capítulo 4, Apresentação e Discussão dos Resultados, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos em todas as fases do trabalho, compreendendo desde os resultados dos ensaios iniciais de caracterização e determinação dos parâmetros dos solos, das análises paramétricas e os resultados obtidos com os Modelos numéricos.
- No Capítulo 5, Conclusões, apresentam-se as conclusões obtidas no trabalho.
- Por fim, no Capítulo 6, Recomendações e Sugestões, apresenta-se um pequeno histórico do estudo das interações químicas nos solos e a importância das mesmas para definir o comportamento dos mesmos.

São apresentadas também as referências bibliográficas utilizadas, que serviram como subsídio para as informações contidas nesta Dissertação.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 – Introdução**

A mineração causa influência na paisagem de uma região, seja pela lavra a céu aberto, seja pela deposição de rejeitos e estéreis ou ainda pela subsidência de terrenos devido à lavra subterrânea. Porém, não são somente os impactos visuais que são considerados no processo de elaboração de um plano de descomissionamento de uma planta minerária. Neste devem ser considerados todos os impactos capazes de interferir nas características originais do meio ambiente e também nas condições socioeconômicas da região. A princípio, em uma condição ideal, esse plano deve ser elaborado na fase inicial do Projeto de Exploração e conter medidas preventivas e corretivas acerca dos impactos que serão gerados (técnicas de recuperação de áreas degradadas que serão utilizadas, detalhamento das estratégias de mitigação, condições específicas do local em que o empreendimento será instalado, previsão sobre o uso futuro da área) (OLIVEIRA FILHO, 2009).

O objetivo do descomissionamento é a reabilitação ambiental da área minerada, através de uma tarefa multidisciplinar que pode ser concebida para projetos de lavra, minas em operação, minas abandonadas ou em vias de esgotamento de reservas.

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. Logo, 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, PAFEM e PRAD), nos compromissos formalizados durante o processo de licenciamento ambiental e em consultas junto à comunidade. Sob o enfoque restrito da empresa mineradora, 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 (AMORIM, 2008).

Se as fases de implantação e operação das minas têm um enquadramento legal bem definido, o mesmo não se pode dizer da fase de desativação das minas. Ainda é incipiente no país a contabilização do passivo ambiental decorrente de atividades minerárias (Sánchez, 2001). Por isso, os problemas da recuperação de áreas degradadas e reutilização do terreno devem ter posição de destaque no processo de descomissionamento. A possibilidade de um

novo uso para a área demanda que a mesma apresente 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.

A conscientização quanto à gravidade, ao risco e a proporção dos custos associados ao passivo ambiental herdado das gerações passadas tem crescido, principalmente a partir da década de 80. A necessidade dessa recuperação está inserida na Constituição Federal Brasileira de 1988, no Artigo 225, “§ 2º - Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei.” Por isso existe a necessidade de uma demanda por garantias financeiras para 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.

Com base neste contexto, o presente capítulo apresenta uma breve revisão de sistemas de coberturas construídos com solo, a influência e importância da vegetação nos projetos das coberturas e o uso de modelagem numérica em sistemas de cobertura, visto que os sistemas de coberturas são uma das tecnologias mais utilizadas no processo de descomissionamento de minas com ocorrência de DAM.

## **2.2 – Drenagem Ácida de Mina (DAM) e Sistemas de Cobertura**

Minerais sulfetados podem ser expostos na superfície durante a disposição de rejeitos e estéreis em minerações. Quando isso acontece, a partir da interação desse tipo de material sulfetado com a água e o oxigênio presente na atmosfera, e com a presença de bactérias como a *Acidithiobacillus ferroxidans*, pode surgir a Drenagem Ácida de Mina (DAM) (MORAES, 2010). O ácido sulfúrico produzido nessa reação de oxidação pode contaminar as águas superficiais e subterrâneas em comunidades próximas ao local da mina, se medidas preventivas e de controle não são tomadas. Por isso, é fundamental limitar a acessibilidade de água e oxigênio para o resíduo e, com isso, reduzir a produção de DAM.

Naturalmente, cobrir os resíduos com uma camada de solo com baixa condutividade hidráulica limita a acessibilidade de água aos mesmos. Além disso, quando a cobertura de solo está com o conteúdo de água próximo da sua saturação, a acessibilidade de oxigênio também é restrita. Assim, uma cobertura de solo de granulação fina com condutividade hidráulica baixa e grau de saturação alto, reduz simultaneamente o ingresso de água e oxigênio aos resíduos (YANFUL *et al.*, 2006).

Os objetivos de uma cobertura do solo irão variar de local para local, mas geralmente incluem: (i) controle de particulados e erosão; (ii) estabilização química da drenagem ácida de

mina (através do controle da entrada de oxigênio e de água); (iii) controle da liberação de contaminantes (através da melhoria da qualidade da água da enxurrada e controle da infiltração); e / ou (iv) serve como um meio de crescimento e estabelecimento de vegetação sustentável (INAP, 2014).

Um dos desafios para a construção de um sistema de cobertura com solos para resíduos geradores de DAM acima do lençol freático é a manutenção de um elevado grau de saturação da cobertura mesmo nos períodos de seca. Para que isso aconteça, tanto a drenagem descendente da água contida nos poros das camadas de solo do sistema de cobertura em direção aos resíduos quanto a evaporação ascendente desta água em direção à atmosfera devem ser impedidos ou ao menos minimizados.

Explicações recentes apresentadas com base em 10 a 15 anos de dados de desempenho de coberturas indicam que embora elas não impeçam, totalmente, a infiltração de água e a oxidação do sulfeto contribuem para a redução da oxidação (DAM e lixiviação de metais) e, isso, pode ser suficiente para cumprir as metas do projeto e, no mínimo, pode reduzir os requisitos de tratamento de água (INAP, 2014).

A escolha dos solos a serem usados no sistema de cobertura deve ser apropriada e recomenda-se um estudo aprofundado sobre os processos hidráulicos que regem o fluxo em meios porosos (NICHOLSON et al.,1991).

## **2.3 – Tipos de coberturas de solo**

Nesse item apresentam-se os principais tipos de coberturas utilizados atualmente.

### **2.3.1 – Camada superficial**

Utilizada sobre barragens que apresentam rejeitos inertes, isto é, sem potencial de geração de DAM ou de lixiviação de metais, e que naturalmente não necessitam de cobertura para evitar estes problemas. Essa camada superficial é colocada sobre o rejeito com o objetivo de permitir a trafegabilidade, sustentação da vegetação e/ou controle de erosão e poeira. É formada de uma camada orgânica superficial de solo denominada *topsoil*.

### **2.3.2 – Cobertura de armazenamento e liberação de água**

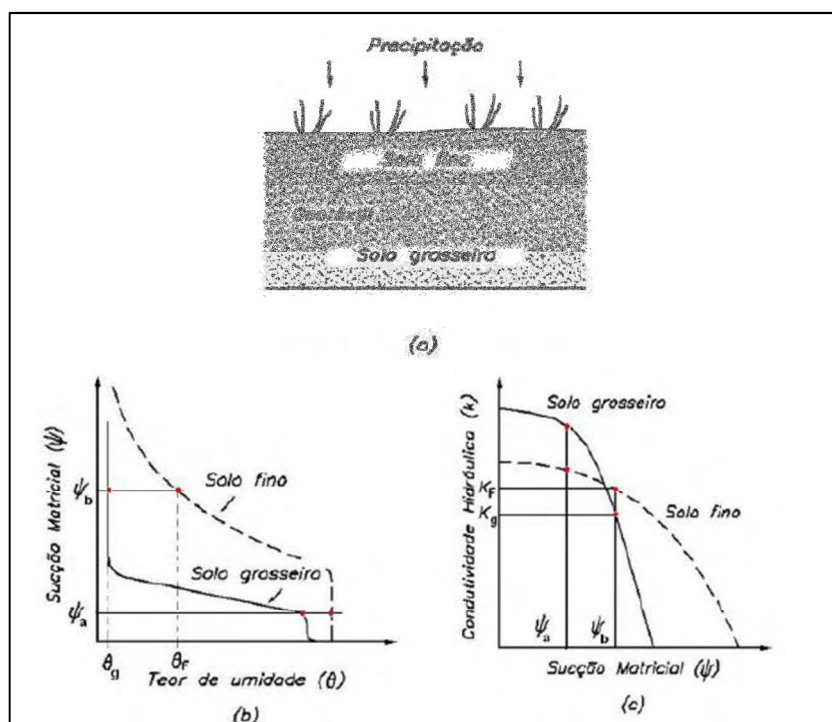
Uma cobertura de armazenamento e liberação tem a capacidade de acumular a água de infiltração durante o período chuvoso e liberá-la de volta para a atmosfera por evapotranspiração durante os períodos de seca. Ela deve ter uma espessura adequada para

impedir que o acréscimo de umidade durante o período de armazenamento não alcance a sua base, pois, caso isso aconteça, a água poderá atingir os resíduos. Esta capacidade de armazenamento é função do tipo de solo, da espessura da camada e das condições meteorológicas locais (é apropriada a regiões de clima seco ou em que a taxa anual de evaporação excede a taxa de precipitação).

Esta cobertura consiste de uma camada de solo bem graduado sobreposta a uma camada de solo orgânico próprio para o desenvolvimento de vegetação. A água que infiltra na cobertura durante o período chuvoso é provisoriamente armazenada dentro da camada de solo bem graduado. Posteriormente, durante o período seco, a água armazenada é removida da cobertura pelos processos de evaporação e evapotranspiração das plantas (JUNQUEIRA et al, 2011).

### 2.3.3 – Cobertura de barreira capilar

A barreira capilar consiste de uma camada de material granular, sobreposta por uma camada de material fino. Como a capacidade drenante do material granular é muito maior do que a do material fino da cobertura, o material granular da base torna-se não saturado muito mais rapidamente que a camada de material fino acima dele. Em condições não saturadas e elevados valores de sucção, a condutividade hidráulica do material granular torna-se muito baixa com valores menores do que a do material fino no topo da cobertura, formando uma barreira capilar de baixíssima condutividade hidráulica que impede a infiltração de água (DUARTE, 2012).



**Figura 2.1:** (a) Perfil esquemático de uma barreira capilar (b) Curvas de retenção de umidade de solo fino e granular (c) Curvas de condutividade hidráulica de solo fino e granular. (Adaptado de Abichou *et al.*, 2004) - (Ribeiro, 2011).

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), barreira capilar é um fenômeno que propicia uma redução drástica no fluxo de água a partir da camada superior. Esse tipo de cobertura requer uma avaliação cuidadosa das características do solo granular da base e fino do topo, uma vez que o desenvolvimento do efeito de barreira capilar depende diretamente das diferenças granulométricas e hidráulicas dos dois tipos de materiais.

#### 2.3.4 – Camada de barreira hidráulica

Esta camada consiste da construção de uma camada compactada de solo argiloso de baixa permeabilidade sobre o material a ser coberto. Esse tipo de cobertura requer medidas de controle de erosão e é bastante susceptível a degradação de desempenho associado com o surgimento de rachaduras no solo (BENSON *et al.*, 2007; TIMMS E BENNET, 2002).

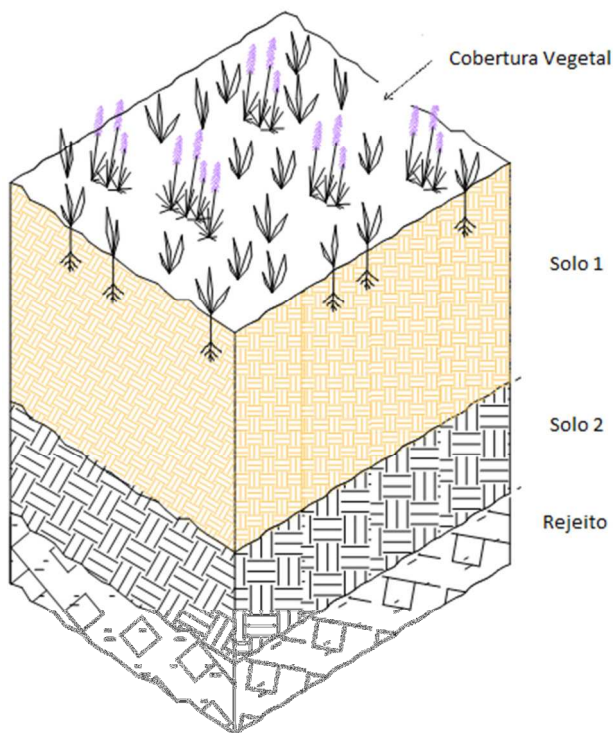
A camada de barreira hidráulica tem como função minimizar a percolação da água através do sistema e indiretamente promover a drenagem ou armazenagem da água em camadas superiores, aumentando a evapotranspiração e o escoamento superficial (Ribeiro, 2011). Quando saturada ou perto da saturação, a barreira hidráulica minimiza, também, a percolação de gases. Todavia, camadas de argilas compactadas podem exibir trincas ou

fissuras causadas por ressecamento ou por recalques diferenciais que, facilmente, acresceriam a condutividade hidráulica da camada barreira.

#### **2.4 – Tipos de sistemas de coberturas feitos com solo**

Os sistemas de coberturas com solo resultam da conjugação dos tipos de coberturas apresentados no item anterior.

Os sistemas de coberturas convencionais (prescritivas) utilizam camadas com baixa condutividade hidráulica que minimizam a infiltração de água e maximizam o escoamento superficial e a evaporação. Basicamente, são compostos por: uma camada para controle de erosão e plantio (normalmente feita com solo orgânico), aplicada sobre uma camada de material de baixa condutividade hidráulica (barreira hidráulica ou camada barreira) 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. Segundo a US Environmental Protection Agency (EPA, 1999), a experiência tem mostrado que este tipo de cobertura pode apresentar vulnerabilidades e limitações, como: mau funcionamento causado pelo ressecamento e conseqüente fissuramento da camada barreira; grandes investimentos para a sua construção e manutenção; durabilidade, seu desempenho pode piorar com o tempo devido à degradação pela erosão superficial, etc. As vantagens se encontram no menor custo devido ao uso de uma menor quantidade de material e ao menor tempo na execução do projeto, pois apresenta um menor número de camadas (Figura 2.2).



**Figura 2.2: Desenho esquemático de um sistema de cobertura prescritiva (convencional)-Solo 1(camada superficial); Solo 2 (camada barreira hidráulica).**

A camada superficial permite o crescimento de cobertura vegetal que, além de contribuir com a evapotranspiração, 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. No entanto, em regiões áridas, é muito difícil estabelecer e manter uma vegetação consistente na superfície do sistema de cobertura. Em tais condições, tem sido utilizada uma camada de cascalho para substituir a camada de cobertura vegetal. Dependendo da granulometria, o cascalho pode ser altamente resistente à erosão provocada pelo vento e/ou pela chuva (AMORIM, 2008).

A camada de drenagem de líquidos, se existir, tem duas funções: redução da carga hidráulica sobre a camada barreira, minimizando assim a infiltração; drenagem da água que infiltra pela camada superficial, permitindo a absorção de maior volume de água e, por conseguinte, a diminuição do escoamento superficial. Os materiais utilizados nas camadas de drenagem são solos sem coesão (areias e cascalhos) e ou geossintéticos (Qian et al., 2002). Se a camada de drenagem é feita de solo é recomendada espessura e inclinação mínimas de, respectivamente, 30 cm e 4 % e coeficiente de permeabilidade maior que  $1 \times 10^{-2}$  cm/s.

A camada de barreira hidráulica (camada barreira) pode ser considerada a mais crítica no sistema de coberturas prescritivas e tem como função minimizar a percolação da água

através do sistema e indiretamente promover a drenagem ou armazenagem da água em camadas superiores, aumentando a evapotranspiração e o escoamento superficial. O ressecamento ou os recalques diferenciais que, por ventura existam, aumentariam significativamente a condutividade hidráulica da camada barreira e, conseqüentemente, diminuiriam a sua efetividade. Quando trabalha saturada ou próxima da saturação, impede, também, a percolação de gases (AMORIM, 2008).

Os Modelos 2 e 4 apresentados nesse trabalho exibem essa configuração.

#### 2.4.1 – Coberturas alternativas ou evapotranspirativas

Os sistemas de cobertura evapotranspirativa consistem, normalmente, em uma camada superficial para controle de erosão e plantio 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; e, se for necessário, uma camada de solo com granulometria mais grosseira (barreira capilar). Essa barreira capilar pode vir a ser construída sobre uma camada de fundação conforme instruções contidas em projeto. As principais características de uma cobertura evapotranspirativa são:

1. Funcionam como estruturas naturais;
2. Possuem maior vida útil;
3. Têm manutenção mais fácil;
4. Têm menor custo de implantação.

A camada 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 alcance a sua base, uma vez que, se isso acontecer, a água poderá chegar aos resíduos. Esta capacidade de armazenamento é função do tipo de solo, da espessura da camada e das condições meteorológicas locais.

Nos Estados Unidos, para que haja aprovação pelas agências reguladoras do projeto de uma cobertura evapotranspirativa, é necessário avaliar se existe equivalência hidráulica entre o desempenho dessa cobertura e o de uma cobertura convencional (EPA, 2002). A equivalência hidráulica demanda que a percolação gerada a partir da base da cobertura

evapotranspirativa seja menor ou igual àquela que seria gerada pela cobertura convencional ou prescritiva. A medida da percolação é realizada através de lisímetros instalados logo abaixo da última camada do sistema de cobertura.

Enquanto o desempenho das coberturas convencionais decresce com o tempo em consequência do ressecamento e erosão, o desempenho das coberturas alternativas tende a melhorar com o tempo, porque as raízes tendem a se desenvolver horizontal e verticalmente, estabilizando a vegetação e aumentando a transpiração e a proteção contra a erosão. A expectativa de vida de uma cobertura evapotranspirativa é de milhares de anos, porque elas estão mais próximas do que ocorre normalmente na natureza. Para o caso das coberturas convencionais, a vida útil é incerta (LANGONI, 2002).

Na cobertura evapotranspirativa a vegetação tem papel fundamental, uma vez que as raízes são as principais responsáveis por retirar a água armazenada nos solos destas coberturas (ABICHOU et al., 2004).

O princípio de funcionamento de coberturas evapotranspirativas é mostrado na Figura 2.2 e o balanço hídrico se encontra representado na equação 2.1 (ABICHOU et al., 2004), abaixo:

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

Onde:

$P_t$  = percolação;

$P$  = precipitação;

$R$  = escoamento superficial;

$S$  = armazenamento de água no perfil;

$T$  = transpiração;

$E$  = evaporação;

$L$  = drenagem lateral.

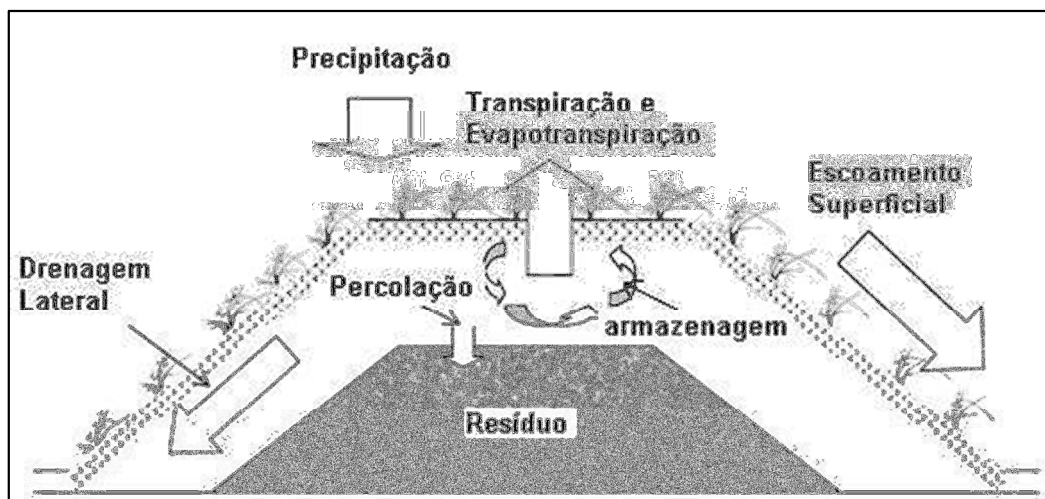
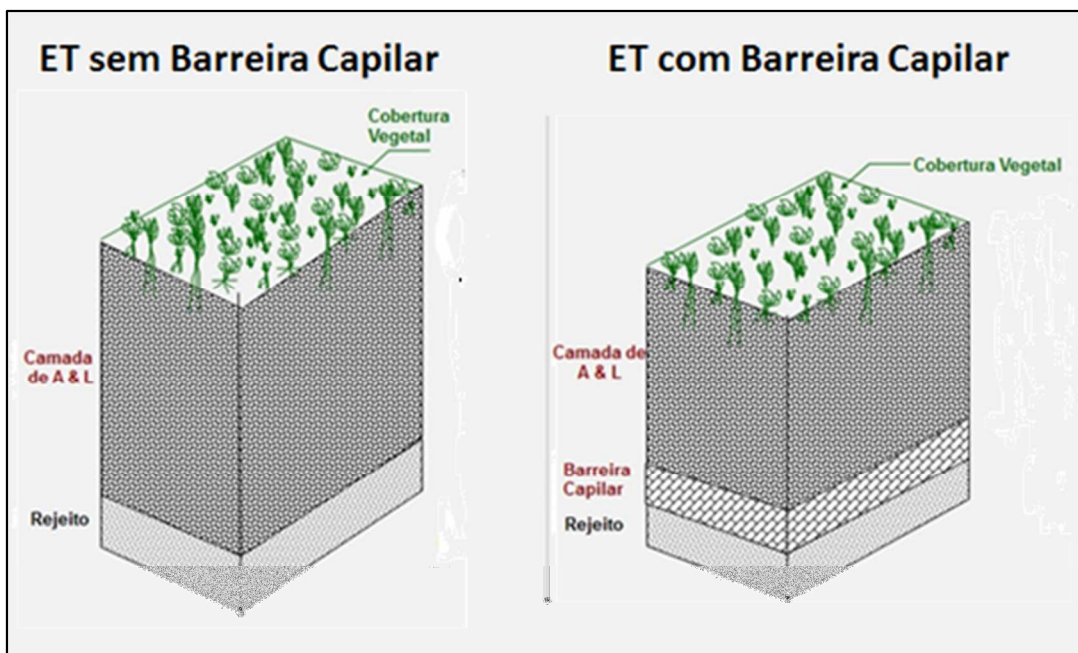


Figura 2.3: Perfil típico de uma cobertura evapotranspirativa (adaptado de Abichou et al., 2004) - (Ribeiro, 2011).

A seleção de solos apropriados, o aumento da espessura da camada e/ou a colocação de uma barreira capilar pode levar a um acréscimo no armazenamento de água. A transpiração pode ser maximizada através da seleção de uma vegetação adequada.

Vieira (2005) relata que projetos de coberturas evapotranspirativas têm se mostrado mais viáveis em regiões de climas áridos e semi-áridos. Qian et al. (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 semiárido entre -100 e -50 milímetros. Paracatu estaria em região semiárida a árida considerando-se o critério anteriormente citado e a transpiração entre 100 e 200 mm por ano e umidade média relativa entre 25% e 97%, os períodos secos e úmidos são bem marcados no decorrer do ano.

Existem dois tipos básicos de coberturas evapotranspirativas: coberturas *monolíticas* e coberturas com *barreiras capilares* (ABICHOU et al., 2004).



**Figura 2.4: Perfis de Coberturas Evapotranspirativas sem e com Barreira Capilar.**

As coberturas evapotranspirativas *monolíticas* são formadas por uma camada de solo para plantio de espécies vegetais, maximizando a transpiração; uma camada de armazenamento-e-liberação; e, se necessário, uma camada de solo de fundação. Como as camadas de armazenamento-e-liberação são normalmente construídas com areias siltosas, siltes, e siltes argilosos, as coberturas evapotranspirativas *monolíticas* só 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). Os Modelos 1 e 3 apresentados nesse trabalho exibem essa configuração associada a uma camada de barreira hidráulica.

As coberturas evapotranspirativas com barreiras capilares 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).

Caso apareçam trincas na camada de armazenamento-e-liberação, 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 são mais

adequadas para este fim que solos ricos em argilas ativas que normalmente ressecam e trincam com mais facilidade. Se forem utilizadas argilas, elas devem ser lançadas com um teor de umidade baixo para minimizar este fenômeno. Naturalmente a camada de plantio sobre a camada de armazenamento-e-liberação diminui estes problemas de ressecamento (RIBEIRO, 2011).

## **2.5 – Vegetação**

### **2.5.1 – Importância em Projetos de Cobertura**

A vegetação possui várias funções em projetos de cobertura: reduz a quantidade e velocidade de escoamento superficial, reduz a mobilização do solo devido ao impacto das gotas de chuva, pois se liga às partículas do solo através dos sistemas radiculares. Promove também a evapotranspiração e facilita a infiltração da água (EPA, 2002).

### **2.5.2 – Espécies de Plantas**

As espécies de 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 (Interstate Technology & Regulatory Council - ITRC, 2003). No caso brasileiro, qualquer revegetação deve ser realizada com espécies nativas existentes no bioma em que se encontra inserido o empreendimento em processo de fechamento, essa obrigatoriedade se encontra no Código Florestal Brasileiro (Lei nº 12.651/2012) .

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

- Plantas nativas com baixo crescimento (menor que 1 m de altura) e gramíneas são recomendadas para manter a estabilidade ecológica em longo prazo;
- As plantas selecionadas devem sobreviver às condições climáticas locais;
- As plantas devem 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 e com pouca, ou nenhuma, manutenção;
- A comunidade vegetal deve 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 devem atrair espécies animais escavadoras.

### 2.5.3 – Crescimento Vegetativo

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 (EPA, 2002).

O potencial de transpiração pode apresentar mudanças, pois se encontra associado à precipitação, ao vento, à pressão atmosférica e às alterações de temperatura. Quando se encontram na estação de crescimento vegetativo, as distintas espécies começam e alcançam o pico de crescimento em tempos também distintos.

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 (Ribeiro, 2011).

### 2.5.4 – 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. Amorim (2008) mediu o tamanho das raízes de algumas espécies encontradas no experimento depois da germinação e encontrou, em média, profundidades em torno de 30 a 40 cm. Porém, em função do aparecimento das espécies nativas, conforme citado anteriormente, não se conseguiu obter um valor exato para determinar a profundidade das raízes. Por isso, pode ser apropriado utilizar um Modelo numérico para explicar o crescimento real da raiz, limitado por propriedades do solo.

### 2.5.5 – Índice de Área Foliar

Segundo o ITRC (2003), o índice de área foliar (IAF) é a área total ocupada por folhas verdes no dossel da planta por área de solo. O IAF é um grande controlador da transpiração. A

área foliar ainda desempenha um papel chave na absorção de radiação, na fotossíntese durante os ciclos diurno e sazonal e no ciclo biogeoquímico existente no sistema de copa - solo. Globalmente, varia de menos de 1 para mais de 10, mas também apresenta variação significativa dentro biomas a nível regional. O IAF sofre alterações durante o período de crescimento, especialmente em pastagens e sistemas de folha caduca e pode iniciar e terminar a época de crescimento com um valor igual a zero. Ainda, durante a estação de crescimento, o IAF sobe a um nível de pico de produção e depois cai, por isso a curva do IAF é importante em muitos Modelos que abordam a transpiração das plantas.

A área foliar total tem efeitos significativos sobre a perda de água da planta. À medida que as plantas crescem, aumentam sua área foliar e, conseqüentemente, passam a consumir mais água. Em geral, as espécies que têm taxas de crescimento mais elevadas, em termos de biomassa, têm uma maior quantidade de folhas e as folhas são mais finas (alta área foliar específica), o que resulta em um aumento de área foliar e das taxas de transpiração.

O IAF é usado pelo VADOSE/W de forma a reduzir a quantidade de radiação líquida que intercepta a superfície do solo, que por sua vez, reduz a evaporação real calculada. Em outras palavras, o índice de área foliar controla a forma como a energia na superfície é dividida entre o que está disponível para a evaporação direta a partir do solo e a que está disponível para a transpiração das plantas (RIBEIRO, 2011).

#### 2.5.6 – 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. O ponto de murcha não é um valor único dentro de uma massa de solo, pois, nem toda água contida nos poros se encontra disponível para as plantas, mesmo nos casos em que o solo se encontra com umidade maior que a correspondente ao ponto de murcha. A justificativa para isto está nas interações existentes entre as moléculas de água e as partículas argilosas do solo nos microporos da estrutura do solo, essas interações podem ter uma força maior que a capacidade de extração da água pelas plantas. Simplificadamente, considerando-se toda a massa de solo, o ponto de murcha é definido como a umidade volumétrica correspondente à sucção igual a 1500 kPa que é o valor normalmente assumido como a máxima capacidade de extração de água do solo pelas plantas.

O ponto de murcha muda de acordo com as características do solo e das plantas:

- Em solos com altos teores de argilo minerais o valor do ponto de murcha pode ser maior do que em solos grosseiros.

- Algumas espécies de plantas são mais bem 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 por causa da evaporação. Em camadas de solos profundos o valor da evaporação não é afetado diretamente e o ponto de murcha permanece com o valor original.

Nas simulações realizadas entra como um componente da evapotranspiração.

## **2.6 – Importância da interação solo-atmosfera**

Modelos isotérmicos que não consideram esta interação podem ser usados para prever respostas de um sistema de cobertura de solo em curto prazo; entretanto, uma análise de longo prazo, sob condições climáticas diversas, a modelagem solo-atmosfera de transporte de água e calor acoplados deve ser usada para analisar as coberturas de solo (SWANSON et al., 2003).

A umidade volumétrica dentro de um sistema de cobertura é função das propriedades hidráulicas dos solos que o compõem e de fatores climáticos que controlam o fluxo de água que progride através deste sistema. Esse fluxo de água vai se desenvolver como resultado da precipitação ou evaporação, e da retenção nos solos que compõem o sistema de cobertura (Yanful et al., 2006). Portanto, se nos Modelos de comportamento estes pontos forem desprezados, os perfis de pressão e as umidades volumétricas nas camadas de solo do sistema de cobertura podem desviar significativamente daqueles obtidos teoricamente (BARBOUR, 1990).

O movimento de água líquida e vapor de água, devido à evaporação no interior de uma cobertura de solo, é incluído nas análises numéricas realizadas neste trabalho com o programa VADOSE/W (a determinação do valor da evaporação é feita vinculando-se o valor da umidade e do calor na superfície do solo com as condições climáticas existentes acima da superfície do solo).

## **2.7 – Modelagem numérica para sistemas de cobertura**

McMullen et al. (1997) analisaram que, como o comportamento hidráulico de um sistema de cobertura em camada é complexo, cálculos computadorizados baseados em Modelos numéricos devem ser usados para constituir as configurações ideais.

Yanful et al. (2002) mostraram resultados com um bom ajuste entre os dados de evaporação experimental e simulações numéricas obtidas usando o Modelo solo-atmosfera SoilCover (GEO-ANALYSIS 2000 LTD., 2000).

Mbonimpa et al. (2003) ilustraram os benefícios do uso de simulações numéricas para prever o comportamento de sistemas de cobertura de solo. Eles apresentaram exemplos de cálculos de fluxo de oxigênio em sistemas de cobertura e sugeriram que as mudanças fundamentais das propriedades da cobertura e parâmetros de projeto (o grau de saturação da barreira e a espessura das diversas camadas, por exemplo) poderiam ser uma forma eficaz de prever o desempenho da cobertura.

Swanson et al. (2003) descreveram os resultados de simulações numéricas para prever o desempenho do sistema de cobertura de solo na Mina Equity Silver, British Columbia, Canadá. Eles avaliaram a capacidade do Modelo SoilCover (Geo-Analysis 2000 Ltd., 2000) para simular condições de campo e acharam um ajuste razoável entre os resultados numéricos e de campo.

McCartney e Zornberg (2003) apresentaram resultados das simulações numéricas realizadas em uma cobertura evapotranspirativa construída em clima semiárido. Eles notaram que o Modelo numérico apresentou resultados precisos no início das análises, porém, após algum tempo, os resultados só concordaram em tendência, mas não em proporção. A percolação medida em campo e calculada numericamente foi parecida. Os resultados da simulação foram sensíveis às propriedades hidráulicas do solo, mas não sofreram influência por escolhas de diferentes opções de radiação solar, de velocidade do vento ou da consideração de histerese na curva de retenção de água dos solos. Eles concluíram que a modelagem numérica é uma ferramenta importante para avaliar o desempenho dos sistemas de cobertura.

Após uma descrição detalhada sobre todas as peculiaridades dos Modelos, os autores do ITRC (2003), apresentam conclusões e recomendações, algumas das quais estão sumarizadas abaixo:

- 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 Richards deverão ser sempre utilizados em projetos de coberturas, uma vez que, na maioria dos casos, os solos que compõem o sistema de cobertura encontram-se não-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: evapotranspiração, escoamento superficial e fluxos preferenciais;
- É importante e sempre recomendável a utilização de medidas diretas para reduzir as incertezas dos Modelos.

## **2.8 – Trabalhos sobre coberturas de solo realizados na RPM**

Com a necessidade da RPM (atual Kinross) de estudar sistemas de cobertura com solo e o interesse científico nesses estudos, viabilizou-se junto à empresa experimentos *in situ*, monitorados. Foram, então, 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 (AMORIM, 2008).

Dando continuidade ao trabalho de Amorim (2008), Ribeiro (2011) realizou a análise numérica, feita pelo método dos elementos finitos através do programa VADOSE/W, dos dois sistemas de cobertura. Inicialmente, foi necessário fazer a calibração no campo tanto dos medidores de umidade, quanto dos de sucção, para verificar a calibração anteriormente feita por Amorim (2008) no laboratório. O estudo numérico foi feito por um período de aproximadamente três anos com Modelos uni e bi-dimensionais das coberturas. Preliminarmente, foram feitas análises paramétricas com alguns parâmetros do Modelo numérico sobre cujos valores se tinham incerteza, para verificar a influência de cada um deles. Em seguida, compararam-se os resultados numéricos com os obtidos no campo. Essas comparações indicaram uma boa concordância entre os resultados, tanto com a modelagem uni, quanto com a bi-dimensional dos sistemas de cobertura. Por fim, baseado nos resultados obtidos, propôs-se uma metodologia para o dimensionamento de sistemas de cobertura feitos com solo.

Em outro tipo de abordagem para conter e tratar a formação da drenagem ácida, que considera a interação solo-vegetação e a química dos solos como foco, foram produzidos diversos trabalhos na mesma área. Entre eles se encontram:

- Camadas de cobertura para o crescimento de árvores e arbustos sobre um substrato sulfetado de mineração de ouro (Assis et al., 2011) - O substrato estudado foi um filito que contém sulfetos como pirita e arsenopirita. O objetivo deste trabalho foi avaliar a sobrevivência e crescimento de espécies vegetais sobre diferentes combinações de camadas de cobertura e de selamento sobre um substrato sulfetado. Os resultados indicaram que a utilização de diferentes camadas sobre o substrato sulfetado permite a rápida revegetação da área remanescente de mineração.
- Caracterização de rejeito de mineração de ouro para avaliação de solubilização de metais pesados e arsênio e revegetação local (Silva, 2004) - O objetivo deste trabalho foi caracterizar o rejeito proveniente do beneficiamento de minério de ouro de uma mineração no estado de Minas Gerais, para avaliação de problemas de drenagem ácida e solubilização de metais e para planejamento da revegetação do local. O rejeito apresentou potencial de geração de acidez e solubilização de elementos como As, Fe e S, o que pode acarretar problemas ambientais, como a drenagem ácida e a contaminação de solos e cursos d'água, bem como a

incorporação desses elementos na cadeia trófica. Esse rejeito apresentou, ainda, sérias restrições ao desenvolvimento de plantas, considerando, principalmente, os teores baixos de P, K e matéria orgânica; bem como a elevada acidez e salinidade.

- Mitigação da lixiviação de arsênio, ferro e enxofre e revegetação de substratos minerados em área de ocorrência de drenagem ácida (Assis, 2006) - O Objetivo desse trabalho foi avaliar diferentes práticas mitigadoras de drenagem ácida e revegetação por meio de experimentos em laboratório e em condições de campo. Para o experimento em laboratório, foram montados lisímetros com diferentes combinações de camadas de cobertura, de selamento e de quebra de capilaridade. O experimento teve duração de 24 meses e todas as camadas de diferentes materiais foram dispostas acima de uma camada de substrato pouco intemperizado (B2). Os melhores resultados foram obtidos nos tratamentos com indução da barreira geoquímica, porém nenhum dos tratamentos foi eficaz em inibir a geração de acidez. O uso da argila como camada selante propiciou menores lixiviações (possivelmente pela sua capacidade em adsorver arsênio). A quebra de capilaridade foi essencial por, possivelmente, promover um gradiente de umidade, que diminui as quantidades de As, Fe e S lixiviadas. O experimento de campo foi montado em março de 2000 com o objetivo de avaliar o efeito do substrato B1 (minério com baixo teor de sulfetos) e da argila como camadas selantes e camadas de cobertura para o crescimento de plantas. Foram montados quatro experimentos com diferentes tipos de material nos quais foram plantadas nove espécies de plantas arbóreas e arbustivas. As avaliações consistiram nas medições de diâmetro do colo e altura das plantas. O teor de As disponível na camada de 0 a 20 foi determinado. A utilização da argila propiciou melhores resultados. A ausência da argila propiciou a morte de todas as plantas e o teor de arsênio disponível foi maior. Entre as espécies de plantas escolhidas, a *Acacia holosericea* se destacou com maior porcentagem de biomassa e boa porcentagem de sobrevivência. No entanto, esta espécie é considerada exótica invasora e não vem sendo mais utilizada em projetos de recuperação ambiental.

### 3 - MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 – Tipos de Solo e Rejeito

O experimento foi realizado com três solos retirados de uma área de empréstimo localizada à jusante da Barragem Santo Antônio:

- A amostra retirada entre 0 a 20 cm foi denominado Solo 1 e constituirá Camada de Solo Superficial (*topsoil*) na estrutura da cobertura.
- A amostra retirada entre 20 a 40 cm foi denominado Solo 3 e constituirá a Barreira Hidráulica (BH) na estrutura da cobertura.
- A amostra retirada entre 50 a 70 cm foi denominado Solo 2 e constituirá a Camada de Armazenamento e Liberação na estrutura da cobertura.

O rejeito foi amostrado na praia, próximo à ombreira direita da barragem, no lado contrário ao local em que se realiza a captação de água. Os três tipos de solos e o rejeito são apresentados na Figura 3.1, a seguir:

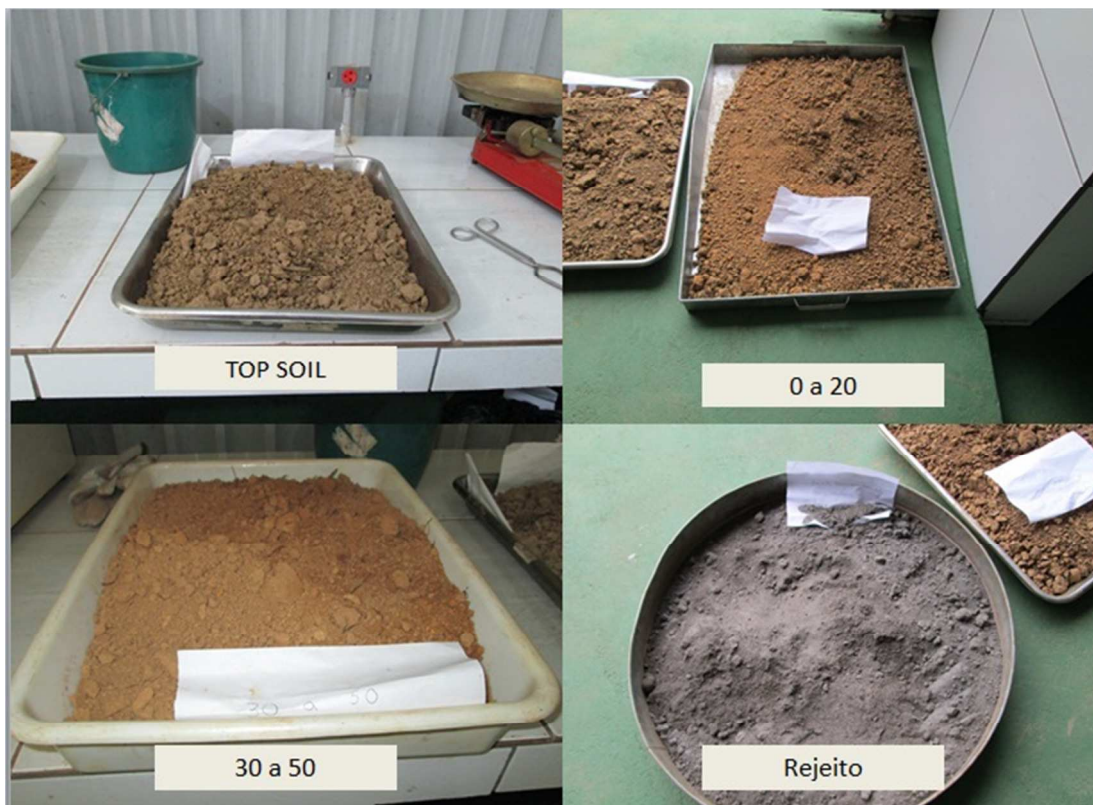


Figura 3.1: Solos e rejeito utilizados nos ensaios.

## **3.2 – Ensaios**

### **3.2.1 – Ensaios de Caracterização**

#### **3.2.1.1 – Ensaios para Determinação da Massa Específica e da Granulometria**

O projeto de uma cobertura solicita a determinação das propriedades geotécnicas e hidráulicas dos diferentes materiais que serão utilizados na construção da mesma e os ensaios para a Determinação da Massa Específica e da Granulometria estão incluídos entre os ensaios necessários para a caracterização dos solos. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7181/84 (Solo - Análise granulométrica) e NBR 6508/88 (Grãos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica).

#### **3.2.1.2 – Determinação dos Limites de Atterberg**

O limite de liquidez (LL) é definido como a umidade abaixo da qual o solo tem comportamento plástico. Essa umidade se encontra em uma faixa de transição entre os estados líquido e plástico do solo. Experimentalmente, convém dizer que, trata-se da umidade que o solo tem ao se fechar uma ranhura de um cm sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande. A preparação e execução seguiram às determinações constantes na NBR 6459/84 (Solo – Determinação do Limite de Liquidez).

O limite de plasticidade (LP) é considerado como o teor em que o solo deixa de ser plástico e torna-se quebradiço. Essa umidade se encontra em uma faixa de transição entre os estados plástico e semissólido do solo. Experimentalmente, é obtido determinando-se o teor de umidade em que um cilindro de solo com 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento passa a ter fissuras. A preparação e execução seguiram às determinações constantes na NBR 7180/84 (Solo – Determinação do Limite de Plasticidade).

### **3.2.2 – Ensaios de Compactação**

A compactação de um solo em laboratório tem a finalidade de determinar a curva de variação da densidade do solo em função da umidade, para uma dada energia de compactação. O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado). Foi realizado o ensaio Proctor Normal de acordo com a NBR-7182/86 (Solo – Ensaio de Compactação).

O ensaio Proctor Normal consiste em compactar uma amostra de solo dentro de um cilindro, com um volume aproximado de  $1000 \text{ cm}^3$ , em três camadas sucessivas, com a aplicação de 25 golpes com um soquete com peso de 2,5 kg a uma altura de queda de 30 cm.

### 3.2.3 – Ensaio de Permeabilidade

Seguiram-se os seguintes cuidados para a realização dos ensaios de permeabilidade: impermeabilização da área não ocupada pelo corpo de prova; saturação do corpo de prova; uso de água destilada para realizar o processo de saturação do corpo de prova; colocação do corpo de prova na vertical.

O coeficiente de permeabilidade foi determinado a partir do ensaio de carga constante.

As amostras de solos e rejeito deformadas foram compactadas nas respectivas umidades ótimas antes de serem transferidas para o permeômetro. Três cápsulas foram retiradas durante o processo de compactação com a finalidade de se determinar a umidade e a massa do corpo de prova foi determinada.

A montagem do ensaio aconteceu da seguinte forma:

- Na base do permeômetro colocou-se uma camada de areia grossa de cerca de 20 mm que serviu de apoio do corpo de prova e também de camada drenante;
- O corpo de prova foi colocado sobre a camada de areia e uma pasta de bentonita foi colocada envolvendo o corpo de prova até uma altura equivalente à  $\frac{3}{4}$  da altura total do corpo de prova;
- Na superfície lateral do corpo de prova foi colocada parafina até a uma altura equivalente à  $\frac{1}{4}$  da altura total do corpo de prova, com a finalidade de evitar a percolação radial;
- A saturação do corpo de prova ocorreu devido a processos de circulação de água através do corpo de prova;
- Determinou-se o valor da carga que deveria ficar constante durante o ensaio (distância entre os níveis de montante e jusante);
- Os processos de circulação ocorreram durante alguns dias (entre 3 e 7 dias, em média) antes de se realizar as leituras com o intuito de atingir a saturação do corpo de prova;
- Quando se iniciaram as leituras a temperatura da água percolada foi medida, pois a mesma interfere nos cálculos do coeficiente de permeabilidade;

- As leituras foram repetidas pelo menos 5 vezes com objetivo de se alcançar mais dados para os cálculos dos coeficientes de permeabilidade.

A Figura 3.2 (a) mostra como ficou a configuração do ensaio no permeâmetro e a Figura 3.2 (b) mostra o ensaio já em funcionamento.



**Figura 3.2: (a) Configuração do Ensaio no Permeâmetro; (b) Ensaio em funcionamento.**

O cálculo do coeficiente foi feito através das equações apresentadas a seguir:

$$K = 2,3 \log \left( \frac{a \cdot H}{A \cdot t} \right) \cdot \log \left( \frac{L_0}{L_1} \right) \quad (1)$$

Sendo:  $a$  = área da bureta,  $H$  = altura do corpo de prova,  $A$  = área do corpo de prova;  $L_0$  = altura inicial da água na bureta;  $L_1$  = altura final da água na bureta.

$$K_{20} = C_k \cdot K$$

$$K \cdot \mu_T = K_{20} \cdot \mu_{20}, C_k = \mu_T / \mu_{20} \quad (2)$$

$$K_{20} = K \cdot \mu_T / \mu_{20}$$

Onde o valor  $C_k$  é tabelado e varia de acordo com a temperatura,  $\mu_{20}$  é a viscosidade da água à temperatura de 20°C e  $\mu_T$  é a viscosidade da água à temperatura de  $T$ . O valor do coeficiente utilizado no programa é o  $K_{20}$ .

Neste trabalho as curvas de retenção de água foram obtidas utilizando o método do papel filtro e uma centrífuga de pequeno porte.

### 3.2.4 – Ensaio de Sucção (Método do Papel Filtro)

A curva de retenção de água é definida como a relação entre a sucção e a quantidade de água presente no solo sendo, por isso, considerada essencial para a interpretação do comportamento e das propriedades dos solos não saturados. No presente trabalho, o método do papel filtro foi utilizado para se obter as curvas características de cada tipo de solo.

O uso do papel filtro para medir o potencial matricial da água no solo baseia-se no princípio de que, quando solo úmido é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorver água, esta será transferida do solo para esse material até que o equilíbrio seja alcançado. No estado de equilíbrio, os potenciais matriciais da água no solo e no material poroso igualam-se, apesar de as respectivas umidades serem diferentes (MARINHO E OLIVEIRA, 2006).

O método do papel filtro é uma alternativa mais econômica e acessível que o método da câmara de pressão de Richards (tradicionalmente utilizado para a obtenção da curva de retenção de água), foi escolhido para esse estudo porque permite a obtenção de valores maiores de sucção quando comparado com o método de Richards. Uma vez que o método do papel filtro determina o potencial matricial do solo de forma indireta, sua precisão depende da precisão com que foi determinada a curva de calibração. Outros aspectos que influenciam na confiabilidade das medições são: variação de temperatura, tempo de equilíbrio, contato entre papel filtro e amostra, manuseio e exposição ao ambiente (BICALHO et al., 2007).

As amostras deformadas dos 3 tipos de solos e do rejeito foram homogeneizadas e umedecidas até um ponto 2 % abaixo da umidade ótima (obtida no ensaio de compactação). Em seguida, os corpos de prova foram compactados (dez para cada tipo de solo) em moldes de PVC com 47,14 mm de diâmetro interno e 20 mm de altura. A Figura 3.3, retirada de Ribeiro (2011), ilustra esse processo de Compactação dos corpos de prova:

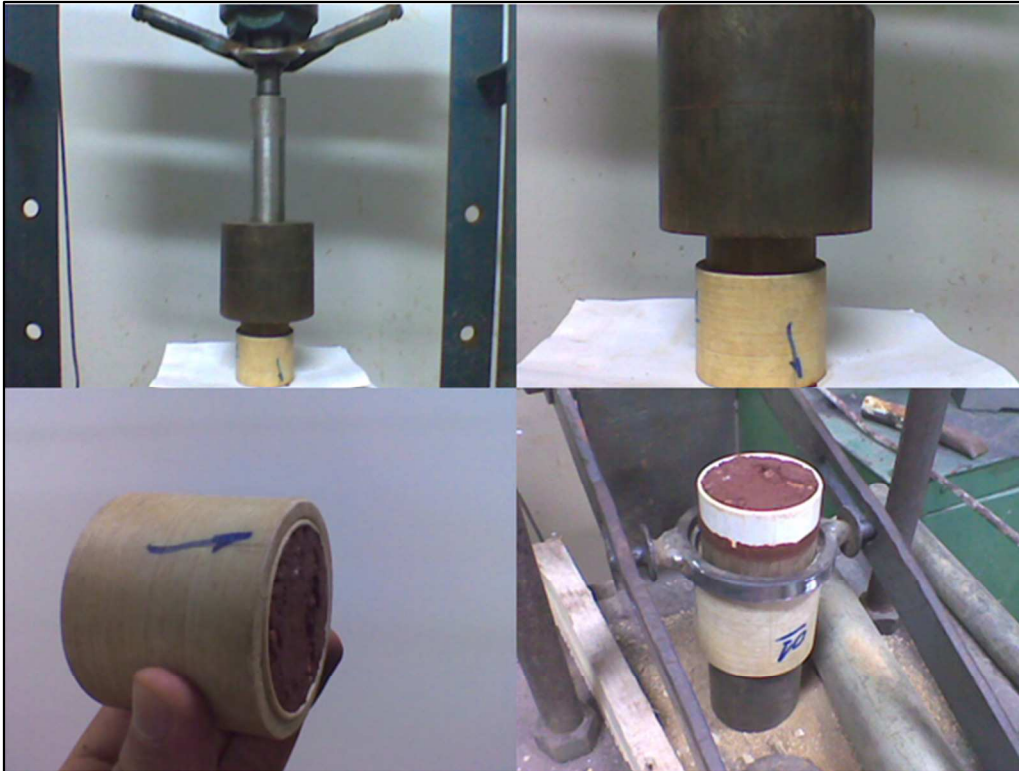


Figura 3.3:

Compactação das amostras no anel de PVC (Ribeiro, 2011).

A Figura 3.4 (a) mostra os corpos de prova após a compactação (embalados para a manutenção da umidade) e a Figura 3.4 (b) mostra o processo de saturação dos corpos de prova para a execução do ensaio de sucção pelo Método do Papel Filtro (os corpos de prova foram umedecidos até próximo à saturação, aspergindo-se água de uma distância de aproximadamente 60 cm):



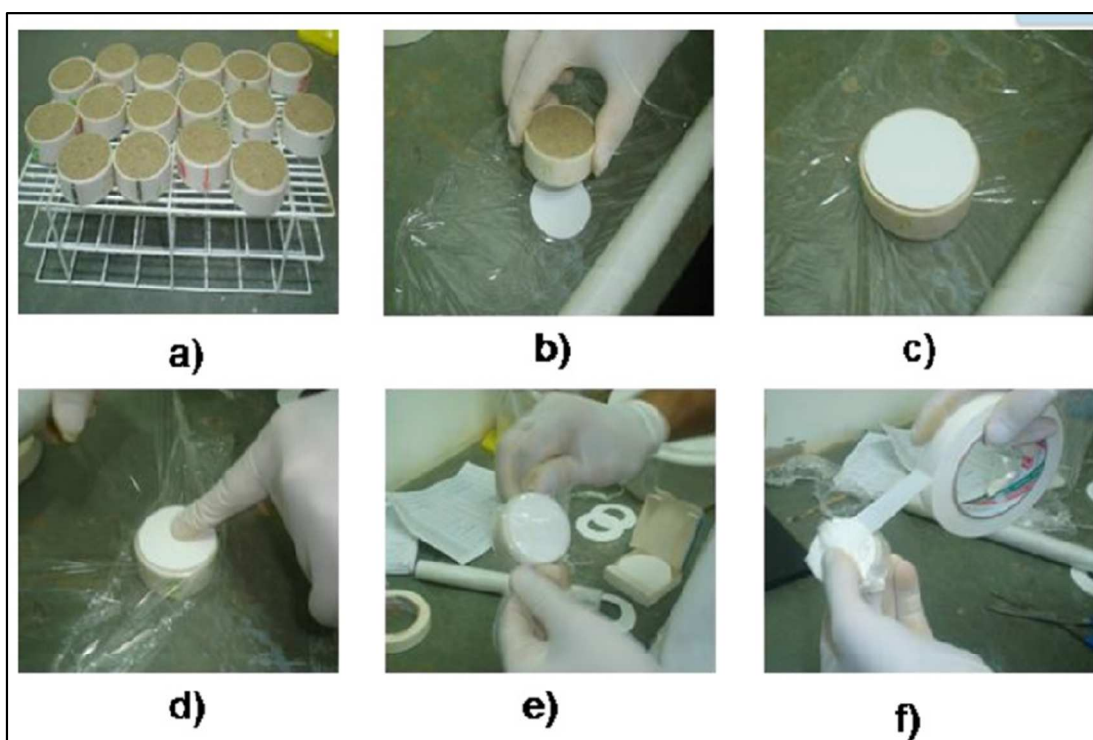
(a) Corpos de Prova para Ensaio do Papel Filtro

(b) Saturação dos Corpos de Prova para o Ensaio do Papel Filtro

Figura

3.4: (a) Corpos de Prova para Ensaio do Papel Filtro; (b) Saturação dos Corpos de Prova para o Ensaio do Papel Filtro.

Na sequência, os corpos de prova foram deixados secar até atingir o teor de umidade desejado (Figura 3.5a), calculado de antemão a partir dos índices físicos em uma planilha de Excel e controlado por pesagens sucessivas. Os papéis filtro foram cortados no diâmetro igual ao diâmetro ocupado pela amostra e colocados cuidadosamente, um na superfície superior outra na inferior de cada corpo de prova (Figura 3.5b e 3.5c). Após o posicionamento dos papéis filtro, envolviam-se os corpos de prova com filme plástico para fornecer o máximo de contato do papel com o solo, davam-se várias voltas com o filme plástico e fixava o conjunto com fita adesiva (Figuras 3.5d, 3.5e e 3.5f). Em seguida, os corpos de prova foram identificados e deixados na câmara úmida por, no mínimo, 7 dias, dentro de um recipiente com tampa. A Figura 3.5, retirada de Guimarães (2013), ilustra essa sequência de ações:



Figura

**3.5: Detalhes da preparação dos corpos de prova. (a) Secagem dos corpos de prova após serem umedecidos; (b) Colocação do papel filtro inferior; (c) Colocação do papel filtro superior; (d) Colocação do disco de PVC; (e) Proteção com filme plástico; (f) Fixação com fita adesiva (Guimarães, 2013).**

Após o período de equilíbrio, os corpos de prova foram abertos e o teor de umidade do papel filtro foi determinado. Cuidadosamente, removeu-se o filme plástico que envolvia o corpo de prova, retirou-se o papel filtro com auxílio de uma pinça e o mesmo foi colocado na balança analítica com precisão de 0,0001 g. Durante o processo de transferência, o papel filtro não permaneceu exposto ao ar por mais que 5 segundos, para tornar mínima a perda de umidade (esse processo foi repetido para todos os corpos de prova). Após a pesagem, o papel filtro úmido foi colocado na estufa, por um período de 2 h, a uma temperatura de 105 °C.

Depois da secagem em estufa, o papel foi pesado para obtenção do seu peso seco. Como aconteceu anteriormente, o processo de transferência deve ser o mais rápido possível, para evitar aumento de umidade no papel filtro. Após o cálculo da umidade do papel filtro ( $w$ ), a sucção matricial do solo foi determinada utilizando as curvas de calibração do papel filtro Whatman N°42 obtidas por CHANDLER et al., (1992). As equações dessas curvas são:

$$\text{Para umidades do papel filtro } > 47 \% \text{ Sucção (kPa)} = 10^{(6.05-2.48 \log w)} \quad (3)$$

$$\text{Para umidades do papel filtro } < 47 \% \text{ Sucção (kPa)} = 10^{(4.84-0.0622)} \quad (4)$$

Ao se utilizar esta técnica, o ideal é que cada valor de sucção seja determinado pela média de pelo menos dois resultados (Guimarães, 2013).

Os pontos das curvas de retenção obtidos experimentalmente foram ajustados pela equação de Fredlund e Xing (1994) (Equações 5 e 6), pois dentre os métodos existentes no programa VADOSE/W foi o que mais se ajustou para o Modelo proposto.

$$\theta(\psi) = \theta_s \cdot C(\psi) \cdot \left[ \frac{1}{\ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (5)$$

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

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 de ajuste “n”, “m” e “a” da equação de Fredlund e Xing foram obtidos por meio do programa Excel, utilizando-se da ferramenta Solver.

### 3.2.5 – Método da Centrífuga

Uma centrífuga de pequeno porte foi utilizada para obter propriedades hidráulicas do solo seguindo o proposto por Guimarães (2013): amostras de solos saturadas são submetidas a um movimento circular que promove a drenagem rápida do fluido que se encontra nos poros do solo. A sucção em qualquer ponto da amostra de solo centrifugada é calculada através de equações já estabelecidas na literatura. Devido ao limite da centrífuga (adequada para se obter sucções até a ordem de 250 kPa), os pontos com sucções mais altas foram obtidos através do método do papel filtro, com o objetivo de conseguir uma única curva de retenção de água para cada amostra de solo. A Figura 3.6 mostra os equipamentos usados na centrífuga.



**Figura 3.6: Equipamentos usados na centrífuga e posição dos mesmos na centrífuga.**

### 3.3 – Análise Numérica

A análise numérica dos sistemas de cobertura foi realizada com Modelo unidimensional utilizando-se o programa VADOSE/W do pacote Geostudio (2007). A Seguir são apresentados os Modelos numéricos construídos no VADOSE/W, bem como os parâmetros de entrada e as condições de contorno utilizadas.

Nos Modelos 1 e 3, admitiu-se o nível d'água no topo da camada de rejeito (equivalente a 1m), esse cenário representa a pior condição possível para a simulação (corresponde a uma

menor sucção nas diferentes camadas), com o tempo, se a água não chegar nas camada de rejeito e o nível d'água rebaixar, isso mostrará que a água está drenando, que a sucção aumentou e a cobertura é eficaz. Nos Modelos 2 e 4, o nível d'água admitido foi colocado em -1 m, com isso buscou-se uma comparação sobre a influência do nível d'água na eficiência ou ineficiência dos Modelos apresentados nesse estudo. Para os parâmetros vegetais (IAF, profundidade da raiz e ponto de murcha) foram utilizados os valores sugeridos por Ribeiro (2011). Isso aconteceu devido à falta de instrumentos para medição de tais parâmetros, uma vez que não foram realizados experimentos em campo. Os mesmos são apresentados nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 a seguir:

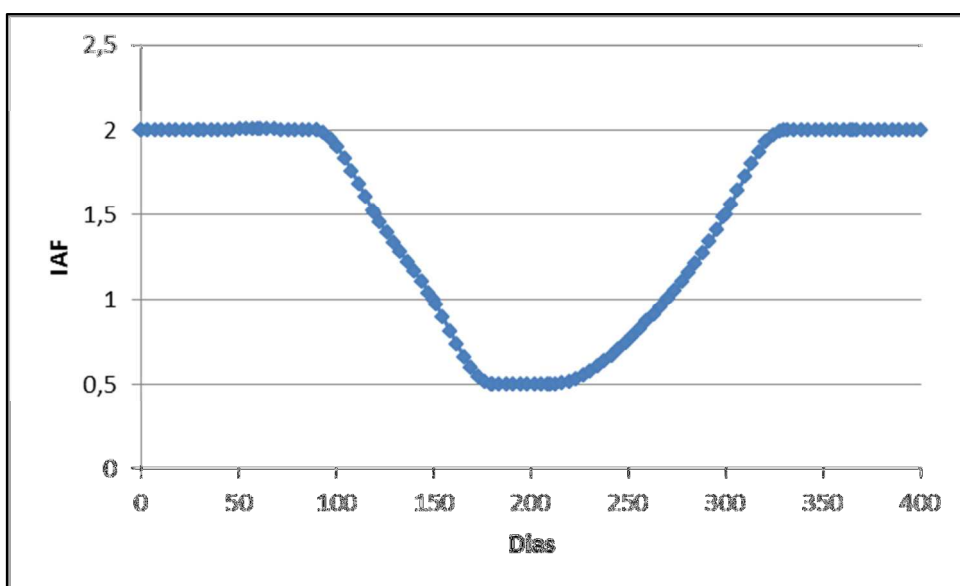


Figura 3.7: Variação do Índice de Área Foliar com o Tempo

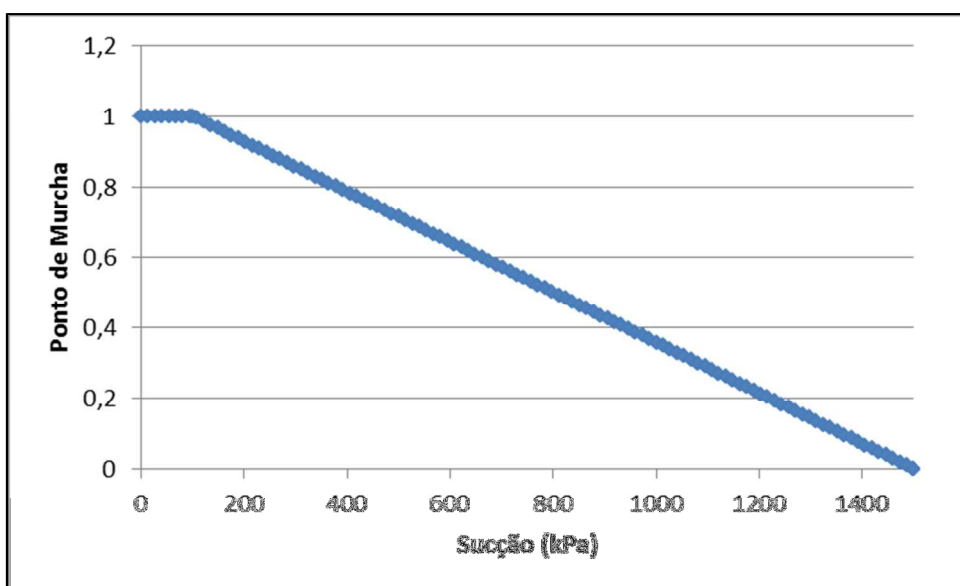
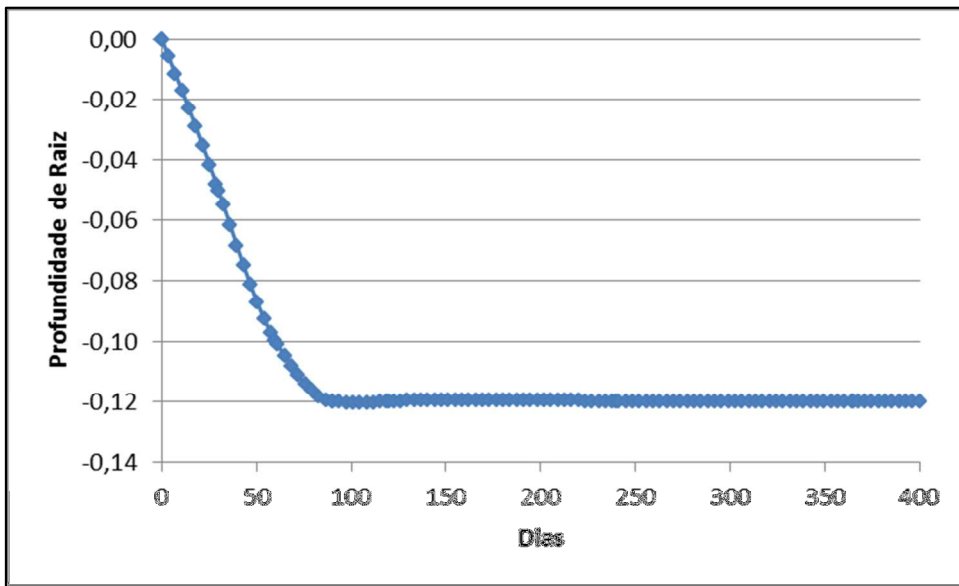


Figura 3.8: Variação do Ponto de Murcha com o Tempo.



**Figura 3.9: Profundidade da Raiz com o Tempo.**

Já os parâmetros térmicos (Condutividade Térmica ( $\text{kJ}/(\text{dia m } ^\circ\text{C})$ ) - 250-285 e Calor Específico Volumétrico ( $\text{kJ}/(\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$ ) - 2250-2900) foram estimados com base no banco de dados do programa VADOSE/W e são os mesmos em todos os Modelos gerados.

Para os Modelos unidimensionais usados no presente trabalho, forneceu-se com os seguintes dados climáticos diários: precipitação (Figura 3.10), temperaturas máxima e mínima (Figura 3.11), umidade média relativa do ar (Figura 3.12) e velocidade do vento (Figura 3.13), que são impostos como condição de contorno no topo da cobertura. A radiação solar utilizada foi a estimada pelo programa, pois forneceu um melhor ajuste do que a radiação obtida junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015) a exemplo do que fez Ribeiro (2011) em sua tese. Os dados utilizados foram medidos na estação meteorológica 83479 instalada em Paracatu e pertencente ao INMET e correspondem ao período compreendido entre janeiro de 2013 e dezembro de 2014. Para uma análise confiável é necessário pelo menos dados de dois anos completos.

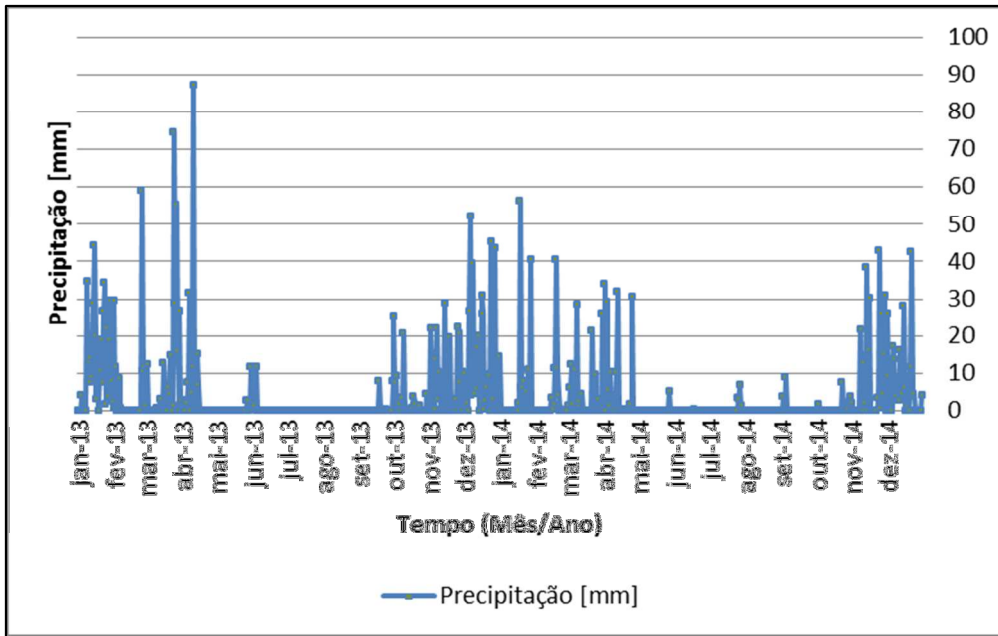


Figura 3.10: Precipitação entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014(INMET).

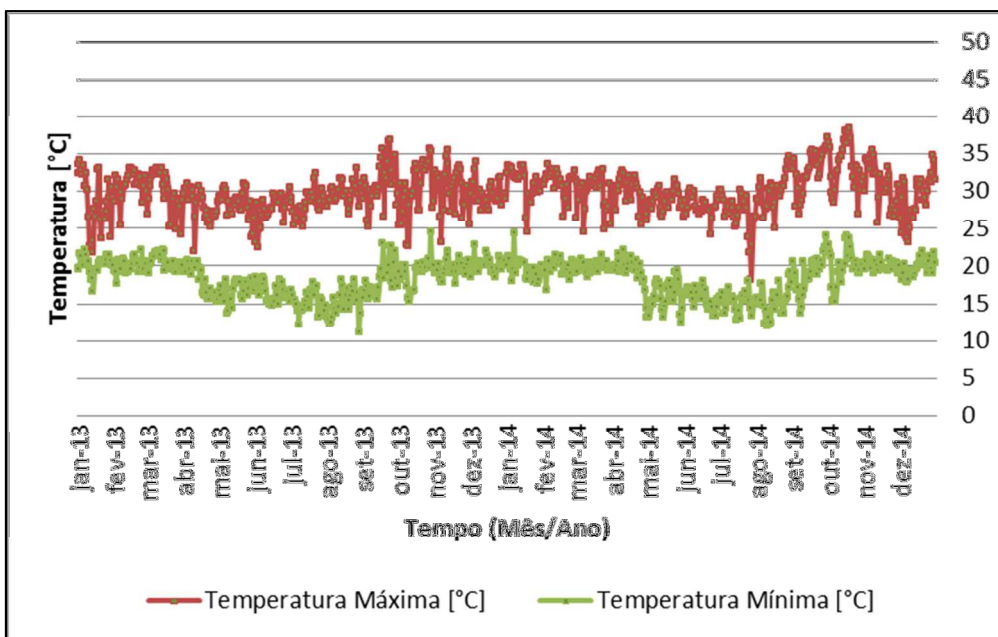


Figura 3.11: Temperatura Máxima e Mínima entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).

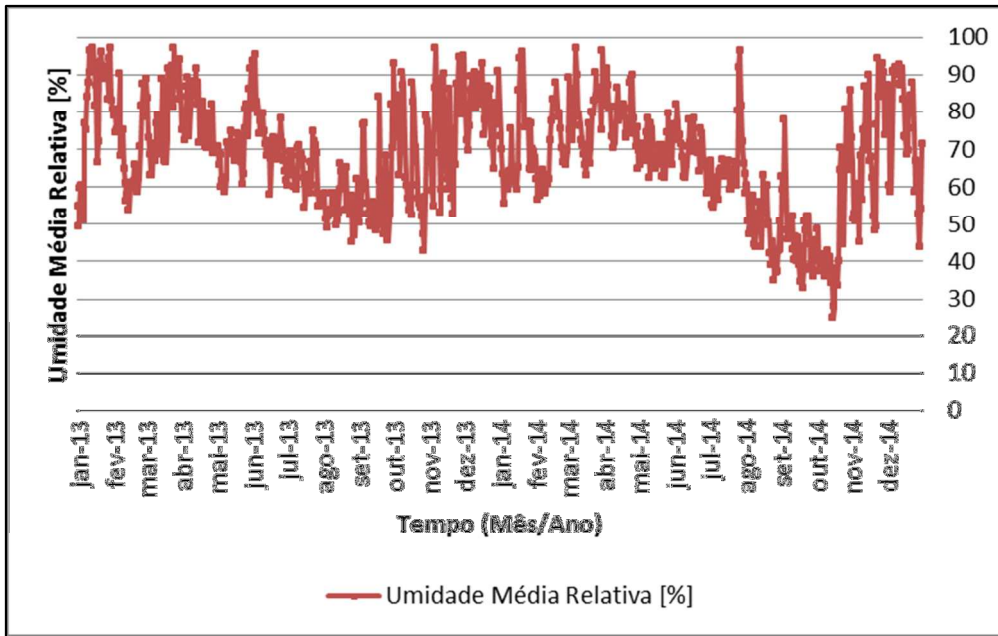


Figura 3.12: Umidade Média Relativa entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).

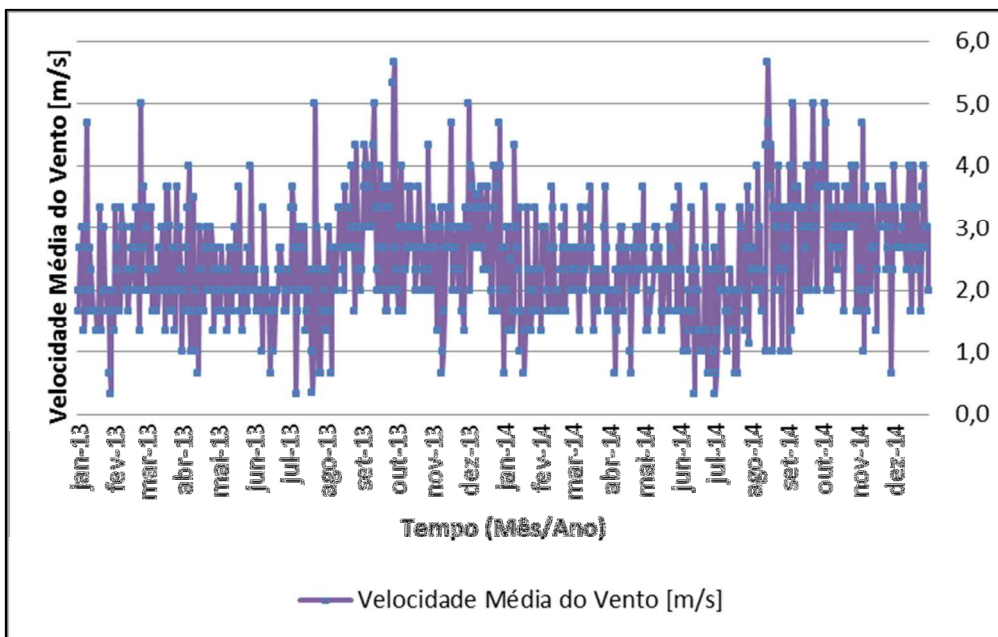


Figura 3.13: Velocidade do Vento entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).

#### Parâmetros de Entrada VADOSE:

**Condição inicial: Modelos 1 e 3** - Posição do nível d'água coincide com a altura do rejeito (1,0 m).

**Modelos 2 e 4** - Posição do nível d'água está a (-1,0 m) da camada de rejeito considerada.

**Vegetais** - IAF, Profundidade da raiz (cm), Sucção referente ao ponto de murcha permanente (kPa)



**Térmicos** - Condutividade térmica  $\text{kJ}/(\text{dia m } ^\circ\text{C})$  - 250-285, Calor específico volumétrico  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$ - 2250-2900 (Ribeiro, 2011 e Banco de Dados VADOSE/W).



**Geotécnicos** - Curva Granulométrica (composição dos solos), Condutividade Hidráulica.

**Climáticos** - Precipitação (mm), Temperatura (°C), Umidade Relativa do Ar (%), Velocidade do Vento (m/s).

A seguir são apresentados os Modelos numéricos propostos no presente estudo (Quadro 3.1).

**Quadro 3.1** - Modelos numéricos inseridos no VADOSE/W:

Análise	Configuração Modelo	Profundidades e proporções das camadas
<p align="center"><b>Cobertura Evapotranspirativa com Nível D'água 1m (equivalente à altura da camada de rejeito) Modelo 1</b></p>		<p>0,15 m camada de Top Soil</p> <p>0,50 m camada de Armazenamento e Liberação (CAL)</p> <p>0,50 m para a camada de Barreira Hidráulica (BH)</p> <p>1,0 m para a camada de rejeito</p> <p>1,0 m de largura</p>
<p align="center"><b>Cobertura Evapotranspirativa com Nível D'água (- 1m) Modelo 2</b></p>		<p>0,15 m camada de Top Soil</p> <p>0,50 m camada de Armazenamento e Liberação (CAL)</p> <p>0,45 m para a camada de Barreira Hidráulica (BH)</p> <p>1,0 m para a camada de rejeito</p> <p>1,0 m de largura</p>

<p><b>Cobertura Prescritiva com Nível D'água 1m (equivalente à altura da camada de rejeito) Modelo 3</b></p>		<p>0,20 m camada de Top Soil  0,40 m para a camada de Barreira Hidráulica (BH)  1,0 m para a camada de rejeito  1,0 m de largura</p>
<p><b>Cobertura Prescritiva com Nível D'água (-1m) Modelo 4</b></p>		<p>0,20 m camada de Top Soil  0,40 m para a camada de Barreira Hidráulica (BH)  1,0 m para a camada de rejeito  1,0 m de largura</p>

A análise dos Modelos propostos foi realizada aos pares (1 e 3; 2 e 4), com isso, pretendeu-se verificar como a variação do nível d'água influenciou no comportamento de cada Modelo com o objetivo de se determinar uma diferença de comportamento entre os diversos Modelos simulados em relação à umidade volumétrica e à sucção, a vazão na base da camada de rejeito também foi incluída na avaliação de cada Modelo, com isso pretende-se obter um Modelo viável para a implantação em campo a partir do estudo numérico realizado no VADOSE/W.

Os pontos em que foram realizadas as simulações são os seguintes:

- *Topsoil*: Pontos escolhidos na superfície de forma a determinar a maior influência das condições de contorno, principalmente, as climáticas;
- Camada de Armazenamento e liberação, barreira hidráulica, rejeito: Pontos escolhidos no meio das camadas de forma a minimizar a interferência das camadas adjacentes nos resultados da simulação.
- Nas simulações que relacionam umidade volumétrica e/ou poro-pressão com profundidade no ano de 2014, foram escolhidos três pontos correspondentes a um período úmido, um período seco e outro período úmido.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 – Granulometria

As curvas granulométricas obtidas por sedimentação e peneiramento do rejeito e dos três tipos de solos usados no sistema de cobertura são apresentadas a seguir nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4:

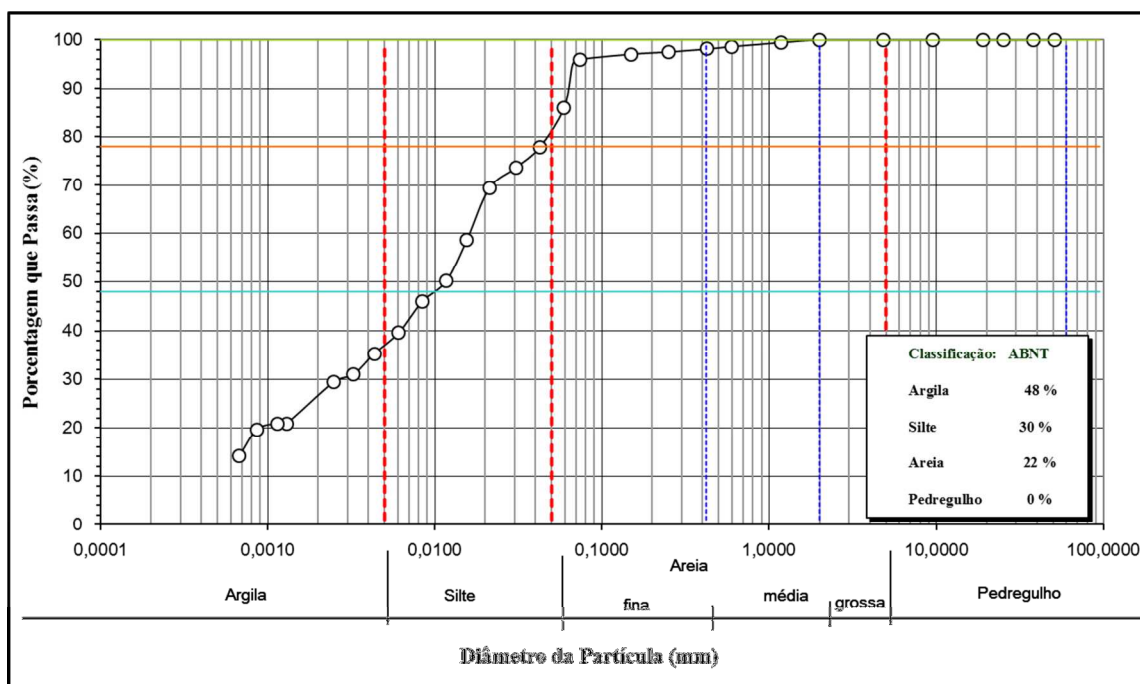


Figura 4.1: Granulometria Solo 1.

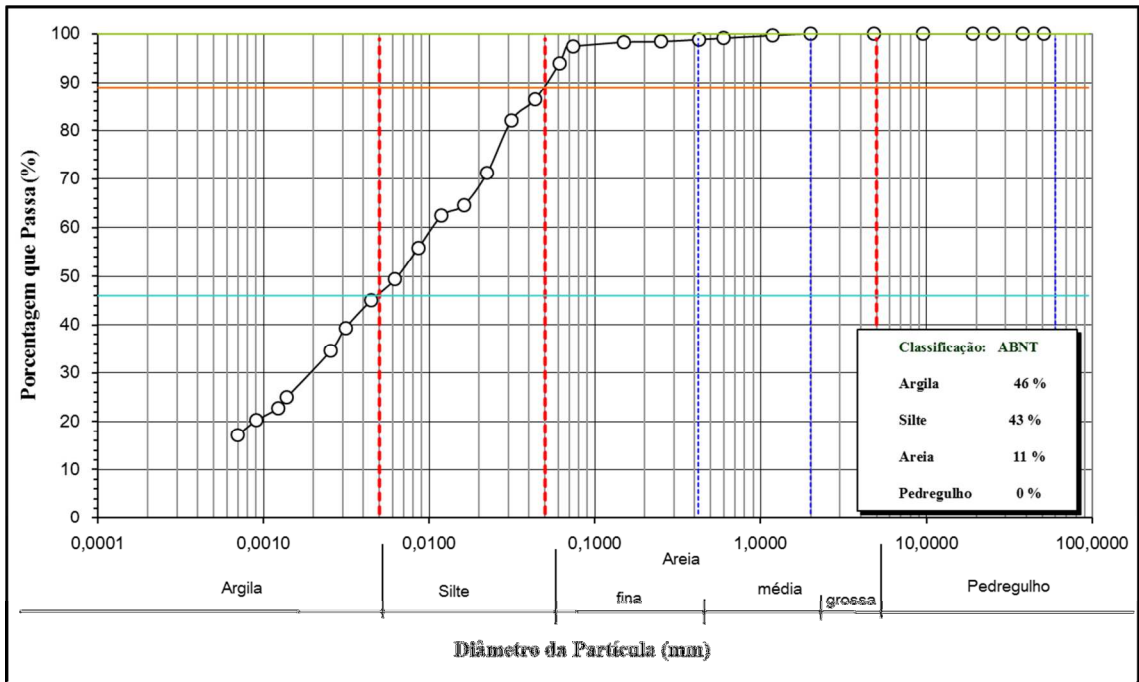


Figura 4.2: Granulometria Solo 2.

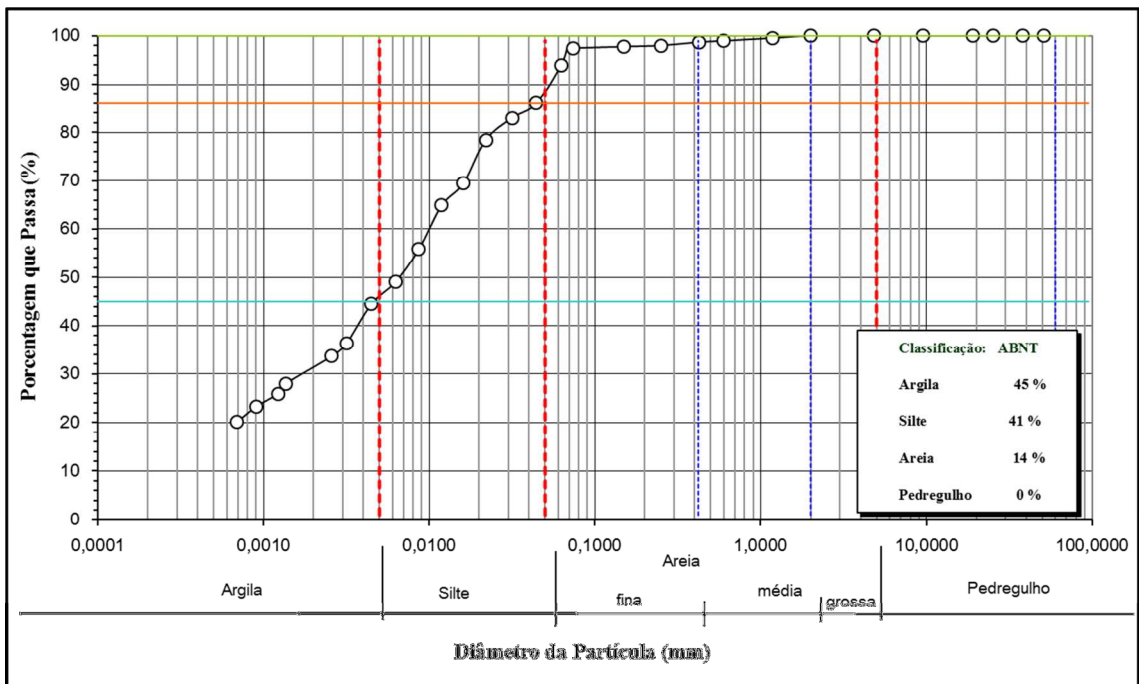


Figura 4.3: Granulometria Solo 3.

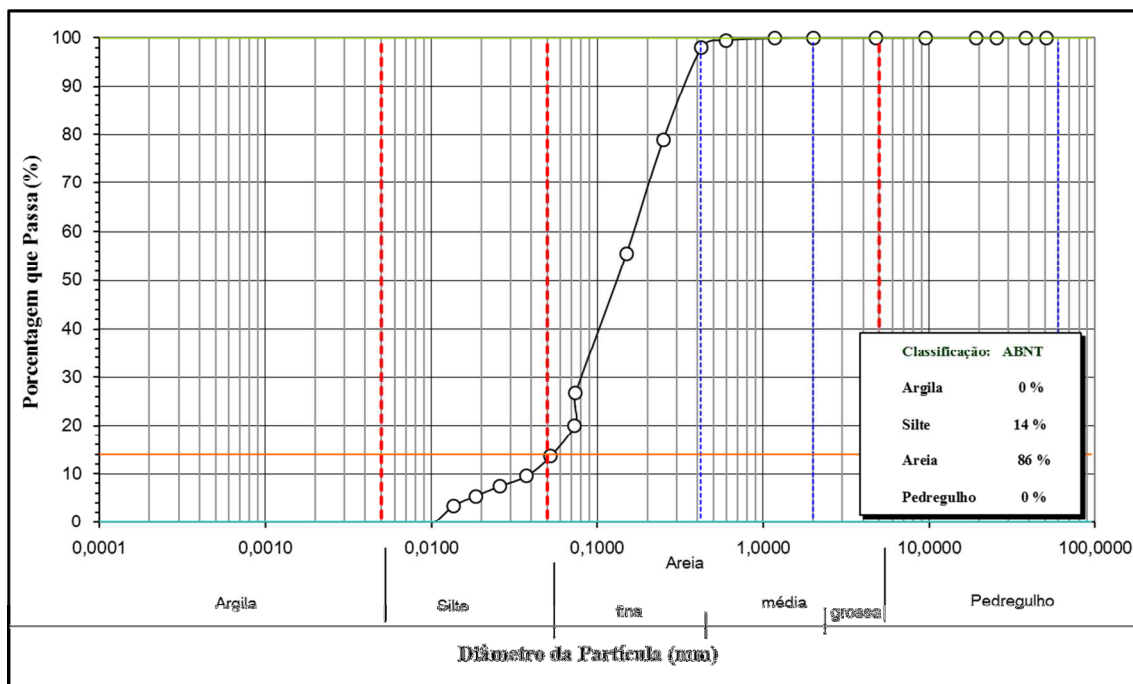


Figura 4.4: Granulometria do Rejeito.

Os Solos 1, 2 e 3 têm grande porcentagem de argila e silte, por isso suas curvas granulométricas são bem parecidas. O rejeito, como era de se esperar, apresenta grande quantidade de areia na sua composição. Os três solos têm características que adequadas para compor as camadas dos sistemas de coberturas propostos, a princípio, os Solos 1 e 2, por terem uma quantidade praticamente igual de argila na sua constituição, podem ser escolhidos para serem camadas de armazenamento e liberação (são normalmente construídas com areias siltsosas, siltes, e siltes argilosos) e/ou *topsoil* no sistema de coberturas evapotranspirativas ou podem ser o *topsoil* no sistema de cobertura prescritiva, a definição de qual papel vão assumir nas configurações das coberturas depende de outros parâmetros apresentados a seguir. Ainda, devido a maior quantidade de argila na sua constituição granulométrica, o Solo 3, a princípio, pode ser a camada barreira hidráulica nas configurações das coberturas simuladas.

#### 4.2 – Massas Específicas, Limites de Atterberg e Condutividade Hidráulica

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores das massas específicas dos sólidos, dos Limites de Atterberg e dos coeficientes de permeabilidade saturada dos solos e do rejeito.

**Tabela 4.1** - Massa específica, Limites de Atterberg e Condutividade Hidráulica dos solos utilizados como materiais de cobertura e do rejeito

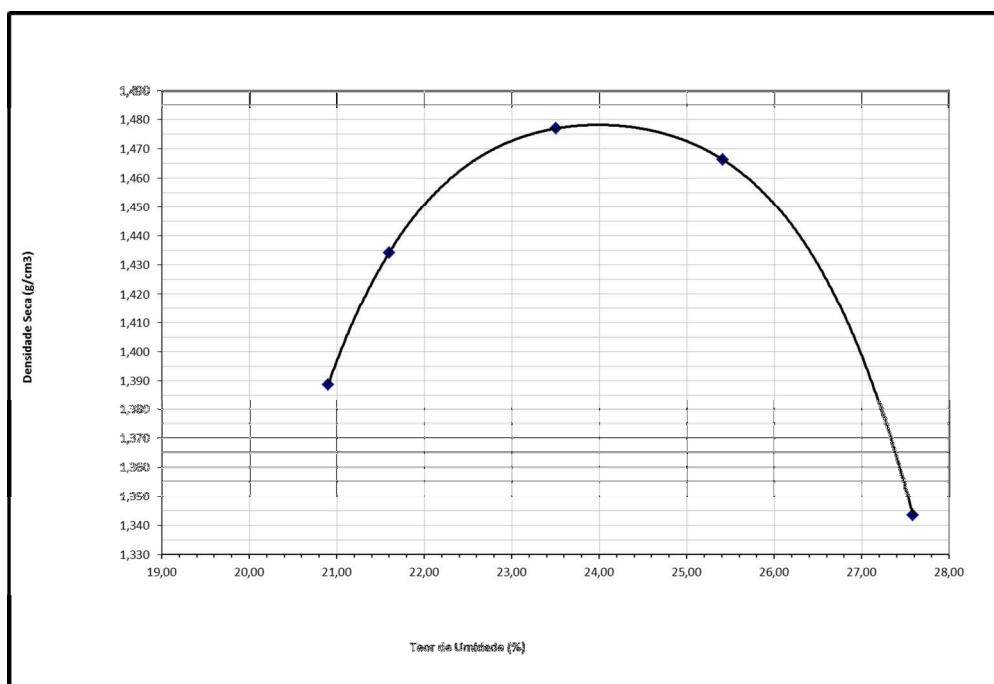
Solo	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$K_{20}$ na Umidade Ótima (cm/s)
Solo 1	2,897	48	28	20	$4,913 \cdot 10^{-7}$

<b>Solo 2</b>	2,709	57	28	29	$1,4495 \cdot 10^{-7}$
<b>Solo 3</b>	2,706	48	29	19	$3,380 \cdot 10^{-8}$
<b>Rejeito</b>	2,847	-	-	-	$2,4145 \cdot 10^{-5}$

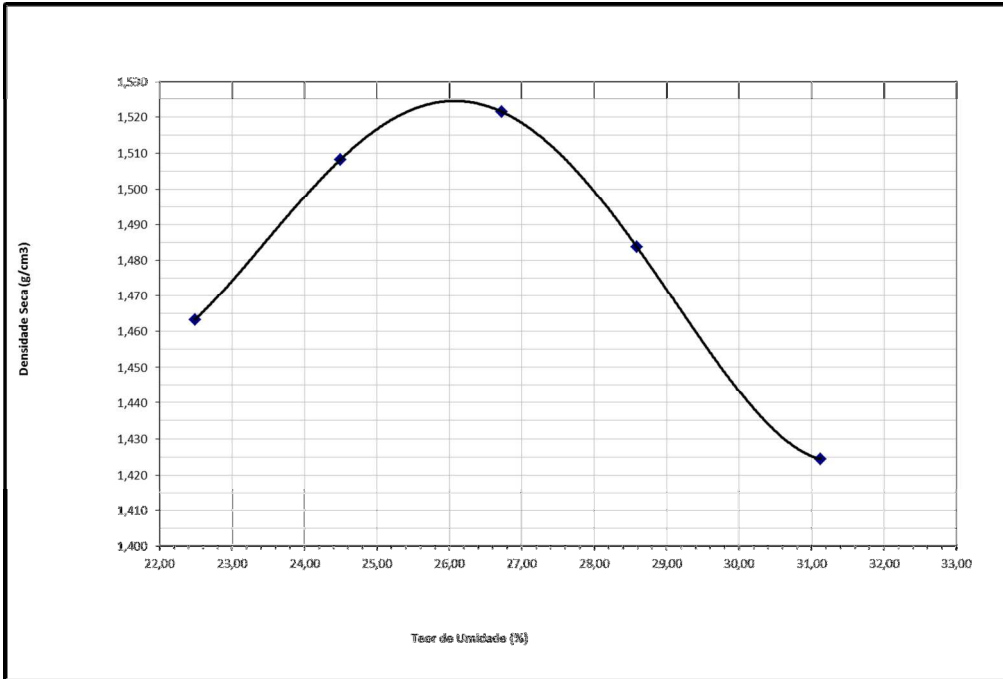
O Solo 1 foi escolhido para ser a camada superficial (*topsoil*) nos Modelos simulados por apresentar um coeficiente de permeabilidade maior que o Solo 2. No entanto, para os sistemas de coberturas prescritivas, um novo ensaio foi realizado para o Solo 1, com a umidade 2% abaixo da ótima e o resultado foi:  $K_{20} = 2,79 \cdot 10^{-6}$  cm/s e esse foi o valor usado nas simulações dos Modelos 2 e 4. O Solo 3 foi confirmado como a barreira hidráulica em todas as simulações, devido ao seu baixo coeficiente de permeabilidade.

### 4.3 – Ensaio de Compactação

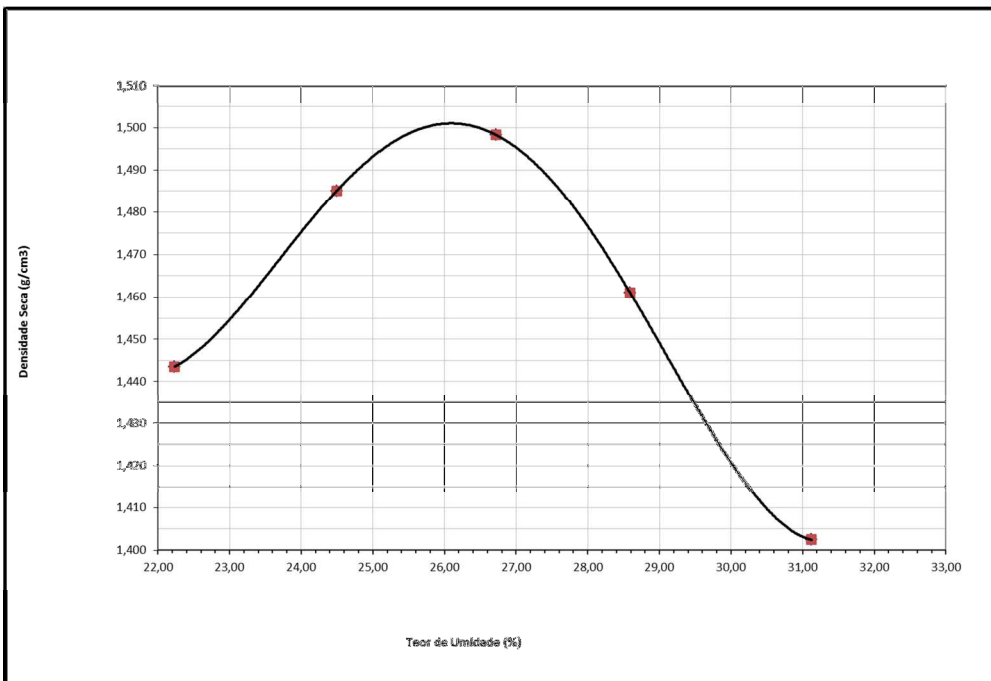
As curvas obtidas no ensaio de compactação são apresentadas nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 a seguir:



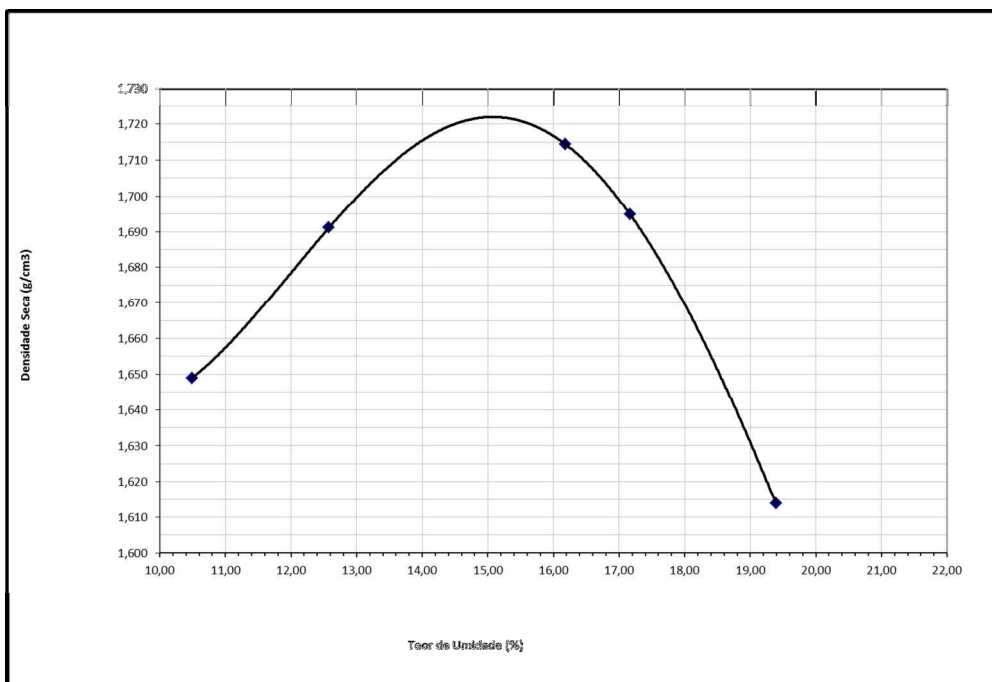
**Figura 4.5: Curva de Compactação Solo 1. Teor de umidade ótimo (%): 23,80 ; Peso Específico Aparente Seco (g/cm³): 1,478.**



**Figura 4.6: Curva de Compactação Solo 2. Teor de umidade ótimo (%): 26; Peso Específico Aparente Seco (g/cm<sup>3</sup>): 1,525.**



**Figura 4.7: Curva de Compactação Solo 3. Teor de umidade ótimo (%): 26,20; Peso Específico Aparente Seco (g/cm<sup>3</sup>): 1,502.**



**Figura 4.8:** Curva de Compacção Rejeito. Teor de umidade ótimo (%): 15,00; Peso Específico Aparente Seco (g/cm<sup>3</sup>): 1,722.

#### 4.4 – Curva de Retenção de Água

Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros do Modelo de Fredlund e Xing (1994) para o ajuste das curvas de retenção de água no solo com base nos dados obtidos pelo método do papel filtro e na centrífuga. As curvas são apresentadas nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 e as curvas de condutividade hidráulica inseridas nos Modelos se encontram nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 a seguir.

**Tabela 4.2** – Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água no solo pelo Modelo de Fredlund e Xing (1994), obtidos utilizando-se da ferramenta SOLVER do Excel.

Solo	Parâmetros			
	a	m	n	$\theta_s$
Solo 1 - CAL	124,4	3,2	0,8	0,498
Solo 2 - TOP SOIL	96,1	2,9	1,2	0,461

Solo 3 - BH	79,6	3,0	0,9	0,443
Rejeito	2,5	2,1	0,9	0,399

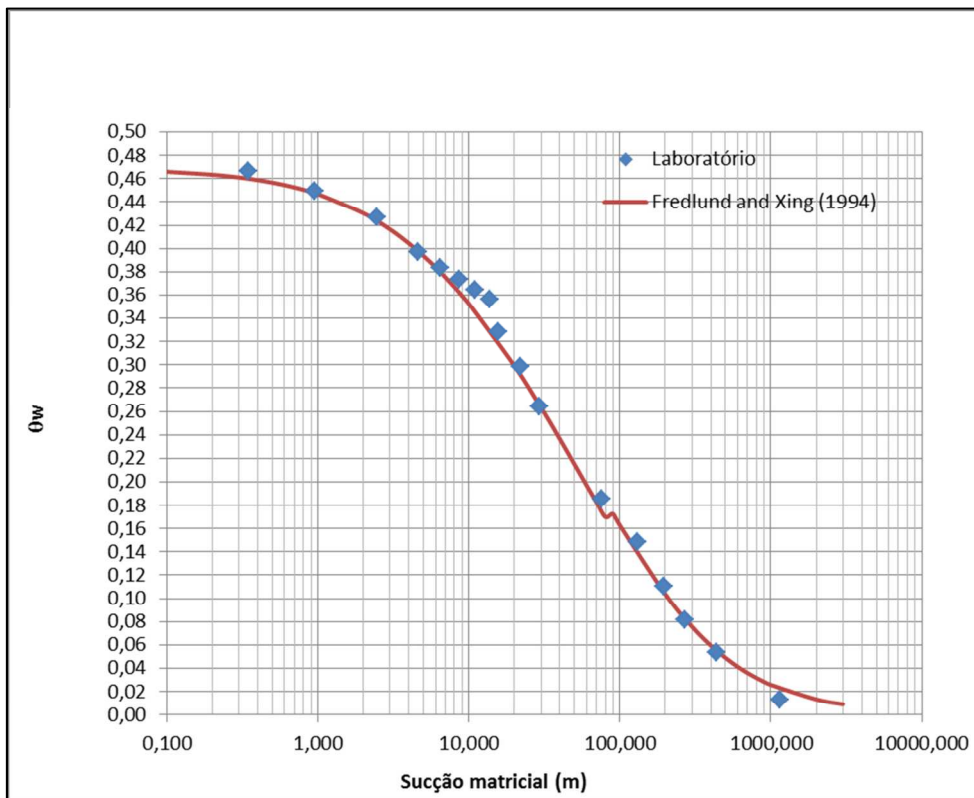


Figura 4.9: Curva de Retenção de Água - Solo 1 (*Topsoil*).

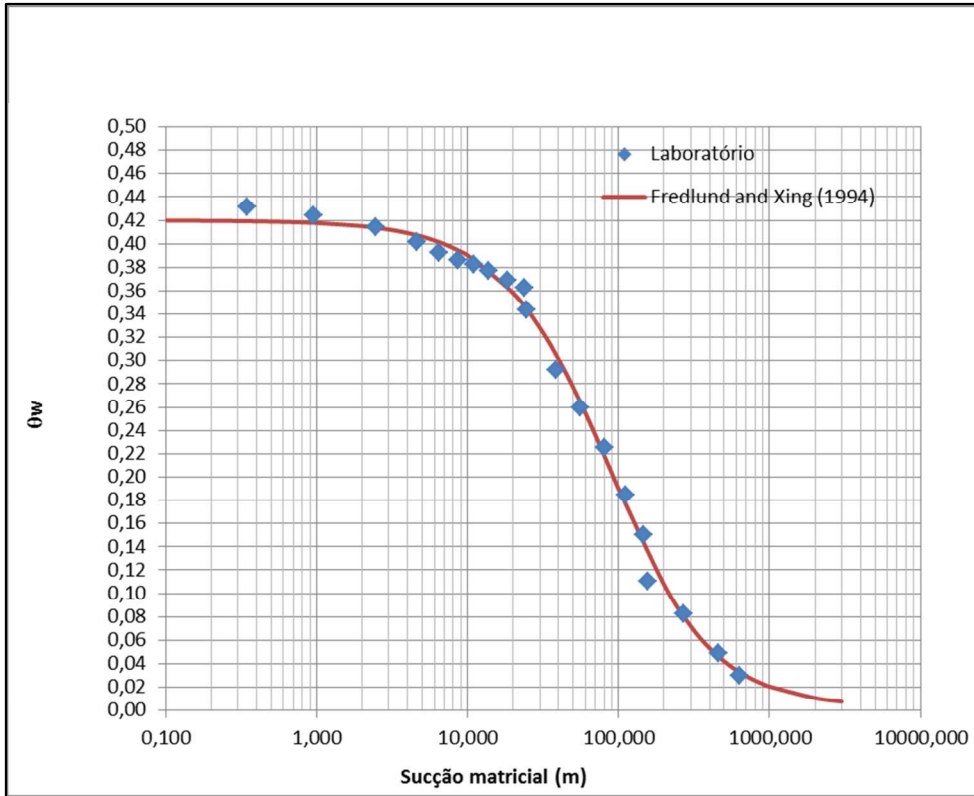


Figura 4.10: Curva de Retenção de Água - Solo 2 (Camada de Armazenamento e Liberação).

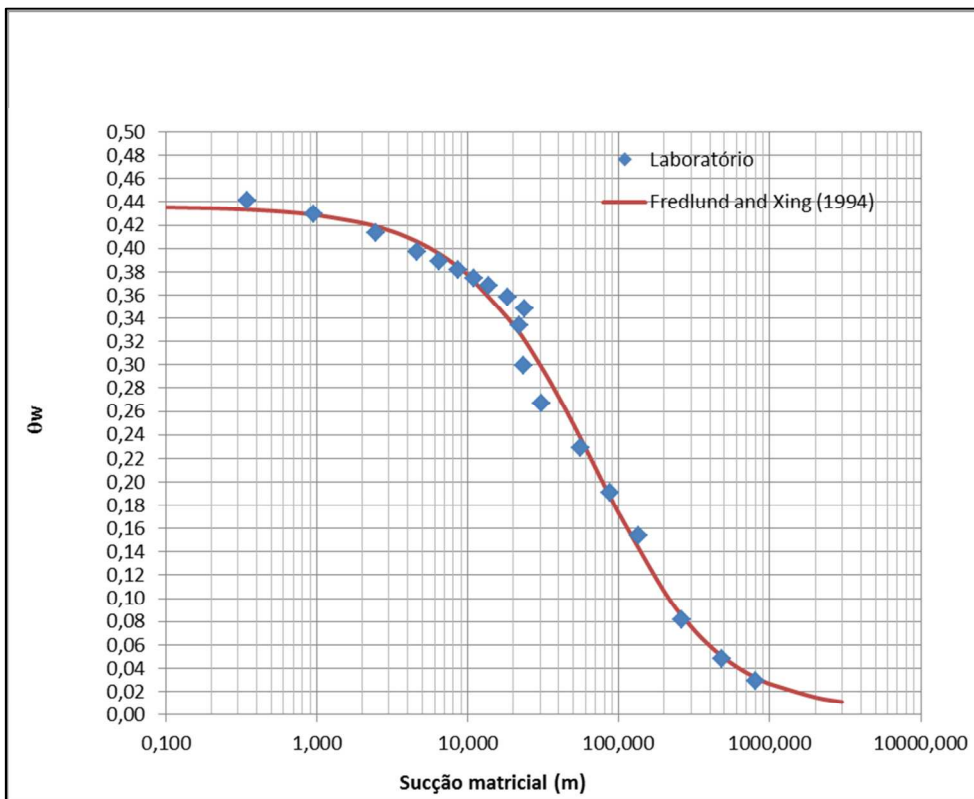
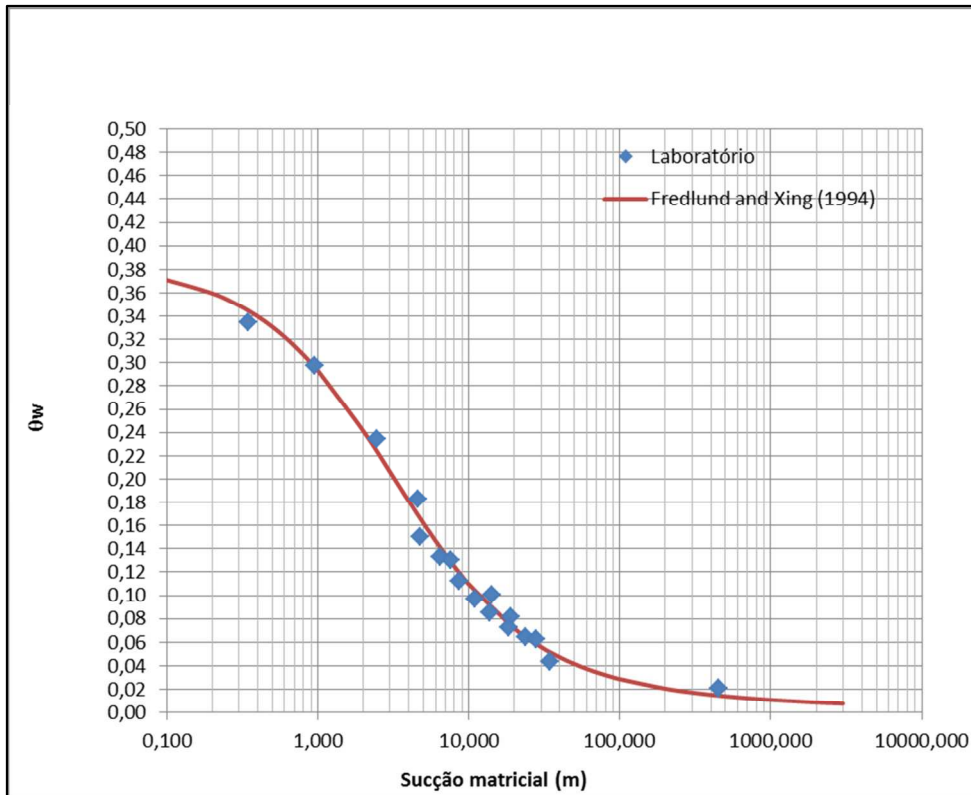
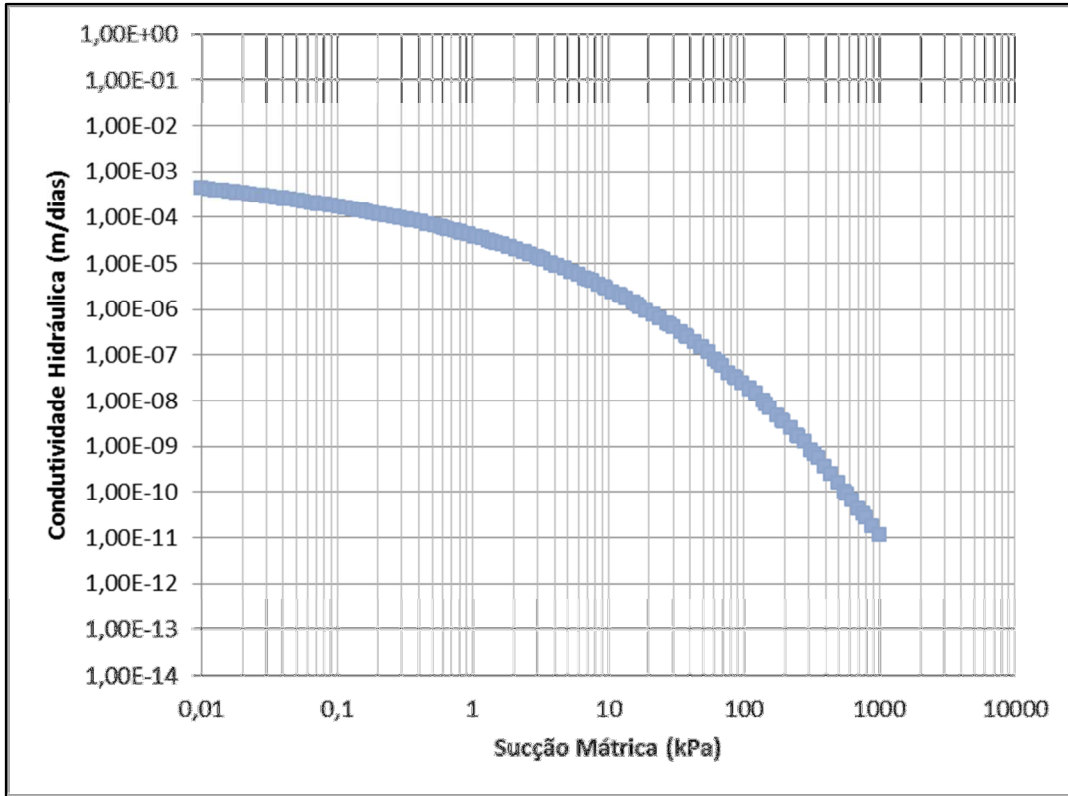


Figura 4.11: Curva de Retenção de Água - Solo 3 (Barreira Hidráulica).



**Figura 4.12: Curva de Retenção de Água – Rejeito.**

A distribuição granulométrica do solo é um dos fatores que afeta a relação sucção-umidade. Normalmente, quanto maior a quantidade da fração argila maior será o teor de umidade para um mesmo valor de sucção (Fredlund *et al.*, 1994). Isso se deve ao fato dos solos mais argilosos possuírem vazios muito pequenos, o que aumenta o efeito da capilaridade. Também se pode atribuir este efeito à maior superfície específica apresentada pelos grãos menores, o que implica num aumento das forças de adsorção (Duarte, 2012). Quando se analisa solos arenosos, observa-se que eles não possuem essa relação gradual, e sim uma variação brusca na curva de retenção. Basicamente, isso se deve a presença de poros maiores nos solos arenosos e mais conectados, uma vez estes solos mostram uma tendência de mudar o grau de saturação rapidamente à medida que a sucção aumenta quando comparados aos argilosos. Quanto mais uniforme a granulometria do solo arenoso, mais abrupta será a variação entre a umidade e a sucção (Vanapalli *et al.*, 1999). Sendo assim, os solos utilizados nesse trabalho apresentam curvas de retenção de água com o comportamento semelhante ao que se encontra registrado na literatura.



4.13: Curva de Condutividade Hidráulica - Solo 1 (*Topsoil*).

Figura

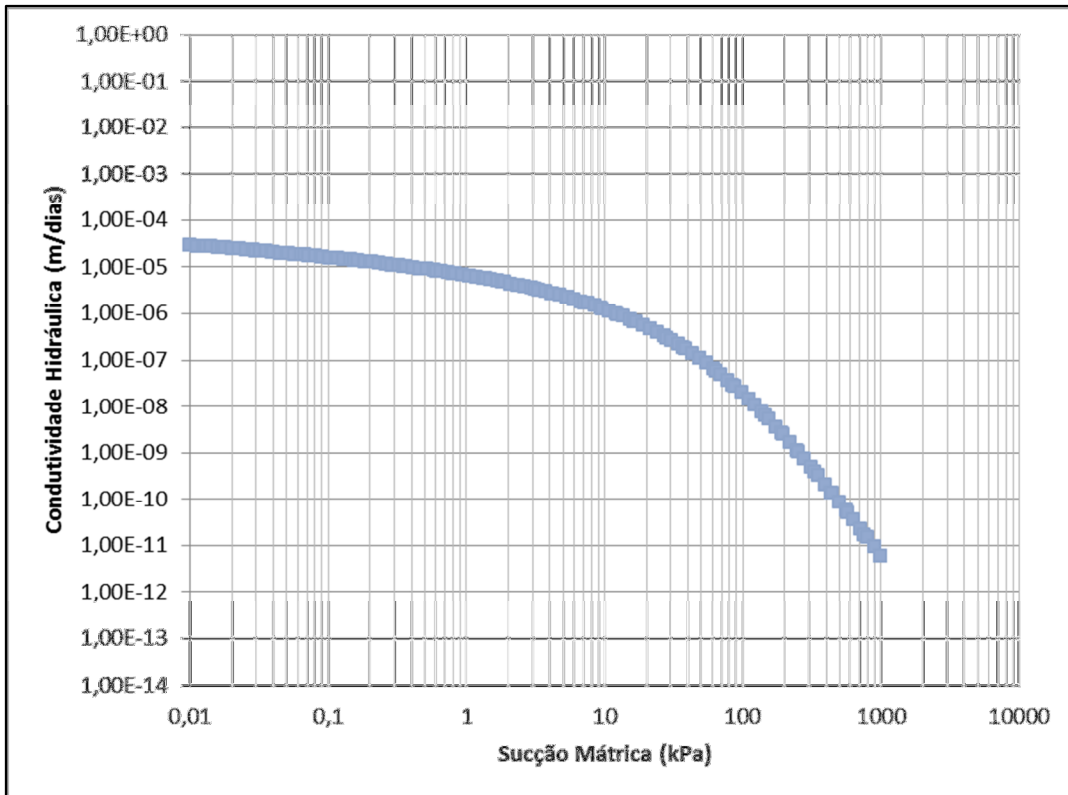


Figura 4.14: Curva de Condutividade Hidráulica-Solo 2 (Camada de Armazenamento e Liberação).

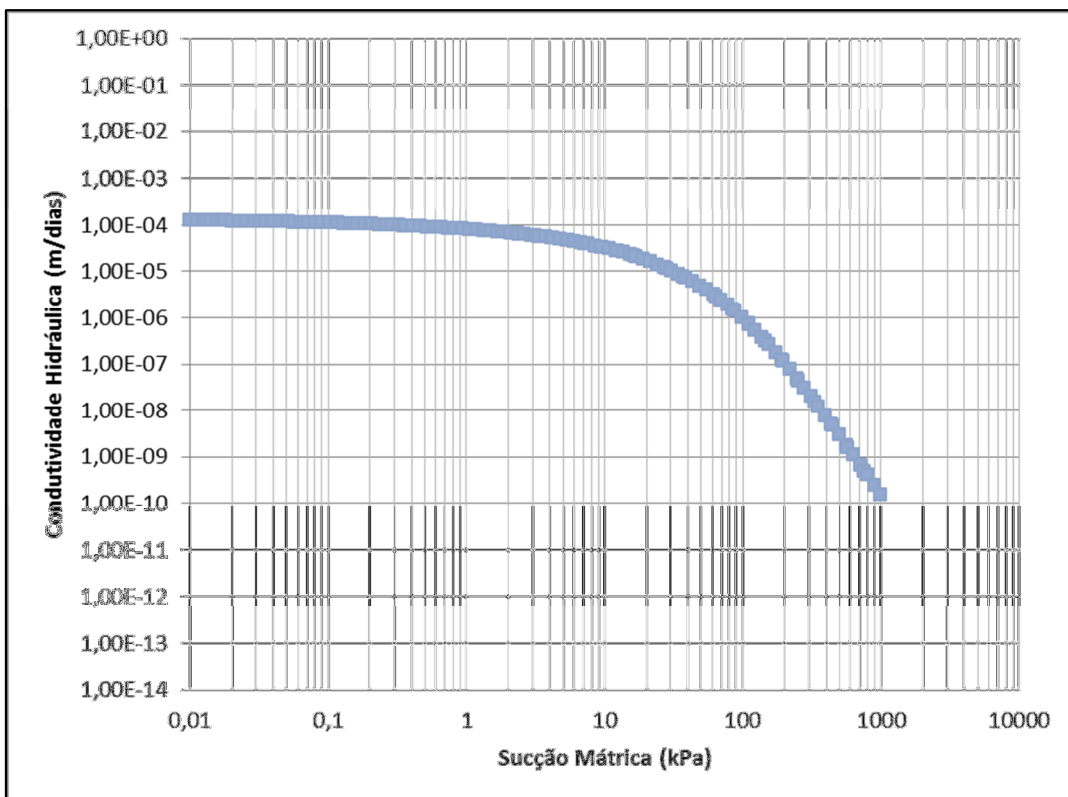


Figura 4.15: Curva de Condutividade Hidráulica - Solo 3 (Barreira Hidráulica).

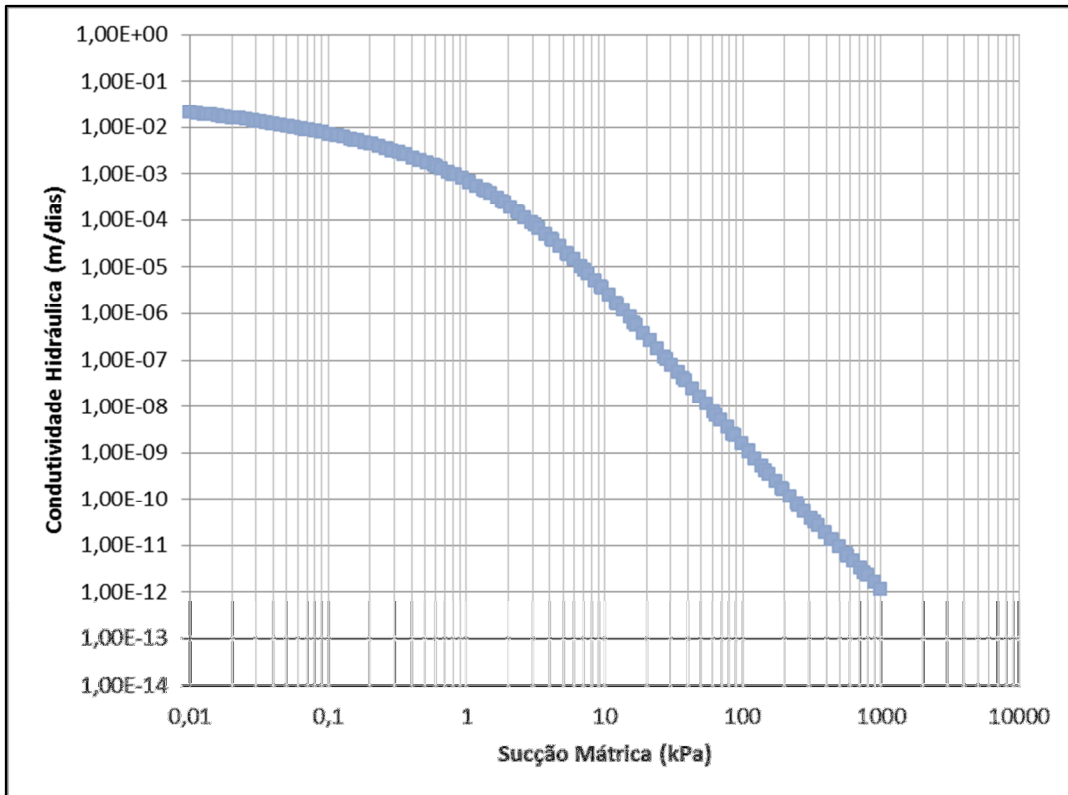


Figura 4.16: Curva de Condutividade Hidráulica – Rejeito.

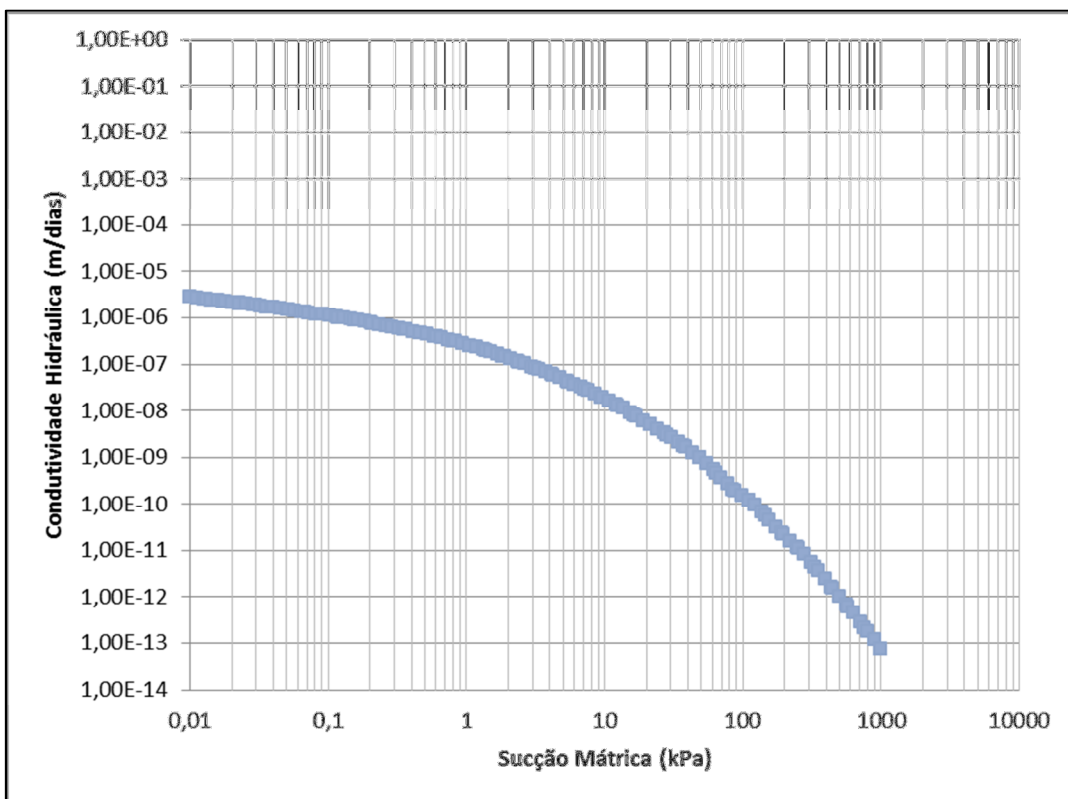


Figura 4.17: Curva de Condutividade Hidráulica – (Topsoil) - Cobertura Prescritiva

As curvas de Condutividade Hidráulica foram geradas no VADOSE/W a partir dos dados de entrada e são coerentes com o comportamento que se espera de cada solo e do rejeito nesse trabalho.

## 4.5 – Modelos Simulados

### 4.5.1 – Simulações Modelo 1 e 3

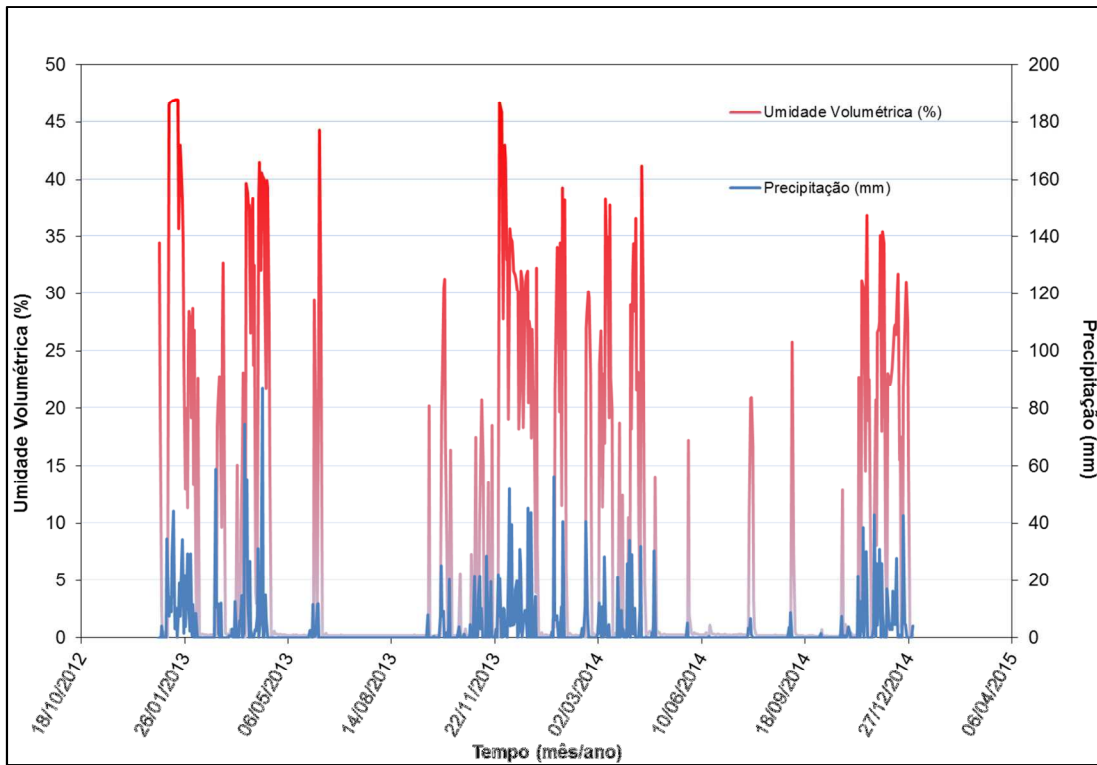


Figura 4.18: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (*Topsoil*) - Modelo 1.

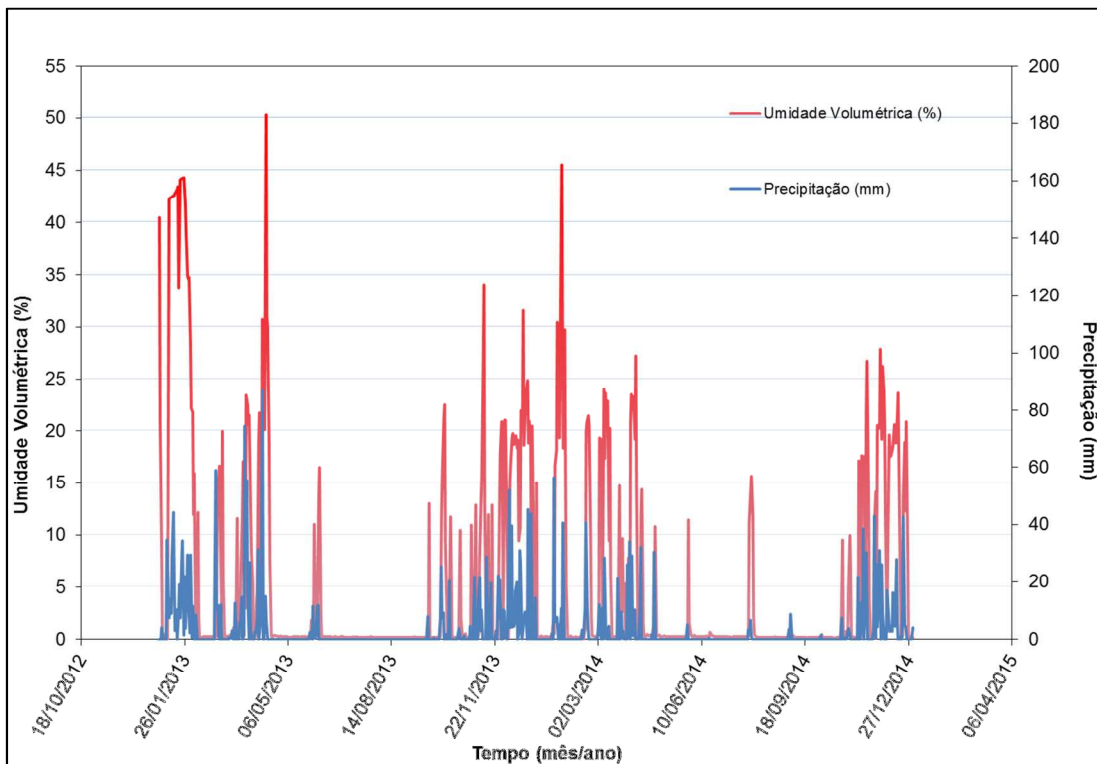
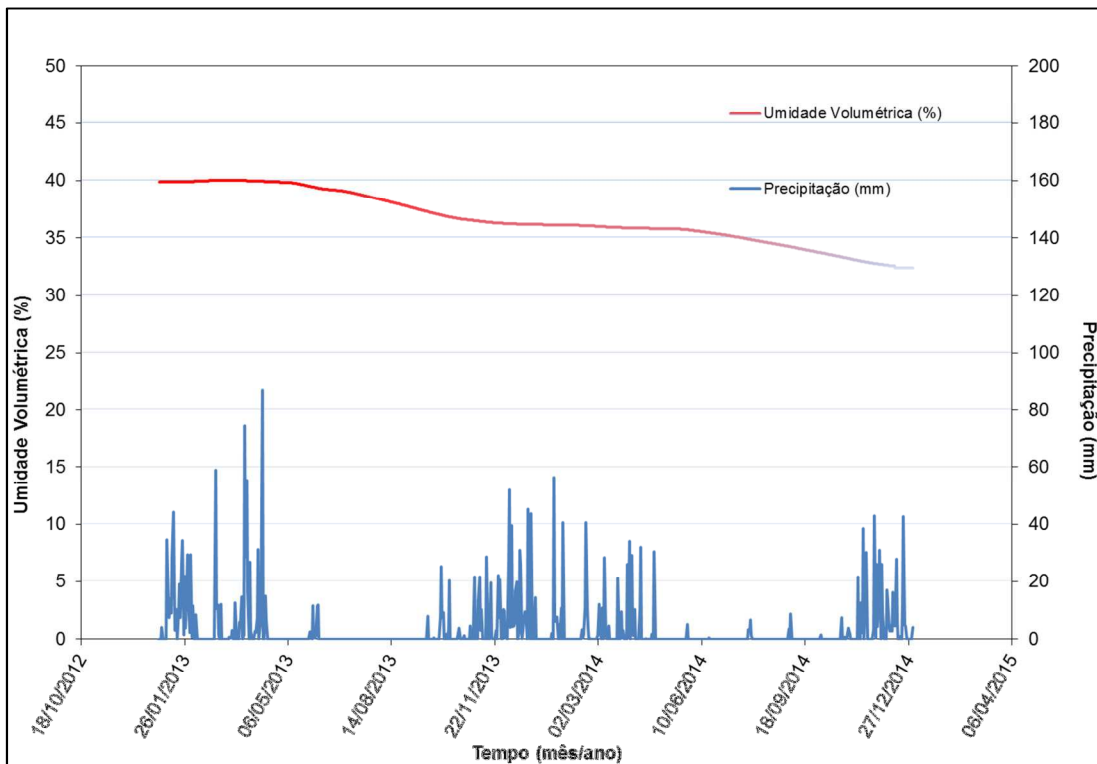
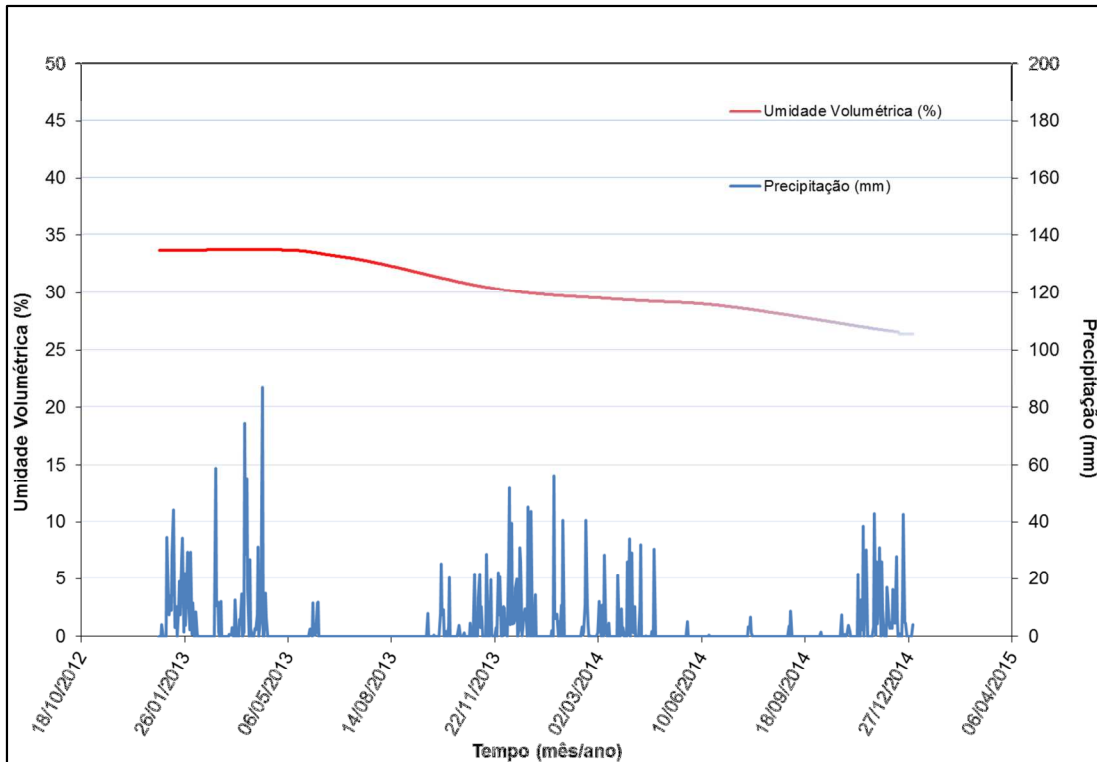


Figura 4.19: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (*Topsoil*) - Modelo 3.

Segundo a EPA (2002), o componente mais acima de um sistema de cobertura é a camada superficial (*topsoil*). Entre suas funções estão a resistência à erosão pela água e pelo vento, servir como base para o crescimento da vegetação e promover a evapotranspiração. É a camada que mais sofre influência dos fatores climáticos e isso fica claro com a variação de umidade volumétrica praticamente igual à variação dos regimes de chuva no período estudado, como se observa nas Figuras 4.19 e 4.20.

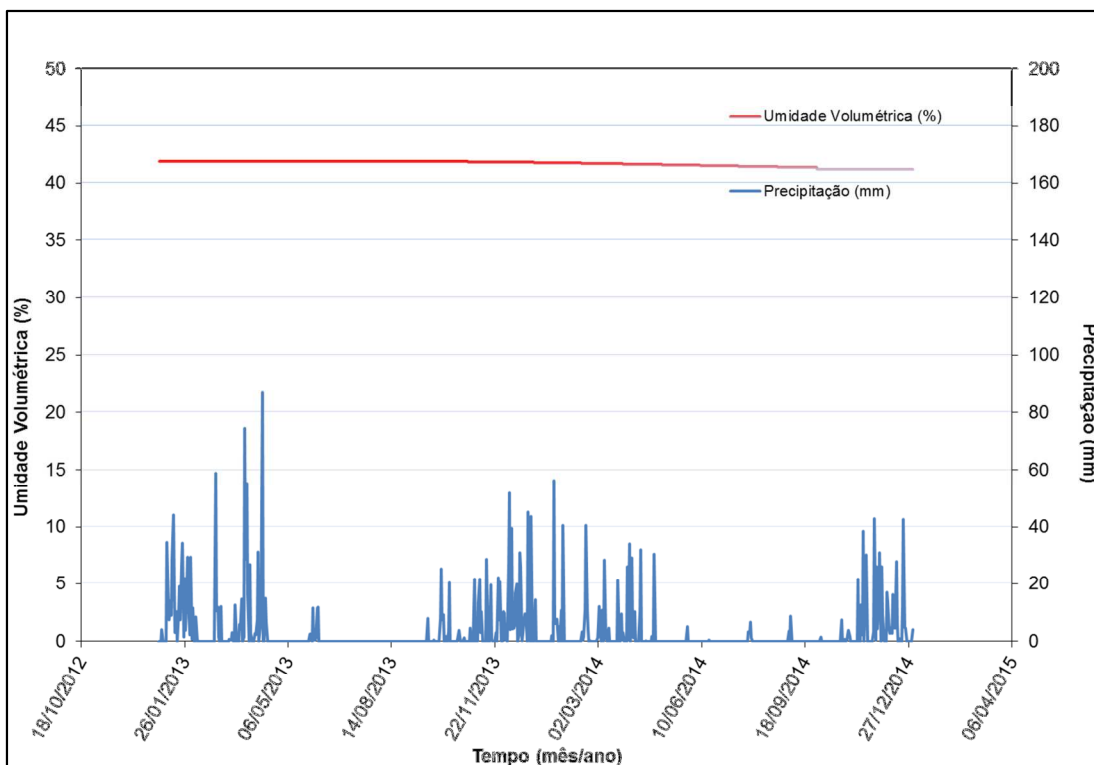


**Figura 4.20: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Camada de Armazenamento e Liberação) - Modelo 1.**



**Figura 4.21: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Camada de Armazenamento e Liberação) - Modelo 3.**

A camada de armazenamento e liberação deve se manter úmida até nos períodos secos. Aqui, observa-se que tanto no Modelo 1 quanto no Modelo 3, a perda de umidade em todo o período fica em torno de 9 %. Significa que nas duas simulações, a camada está cumprindo sua função. A diferença de valores máximos e mínimos de umidade pode ter ocorrido em decorrência da variação do nível d'água. As Figuras 4.20 e 4.21 ilustram essa situação.



Figura

4.22: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Barreira Hidráulica) - Modelo 1.

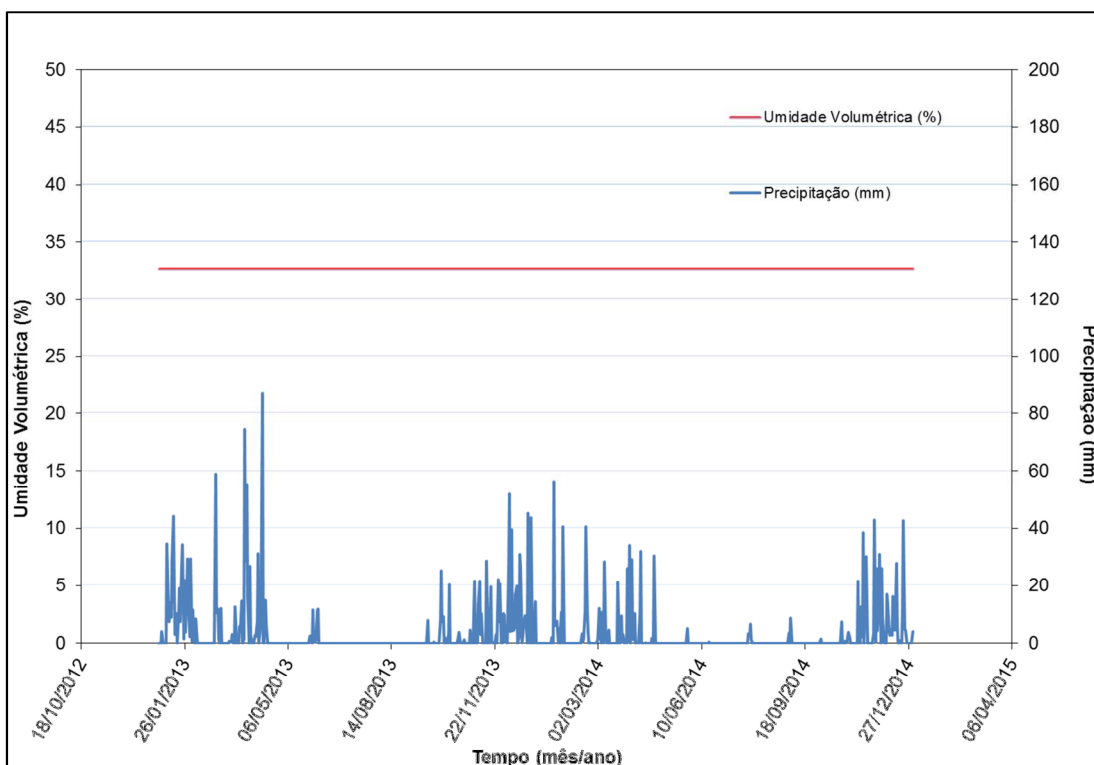


Figura 4.23: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Barreira Hidráulica) - Modelo 3.

Segundo a EPA (2002), a camada Barreira Hidráulica se constitui como um obstáculo físico de baixa permeabilidade que tem a função de impedir a migração da água para os resíduos. Nos dois Modelos 1 e 3, o que se observa é uma mínima queda de umidade no Modelo 1, decorrente, talvez da drenagem natural que ocorre nas camadas de solo, como a

variação é pequena, não significa, a princípio, nenhum problema estrutural. Os valores iniciais e finais das umidades nas duas simulações também apresentam diferenças que podem estar relacionadas à variação do nível d'água. Como não há significativa variação de umidade, as Figuras 4.22 e 4.23 ilustram a efetividade dessa camada nos Modelos simulados.

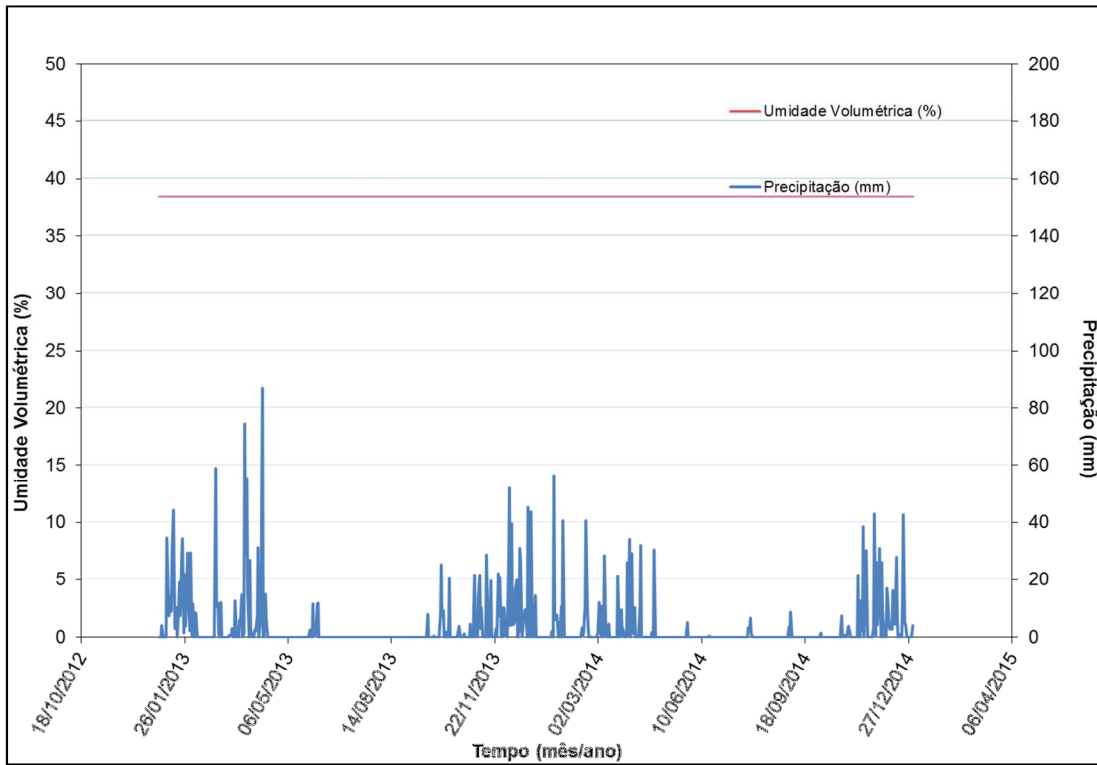
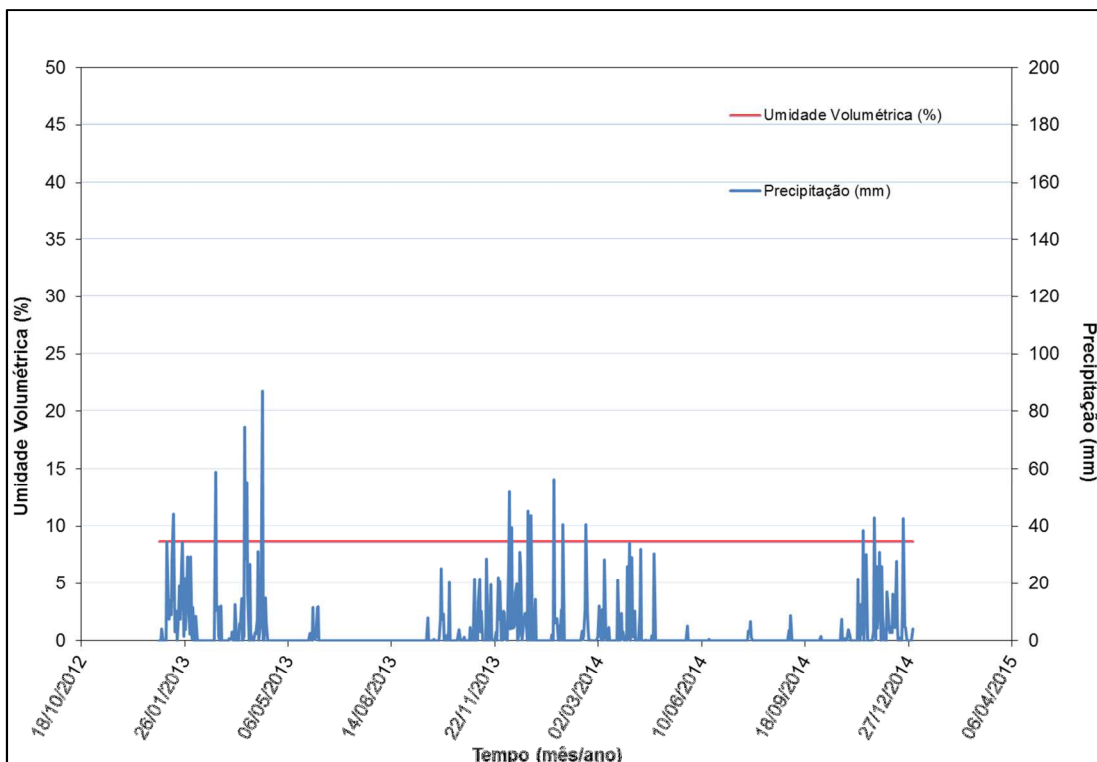
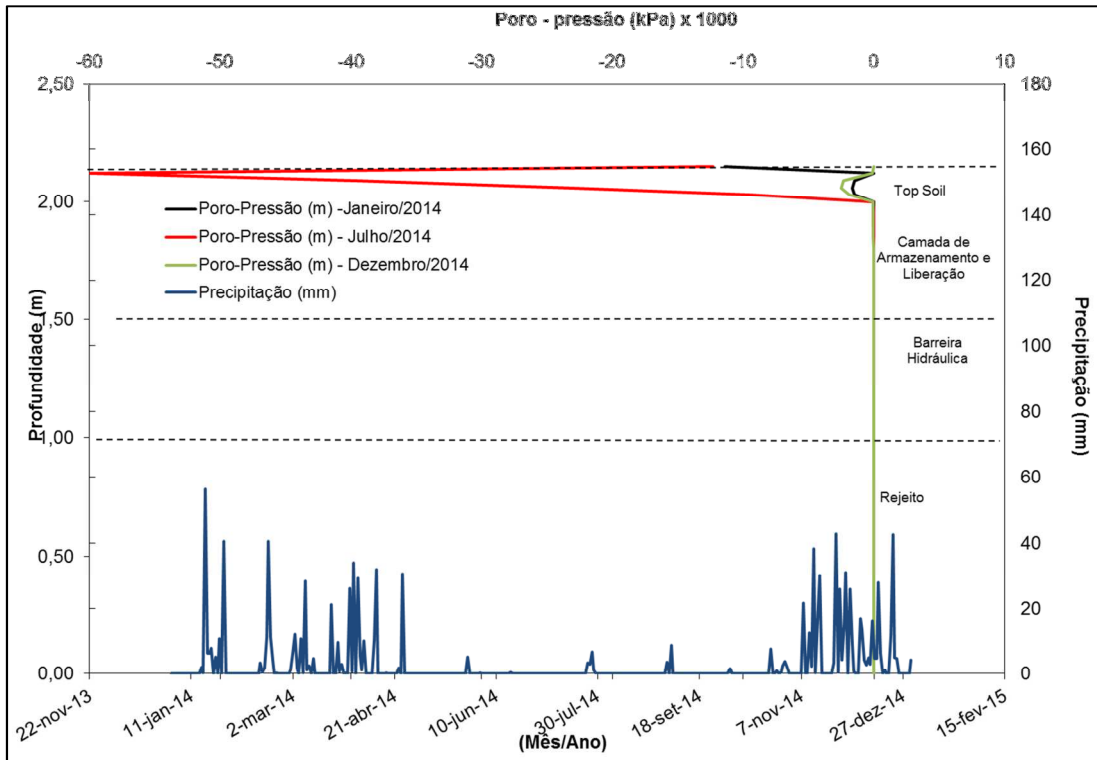


Figura 4.24: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Rejeito) - Modelo 1.

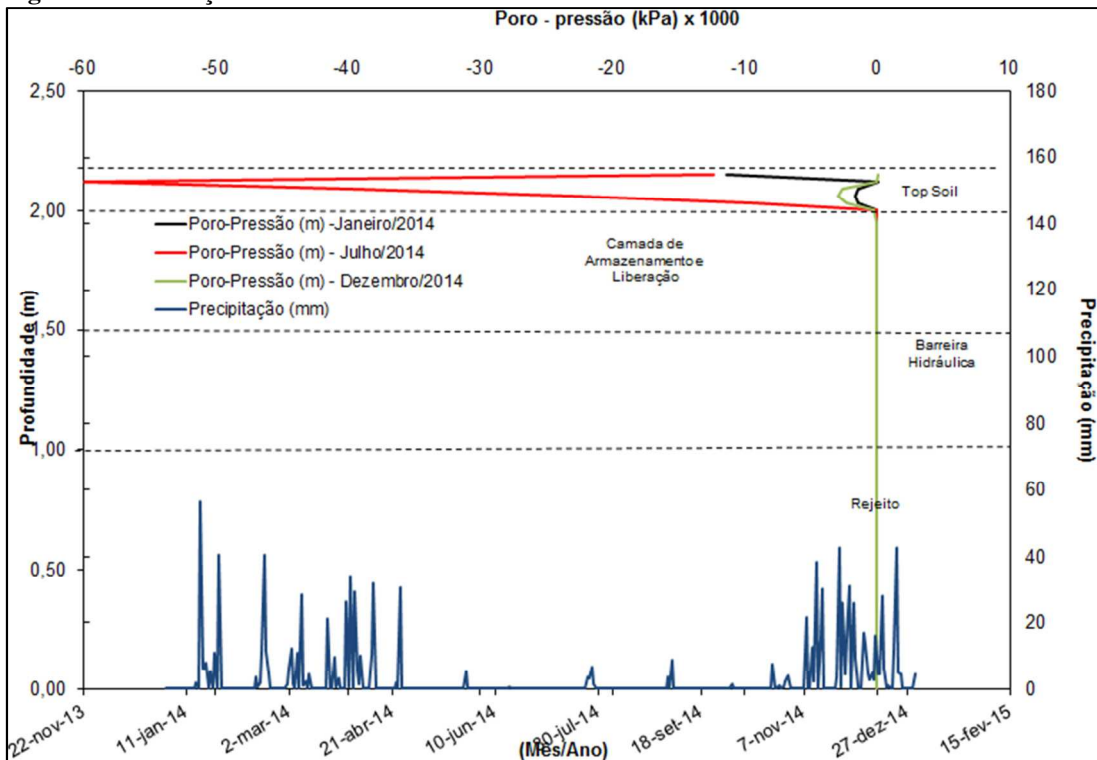


**Figura 4.25: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Rejeito) - Modelo 3.**

As camadas de rejeito nos Modelos 1 e 3 apresentam umidades volumétricas diversas, claramente em virtude da variação do nível d'água. No Modelo 1, o rejeito encontra-se saturado ou próximo da saturação e no Modelo 3 não. Esses fatos são observados nas Figuras 4.24 e 4.25.

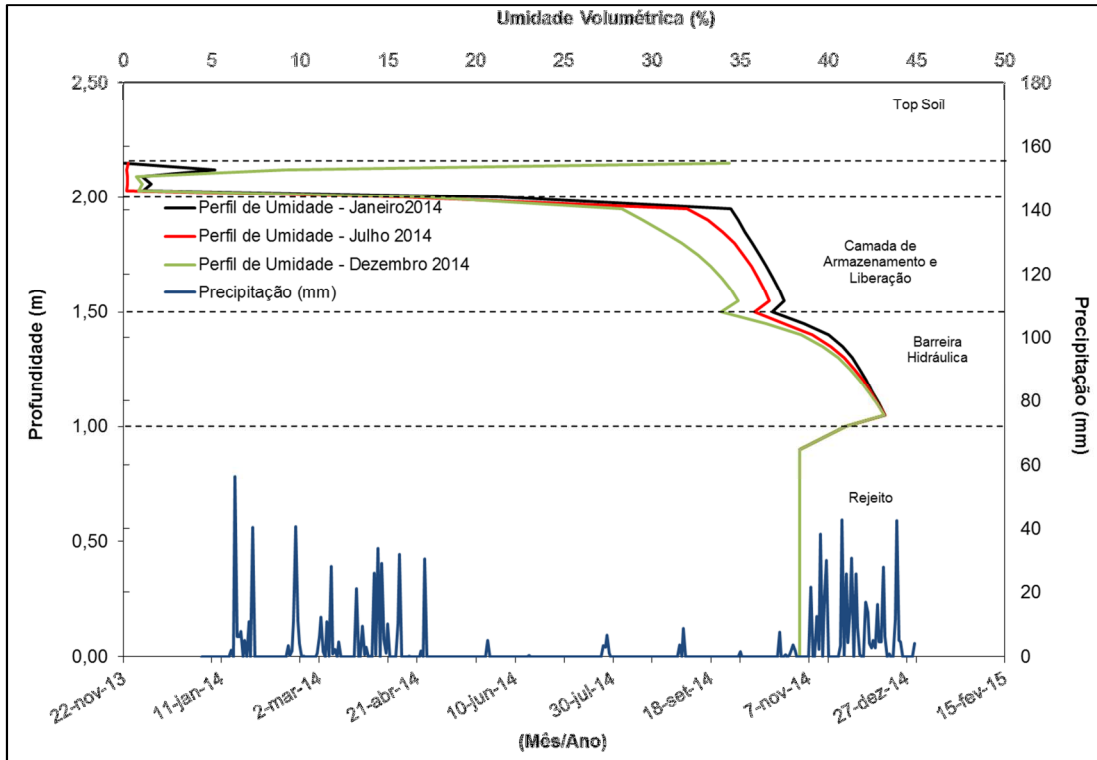


**Figura 4.26: Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014-Modelo 1.**



**Figura 4.27: Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014-Modelo 3.**

A sucção é inversamente proporcional à umidade, por isso, os maiores valores de sucção na camada *topsoil*, tanto no Modelo 1, quanto no Modelo 3 se apresentam no período correspondente à menor precipitação no período considerado - mês de julho de 2014 (Figuras 4.26 e 4.27).



**4.28: Relação Umidade Volumétrica x Profundidade - Modelo 1.**

Figura

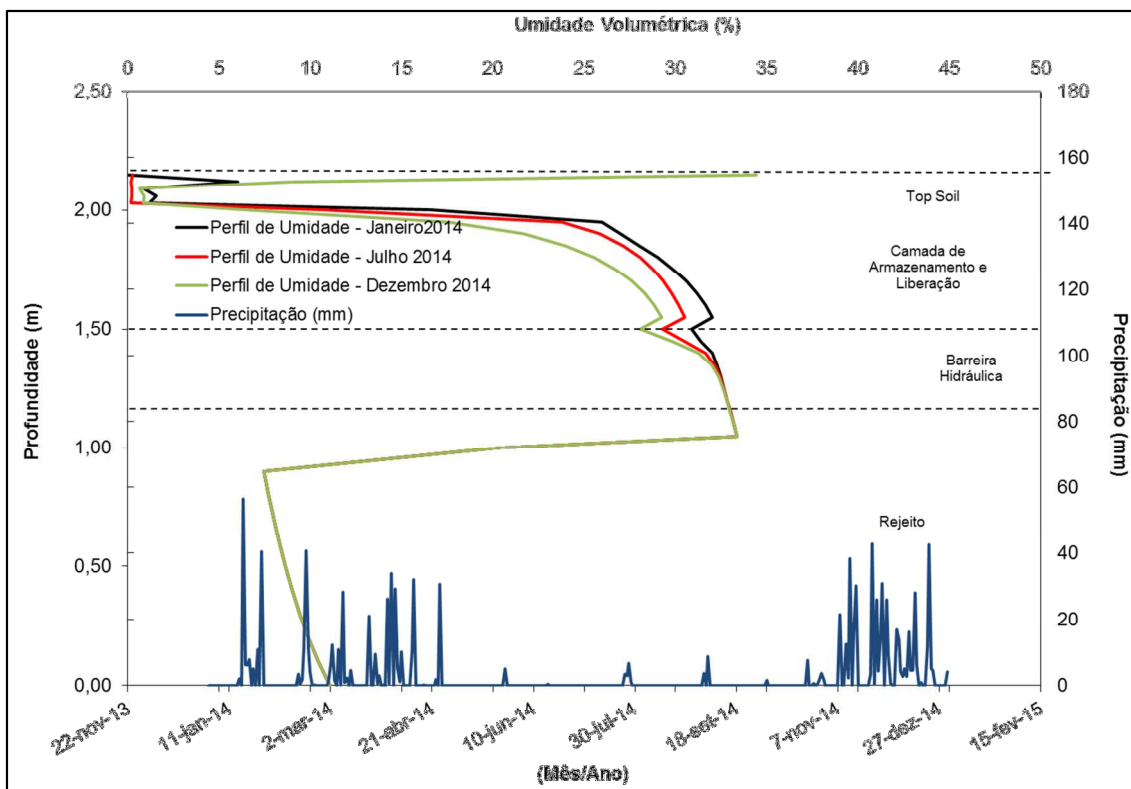


Figura 4.29: Relação Umidade Volumétrica x Profundidade - Modelo 3

No período referente à menor precipitação - mês de julho de 2014, a umidade volumétrica atinge valores próximos de zero na camada *topsoil* nos dois modelos e o que confirma a existência das maiores sucções no mesmo período, conforme citado anteriormente. As Figuras 4.28 e 4.29 ilustram esse cenário.

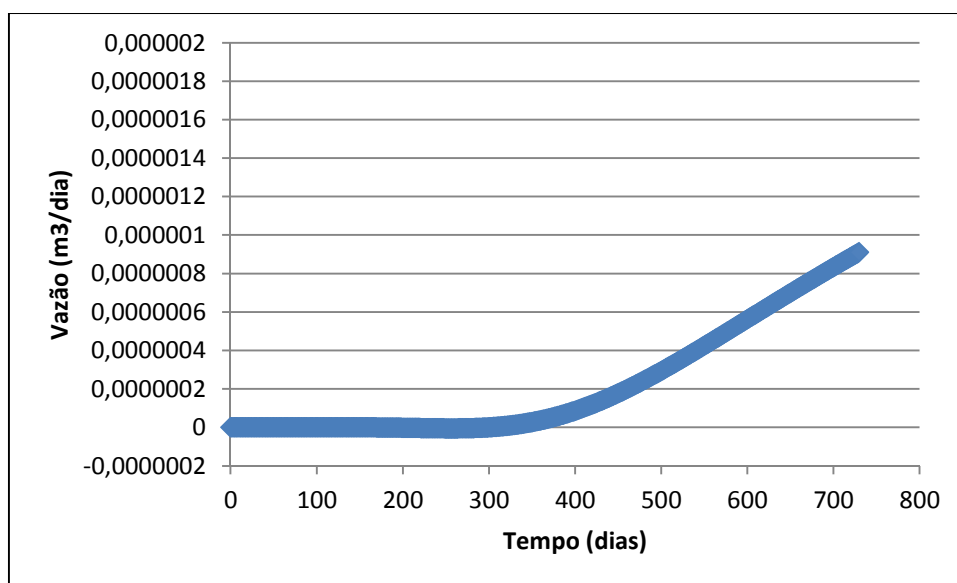
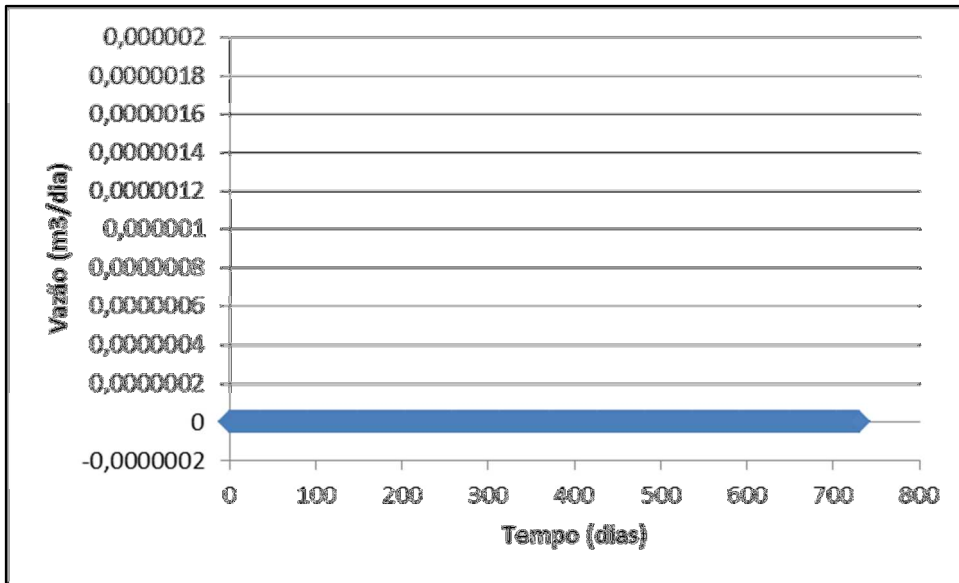


Figura 4.30: Relação Vazão na Base da Camada de Rejeito x Tempo - Modelo 1.



**Figura 4.31: Relação Vazão na Base da Camada de Rejeito x Tempo - Modelo 3.**

As vazões encontradas no fim do período considerado (730 dias - 2013 e 2014) são pequenas. O somatório das vazões do Modelo 1 resultou em  $1,59 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{dia}$  e Modelo 3 resultou em  $1,38 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{dia}$ . Proporcionalmente, os valores obtidos na Figura 4.31 são maiores que os obtidos na Figura 4.32 e isso se explica pela perda natural da água nas camadas considerando, também, a drenagem do próprio rejeito, como no Modelo 1, a camada de rejeito se encontra saturada ou perto da saturação, ela tem mais água para drenar do que a mesma camada de rejeito no Modelo 3, pois o nível d'água se encontra abaixo dela. Quanto menos água, mais difícil a sua retirada, por isso a vazão encontrada no Modelo 3 é muito menor, próxima de zero. Independente disso, como os dois sistemas estão drenando, estão ganhando mais estabilidade e conseqüentemente, o sistema vai melhorando a performance com o decorrer do tempo, conforme o esperado.

#### 4.5.2 – Simulações Modelos 2 e 4

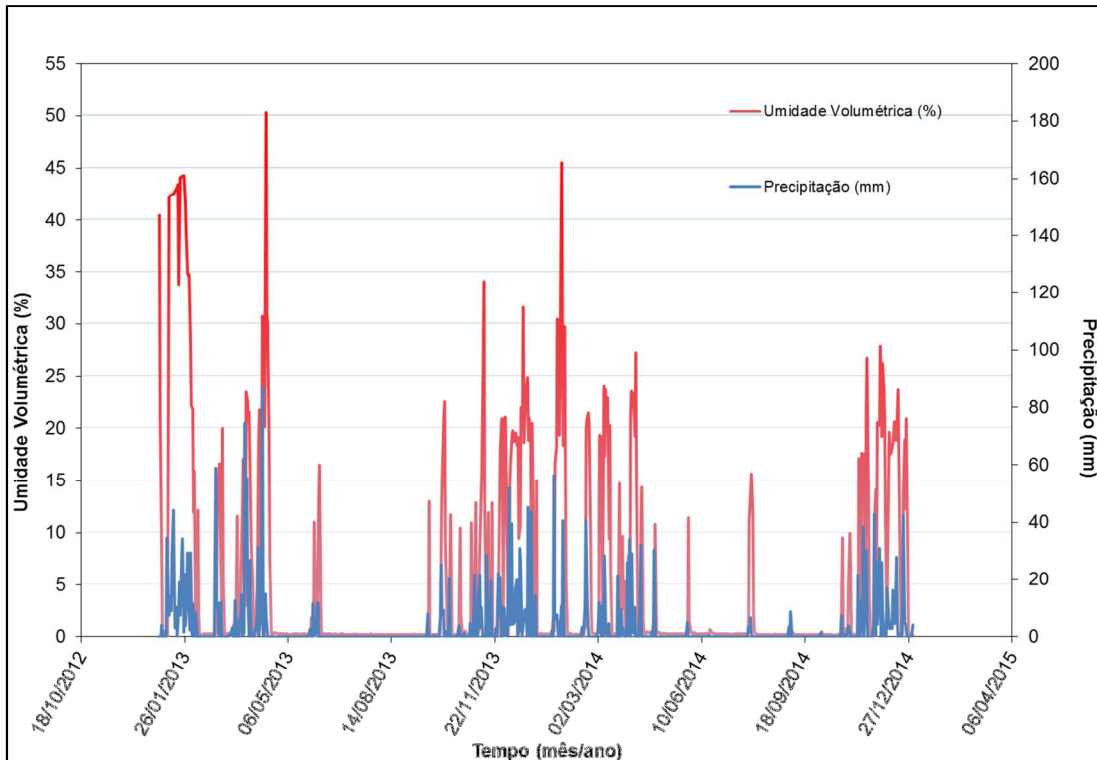


Figura 4.32: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (*Topsoil*) - Modelo 2

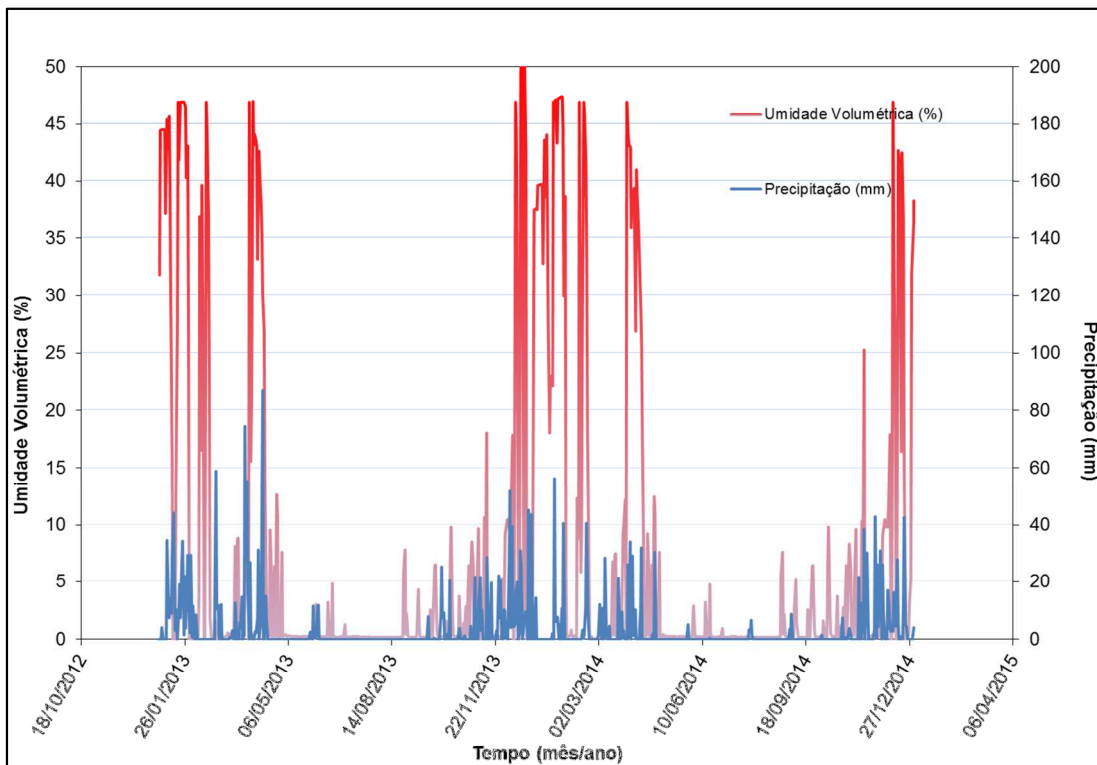


Figura 4.33: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (*Topsoil*) - Modelo 4

Segundo a EPA (2002), o componente mais acima de um sistema de cobertura é a camada superficial (*topsoil*). Entre suas funções estão: a resistência à erosão pela água e pelo

vento, servir como base para o crescimento da vegetação e promover a evapotranspiração. É a camada que mais sofre influência dos fatores climáticos e isso fica claro com a variação de umidade volumétrica praticamente igual à variação dos regimes de chuva no período estudado, como se observa nas Figuras 4.32 e 4.33. No Modelo 4, atinge-se maiores valores de umidade volumétrica.

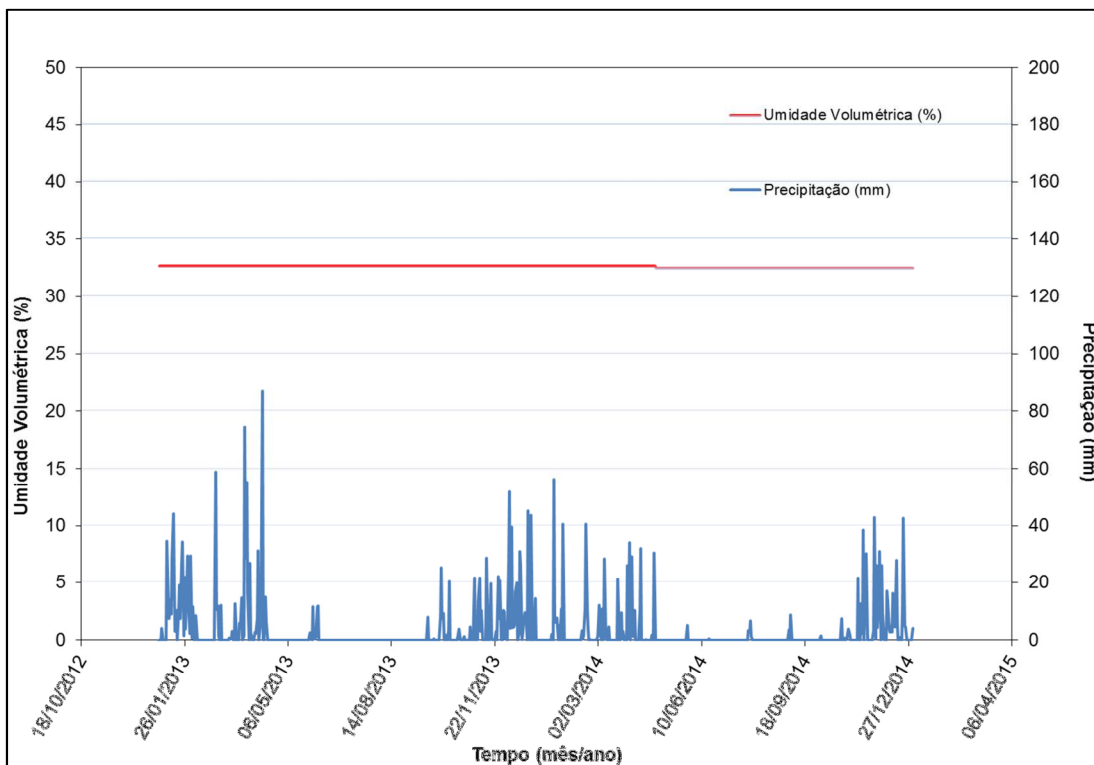
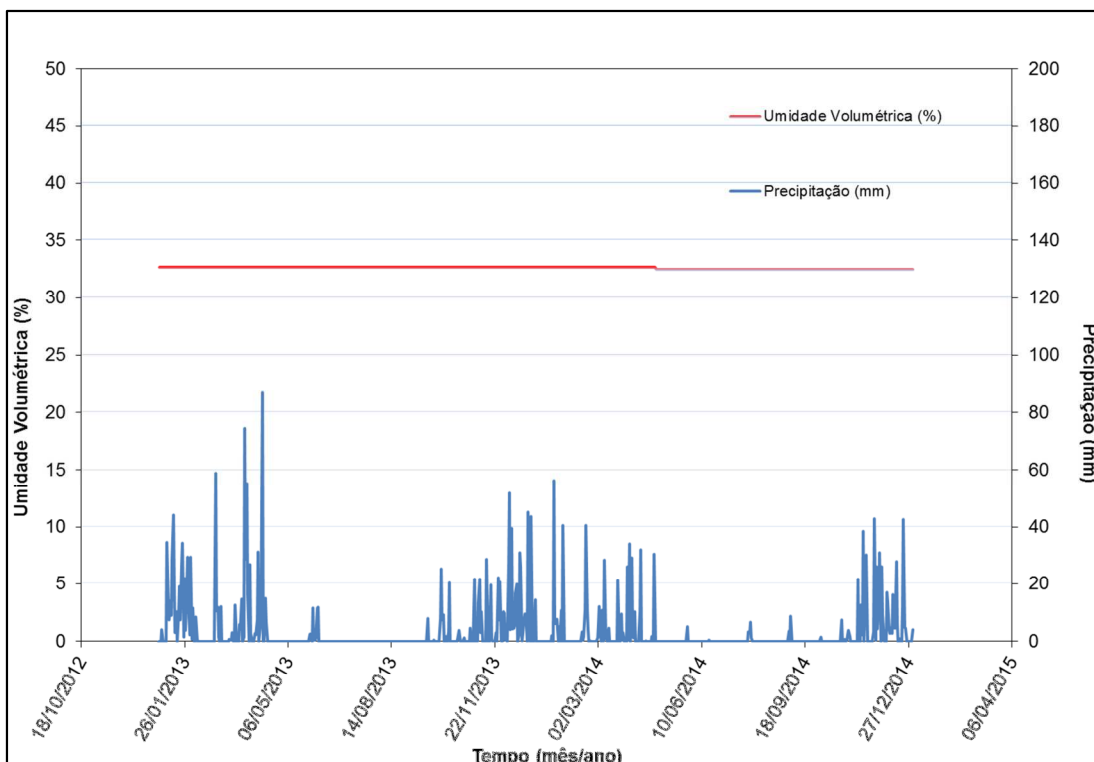
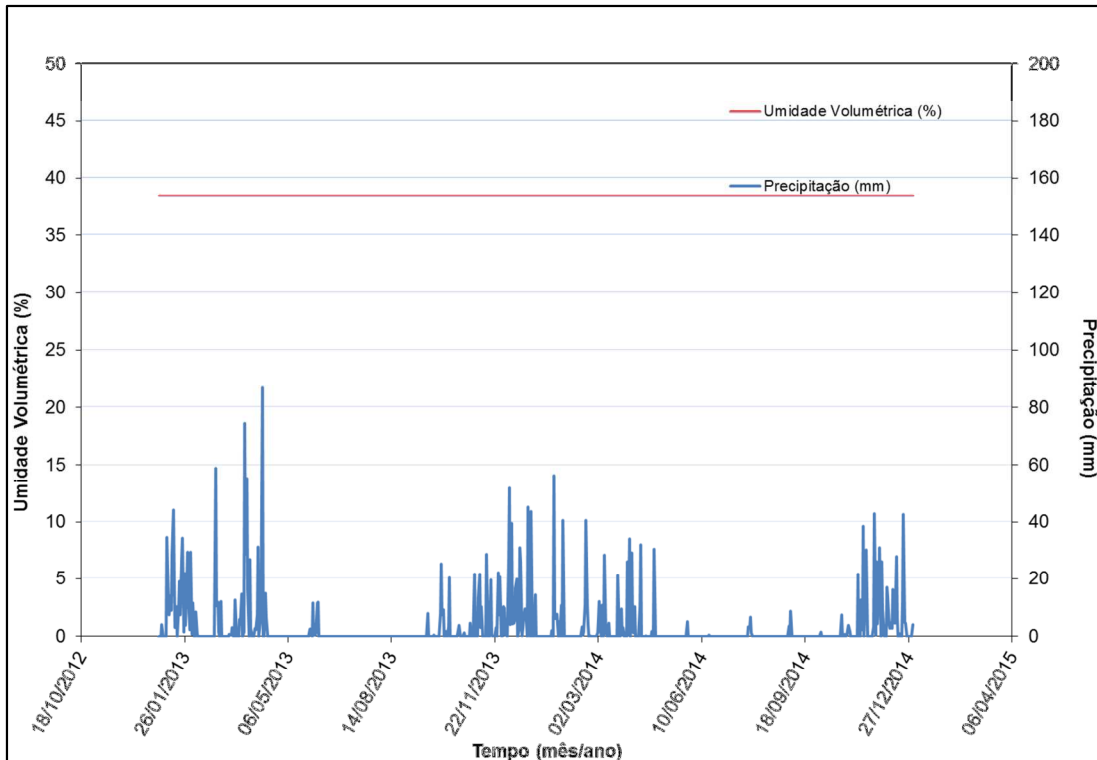


Figura 4.34: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Barreira Hidráulica) - Modelo 2.

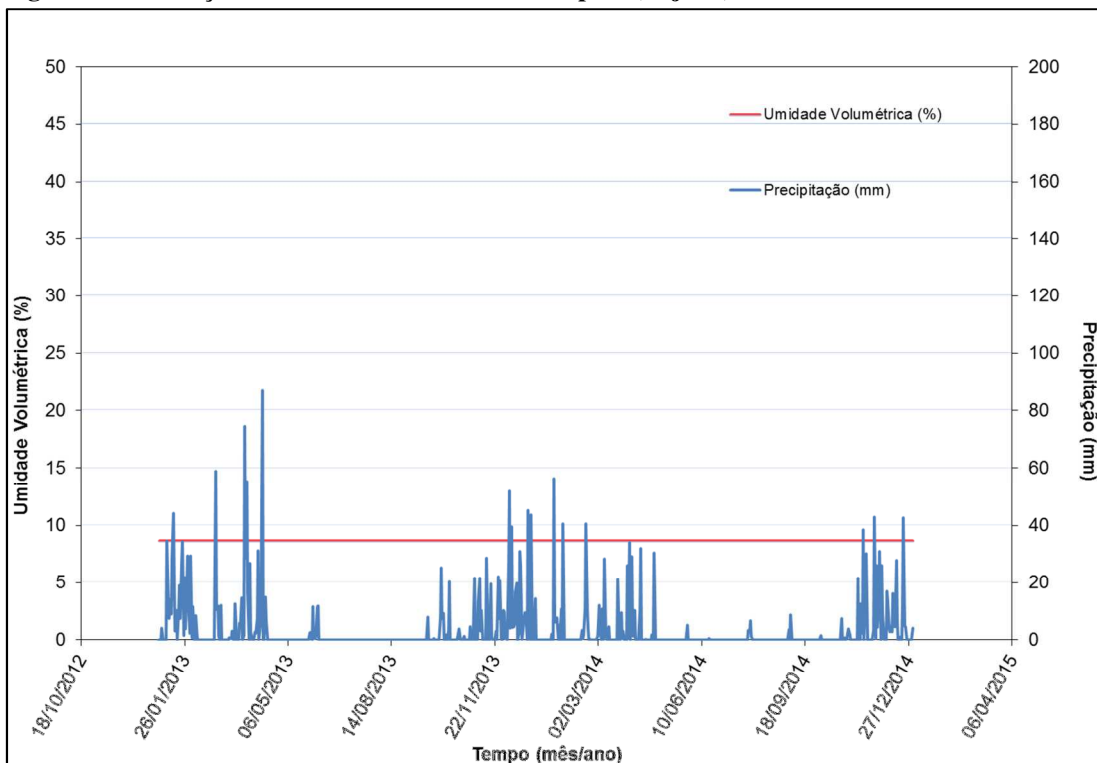


**Figura 4.35: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Barreira Hidráulica) - Modelo 4.**

Nos dois Modelos 2 e 4, o que se observa é uma mínima queda de umidade, decorrente, talvez da drenagem natural que ocorre nas camadas de solo, como a variação é pequena, não significa, a princípio, nenhum problema estrutural. Os valores iniciais e finais das umidades nas duas simulações também apresentam diferenças que podem estar relacionadas à variação do nível d'água. Como não há significativa variação de umidade, as Figuras 4.34 e 4.35 ilustram a efetividade dessa camada nos Modelos simulados.



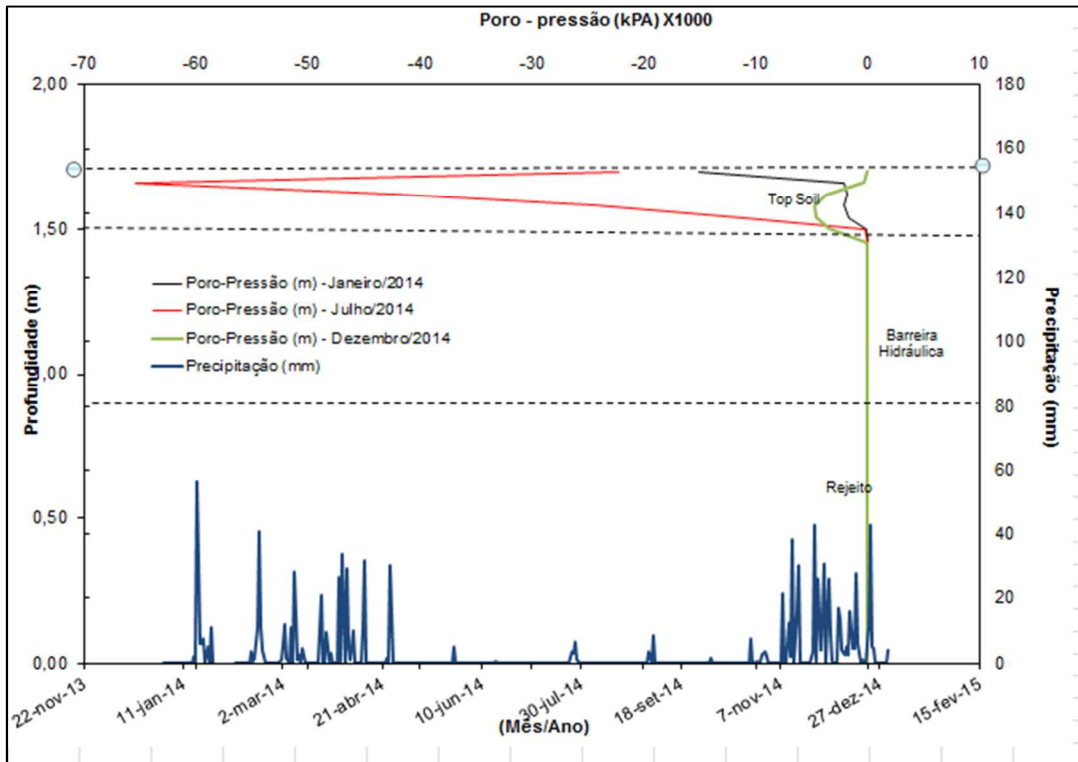
**Figura 4.36: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Rejeito) - Modelo 2.**



**Figura 4.37: Relação Umidade Volumétrica x Tempo – (Rejeito) - Modelo 4.**

As camadas de rejeito nos Modelos 1 e 3 apresentam umidades volumétricas diversas, claramente em virtude da variação do nível d'água. No Modelo 1, o rejeito encontra-se

saturado ou próximo da saturação e no Modelo 3 não. Esses fatos são observados nas Figuras 4.36 e 4.37.



Figura

4.38: Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014-Modelo 2.

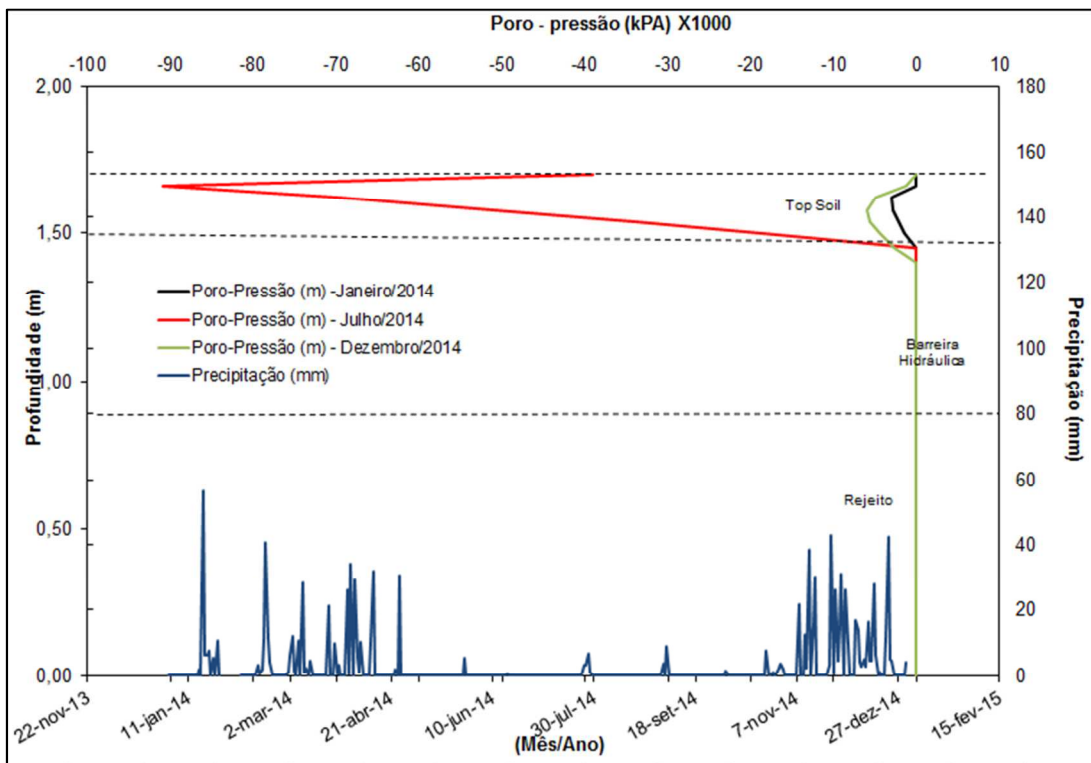


Figura 4.39: Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014-Modelo 4.

A sucção é inversamente proporcional à umidade, por isso, os maiores valores de sucção na camada *topsoil*, tanto no Modelo 1, quanto no Modelo 3 se apresentam no período correspondente à menor precipitação no período considerado - mês de julho de 2014 (Figuras 4.38 e 4.39).

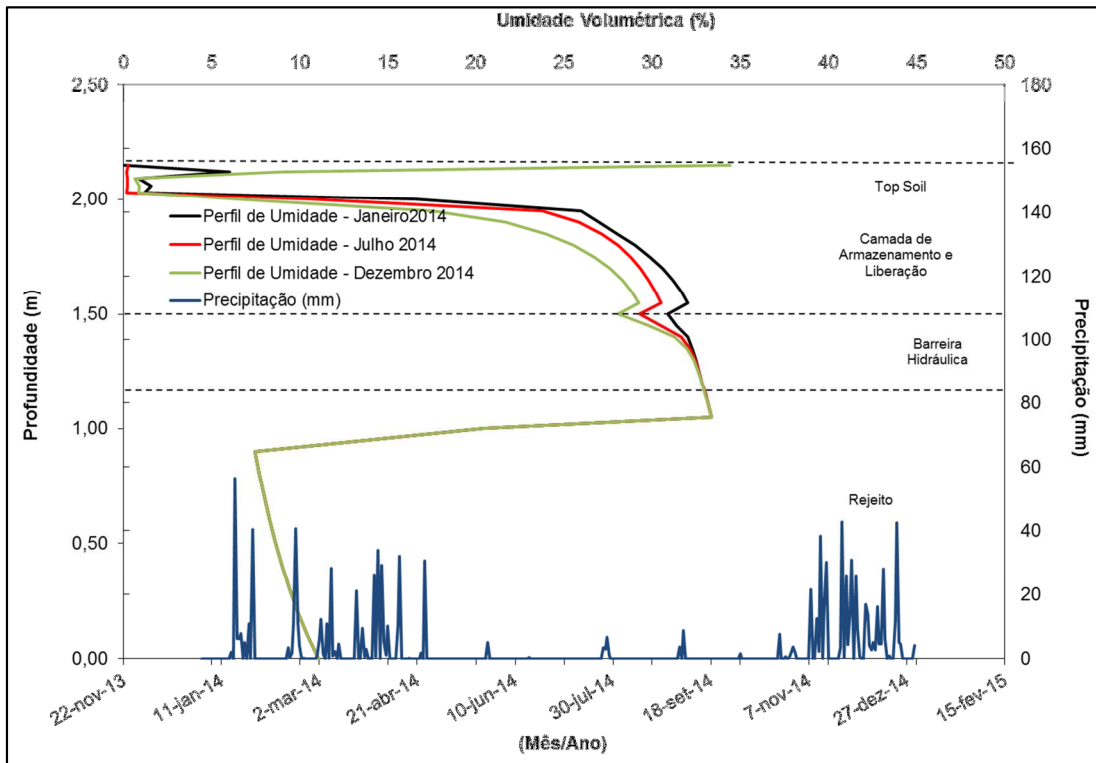


Figura 4.40: Relação Umidade Volumétrica x Profundidade no ano de 2014-Modelo 2.

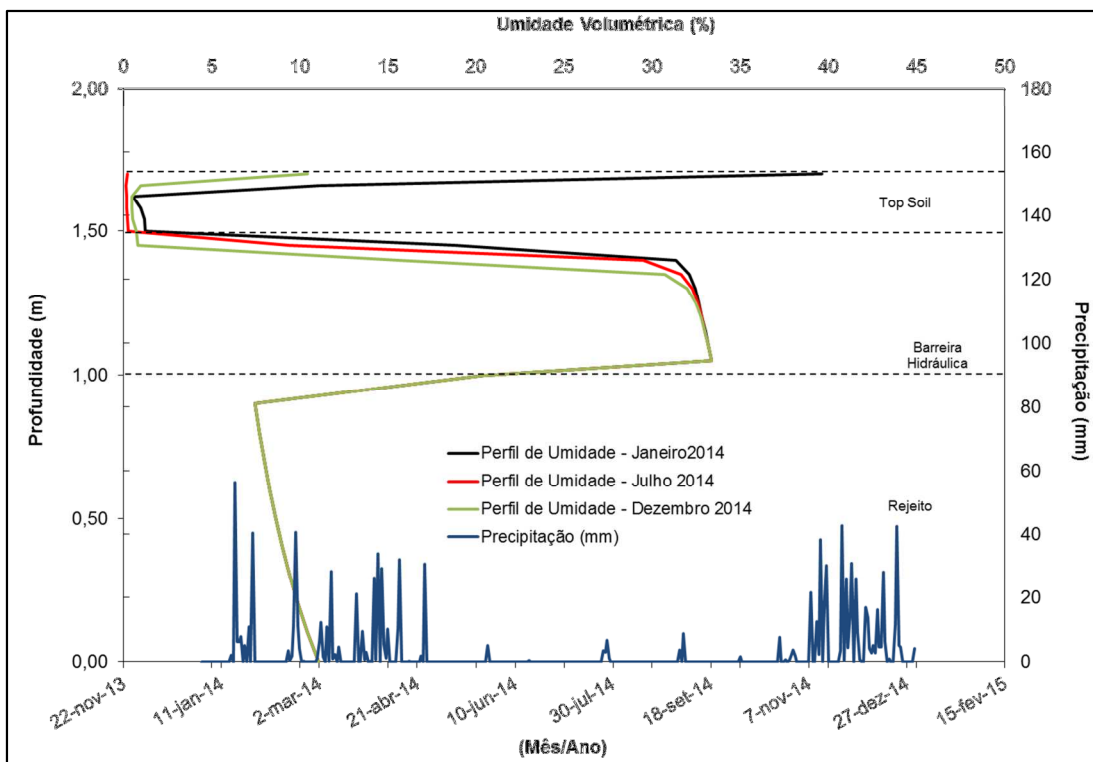


Figura 4.41: Relação Umidade Volumétrica x Profundidade no ano de 2014-Modelo 4.

No período referente à menor precipitação - mês de julho de 2014, a umidade volumétrica atinge valores próximos de zero na camada *topsoil* nos dois modelos e o que confirma a existência das maiores sucções no mesmo período, conforme citado anteriormente. As Figuras 4.40 e 4.41 ilustram esse cenário.

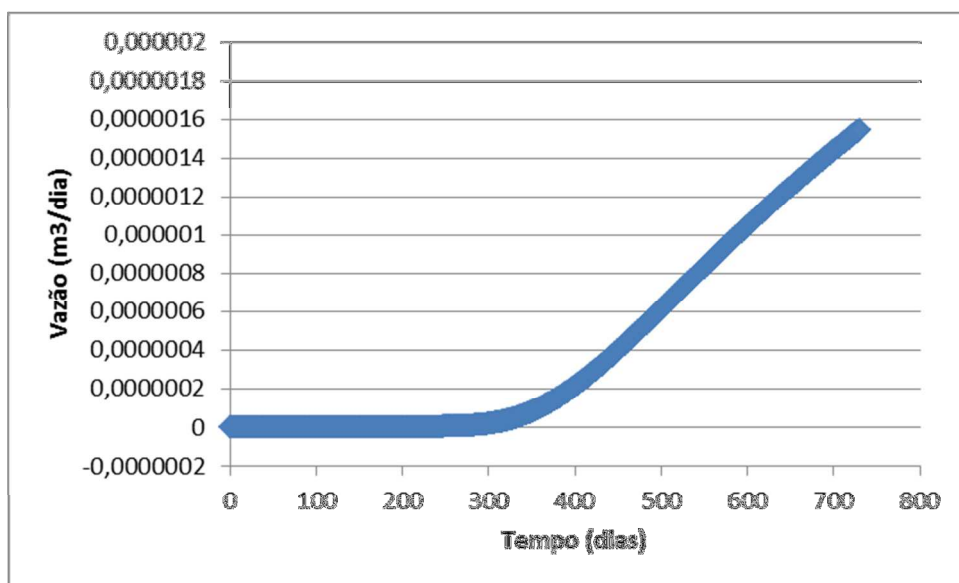
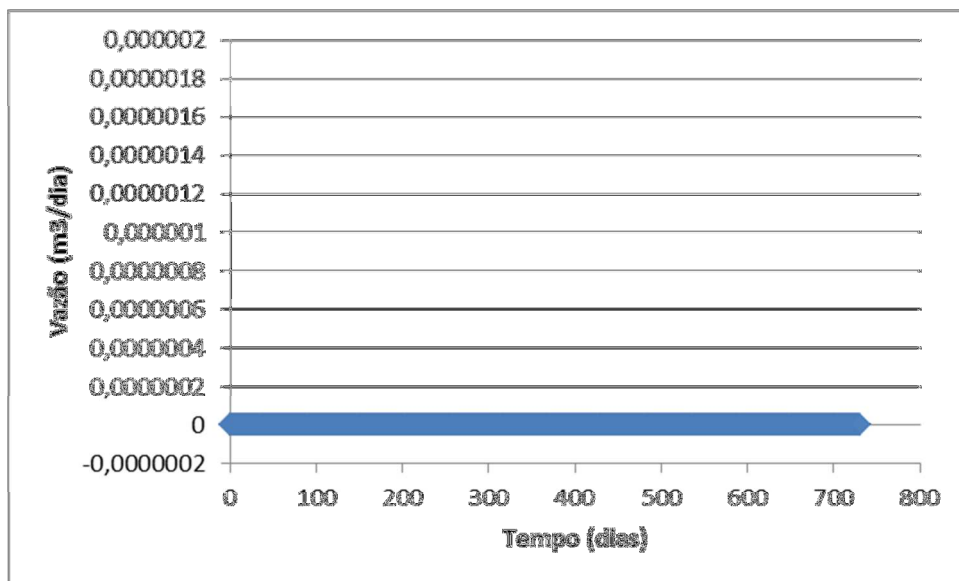


Figura 4.42: Relação Vazão na Base da Camada de Rejeito x Tempo - Modelo 2.



**Figura 4.43: Relação Vazão na Base da Camada de Rejeito x Tempo - Modelo 4.**

As vazões encontradas no fim do período considerado (730 dias - 2013 e 2014) são pequenas. O somatório das vazões do Modelo 2 resultou em  $3,03 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{dia}$  e Modelo 4 resultou em  $5,22 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{dia}$ . Proporcionalmente, os valores obtidos na Figura 4.42 são maiores que os obtidos na Figura 4.43 e isso se explica pela perda natural da água nas camadas considerando, também, a drenagem do próprio rejeito, como no Modelo 2, a camada de rejeito se encontra saturada ou perto da saturação, ela tem mais água para drenar do que a mesma camada de rejeito no Modelo 4, pois o nível d'água se encontra abaixo dela. Quanto menos água, mais difícil a sua retirada, por isso a vazão encontrada no Modelo 4 é muito menor, próxima de zero. Independente disso, como os dois sistemas estão drenando, estão ganhando mais estabilidade e conseqüentemente, o sistema vai melhorando a performance com o decorrer do tempo, conforme o esperado.

#### 4.5.3- Saturação nas camadas de barreira hidráulica nos Modelos 1, 2, 3 e 4

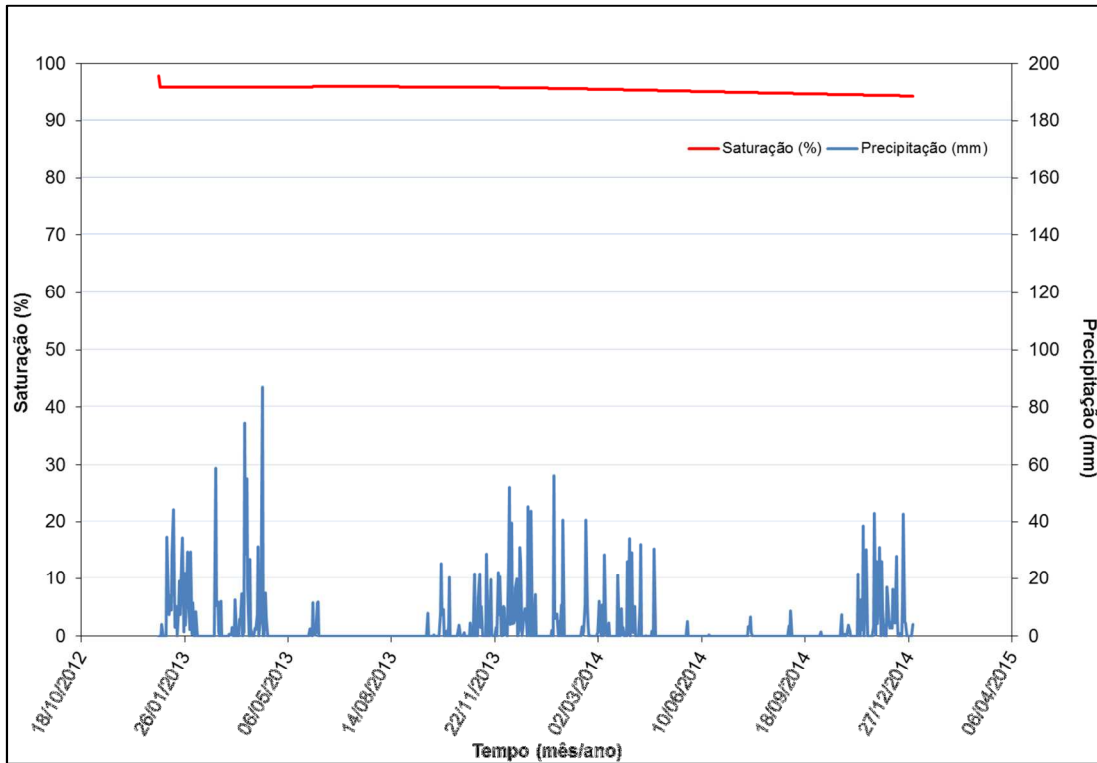


Figura 4.44: Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo 1.

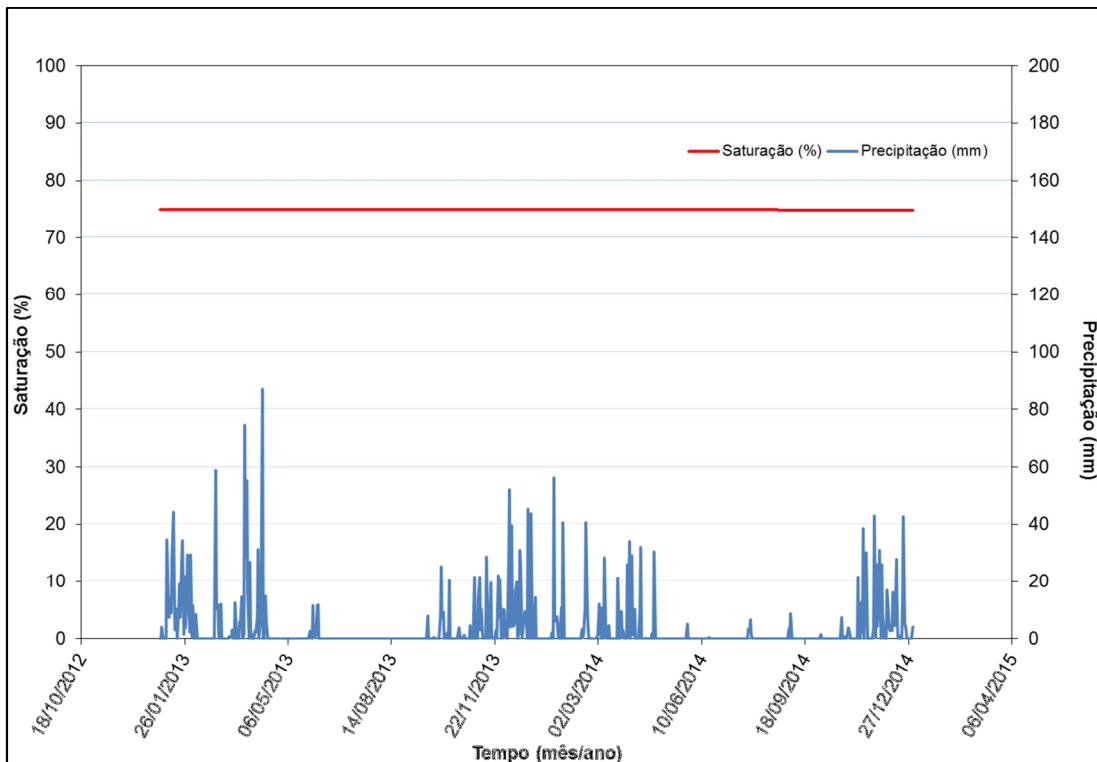


Figura 4.45: Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo 3.

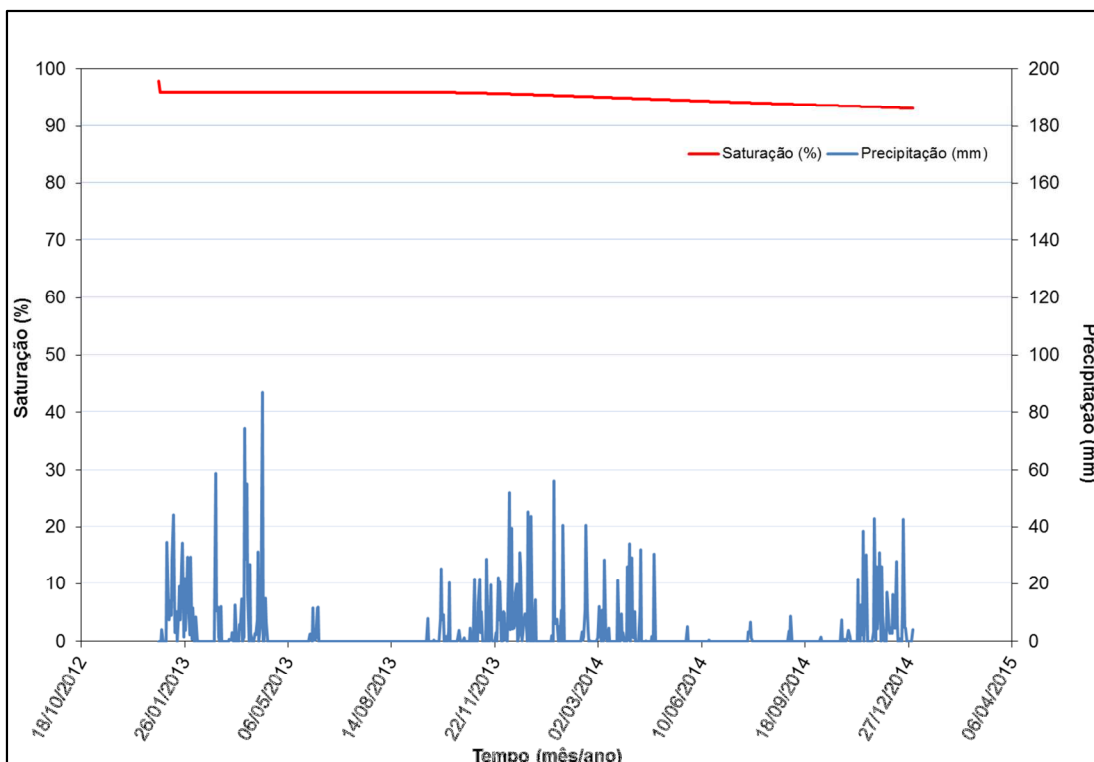


Figura 4.46: Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo 2.

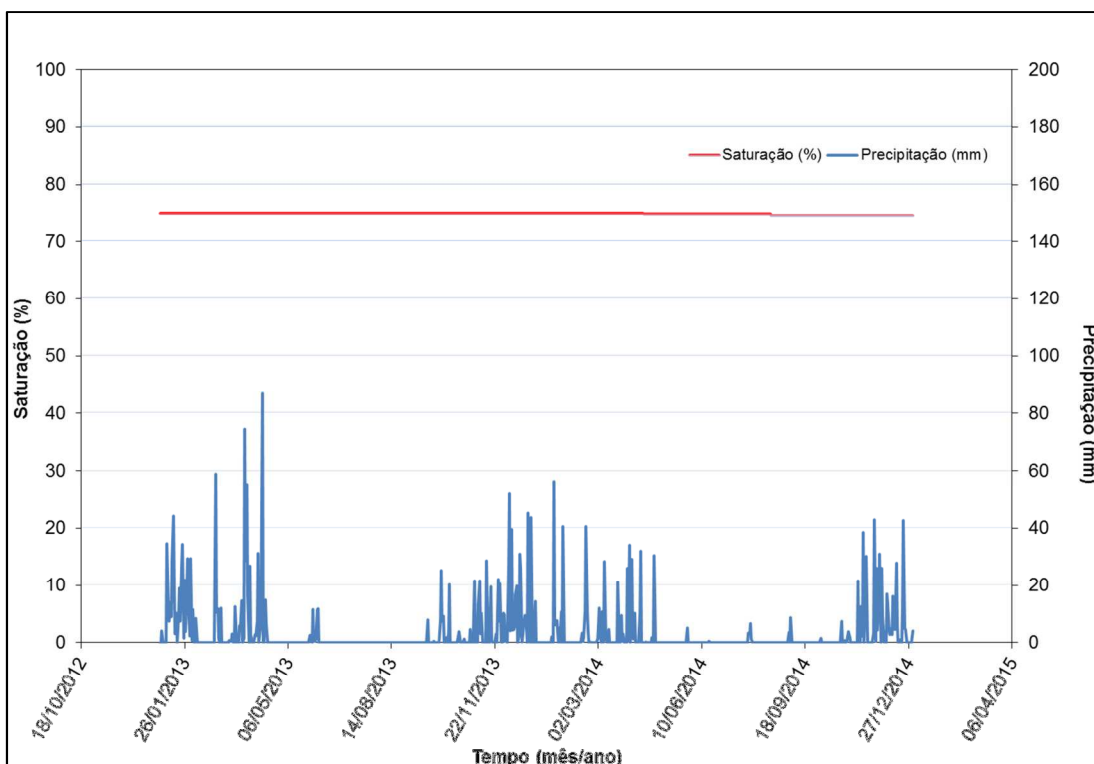


Figura 4.47: Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo 4.

Os Modelos 1 e 2 apresentam as camadas barreira hidráulica com saturação acima dos 90 % (Figuras 4.45 e 4.47), portanto são eficientes na função de impedir a passagem de oxigênio. O valor mínimo necessário para que isso ocorra é 80% de saturação. Já os Modelos

3 e 4 se mostraram ineficientes para impedir a passagem de oxigênio, pois apresentaram grau de saturação em torno de 75% (Figuras 4.46 e 4.48). 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;

## 5 - CONCLUSÕES

- Os modelos numéricos simulados no VADOSE/W com os dados geotécnicos levantados associados com as análises paramétricas de trabalhos anteriores foram bem sucedidos e retornaram respostas que podem ser utilizadas na construção de modelos em campo para validar as simulações.
- Os solos mais superficiais são mais sensíveis às condições climáticas de contorno.
- Os solos escolhidos apresentaram comportamento compatível com as funções que deveriam cumprir dentro de cada sistema (prescritivo e evaporativo), portanto, são solos bons para constituírem sistemas de cobertura.
- A alteração do nível d'água influenciou na saturação da camada barreira hidráulica. Os Modelos 3 e 4 foram considerados ineficientes na função de barrar a entrada de oxigênio (junto com a água, essencial para iniciar a formação de DAM) e por isso, foram descartados como modelos possíveis de implantação.
- Os Modelos 1 e 2 foram escolhidos como passíveis de implantação, apresentam características diferentes, o Modelo 1 é evapotranspirativo, o 2 prescritivo, mas ambos se mostraram eficientes como sistemas de cobertura. Se considerarmos somente o ponto de vista econômico, o Modelo 2 será o escolhido, pois necessita de menos material para ser construído, é constituído de um menor número de camadas e levará menos tempo para entrar em operação. Considerando o problema de engenharia, o Modelo 1 é mais interessante para ser implantado, pois apesar de custar mais, demorar mais tempo para entrar em operação, tem a vantagem de simular a estrutura natural do solo, o que confere mais durabilidade e menos manutenção a longo prazo.
- O nível d'água foi a condição de contorno modificada que permitiu a comparação entre os modelos.

## 6 - RECOMENDAÇÕES

Como sugestão para futuros trabalhos, recomenda-se a construção de estruturas Modelo em campo com as variações de espessura e quantidades de camadas que foram consideradas viáveis através da análise numérica. Com o intuito de promover a comparação dos dados obtidos em campo com os dados obtidos nas simulações e validar os Modelos.

E ainda, se possível, avaliar a taxa de percolação de acordo com pelo menos um dos cinco métodos listados por Benson et al. (2001): (1) o método do balanço de água, (2) a análise de tendência, (3) cálculos a partir da Lei de Darcy, (4) métodos de traçadores, e (5) lisímetros. A precisão com que a velocidade da percolação pode ser determinada com estes métodos varia significativamente. Dentre esses métodos, o que tem melhor resultado individualmente é o uso de lisímetros, mas a precisão depende do método utilizado para medir a água recolhida.

Outra sugestão é a de que as simulações possam ser feitas nos ramos seco e úmido da curva de compactação, que as curvas de retenção sejam feitas para cada ponto individualmente, pois, nesse estudo apresentado todos os materiais foram compactados na umidade ótima e isso limita as análises a um ponto. A utilização de mais pontos confere mais confiabilidade ao estudo.

Como se sabe, o efluente contaminado (resultante da DAM), tipicamente, contém altas concentrações de sulfato, ácido e traços de metais dissolvidos e resulta de complexas interações entre o transporte de oxigênio para os resíduos de minas e as reações químicas dentro dos rejeitos de minas que incluem oxidação, redução, especiação aquosa, dissolução mineral e precipitação.

O uso de coberturas para a remediação da drenagem ácida é comum, porém, como no estudo anteriormente apresentado, a preocupação maior é com o fluxo de água através das camadas e não com a interação química existente entre o solo e o fluido e os produtos dessa interação. Ou seja, o aspecto químico é muito importante e deve ser considerado na relação solo-fluido. Por isso, o que se sugere é um estudo integrado geoquímico/geotécnico/hidrogeológico para prever a eficácia desses sistemas de remediação.

Assim, o que se propõe é a utilização do VADOSE/W integrada com outros tipos de softwares capazes de executar cálculos geoquímicos e hidrogeológicos em simulações futuras, como por exemplo:

- PHREEQC: O programa baseia-se em equilíbrio químico de soluções aquosas que interagem com minerais, gases, soluções sólidas, e superfícies permutadoras de sorção, mas também inclui a capacidade de modelar reações cinéticas. Uma base de

dados químicos permite que a aplicação da reação de transporte e a capacidade de modelagem inversa para quase qualquer reação química ajuda a identificar quais reações são capazes de influenciar a qualidade das águas superficiais.

- TOUGHREACT: Modelagem de subsuperfície que acopla fluido multifásico, fluxo de calor, transporte de solutos e reações químicas e pode ser aplicada a diversos sistemas geológicos e problemas ambientais, incluindo o armazenamento geológico de carbono, eliminação nuclear dos resíduos geológicos, sistemas geotérmicos, processos diagenéticos e intemperismo, remediação de drenagem ácida de mina, transporte de contaminantes e qualidade das águas subterrâneas.
- Visual MODFLOW: Modelagem para aplicações práticas em fluxo tridimensional de águas subterrâneas e de transporte de contaminantes. Tem a capacidade de simular as interações entre as águas subterrâneas e de superfície, bem como a capacidade adicional para calcular alterações nas características químicas das águas subterrâneas.

Esses três softwares citados em conjunto com o VADOSE/ W podem retornar Modelos com menos falhas de projeto, pois ampliam a gama de aspectos analisados (geoquímicos, interações químicas, chegando até à possibilidade de se monitorar uma possível pluma de contaminação caso a cobertura não seja eficaz) para a produção de um projeto de cobertura final.

## 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.
- ALBRIGHT, WILLIAM H., BENSON, CRAIG H., APIWANTRAGOON, PREECHA (2013). Field Hydrology of Land fill Final Covers with Composite Barrier Layers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* © ASCE, pp. 1-12.
- ABREU, A.T., FARIA, E.M., GUIMARÃES, J.A.C., LEITE, A. L., LENA, J.C. de. (2012) Avaliação em laboratório do uso de sistemas de coberturas alcalinas para prevenção da drenagem ácida de mina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)*, v. 36, p. 787-802.
- AMORIM, N.R. (2008). Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM), Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 143 p.
- AMORIM, N. R., AZEVEDO, R. F. DE (2008). Experimento para Determinação do Desempenho de Sistemas de Cobertura no Campo. *COBRAMSEG*, 2008. 7 p.
- ASSIS, I. R. et al. (2012) Induction of a geochemical barrier for As, Fe and S immobilization in a sulfide substrate. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* [online]. Vol.36, n.2, pp. 671-679.
- ASSIS, I. R. et al. (2011) Cover layers to the growth of trees and shrubs over a sulfide spoil from gold mining. *Revista Árvore* [online]. Vol.35, n.4, pp. 941-947.
- ASSIS, I. R. (2006). Mitigação da lixiviação de arsênio, ferro e em área de ocorrência de drenagem ácida. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, 102 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459: (1984) Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6508: (1984) Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7180: (1984) Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7181: (1984) Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7182: (1986) Solo

- Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1 p.
- BARBOUR, S.L. (1990). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture retaining cover layers as oxygen barriers: discussion. *Canadian Geotechnical Journal* 27, 398–401.
- 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.
- BENSON, C., SAWANGSURIYA, A., TRZEBIATOWSKI, B., ALBRIGHT, W. Post construction changes in the hydraulic properties of water balance cover soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133 (4), p. 349-359, 2001.
- BICALHO, K.V.; CORREIA, A.G.; FERREIRA, S.; FLEUREAU, J.M. & MARINHO, F.A.M. (2007). The use of filter paper method for matric suction measurement of an unsaturated compacted silty sand. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., Salvador, 2007. Anais... Salvador, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, p.215-219.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Diário Oficial da União. Brasília, 5 de outubro de 1988.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 28 de maio de 2012.
- DUARTE, L. B. (2012). Avaliação numérica do dimensionamento de sistemas de cobertura para reservatórios de disposição de resíduos de mineração. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia e Transportes. Universidade Federal de Minas Gerais, 143 p.
- 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 (2002). “*Technical Guidance For RCRA/CERCLA Final Covers*”. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC.
- FREDLUND, D. G., XING A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, p. 521-532. 1994.
- FREDLUND, D., XING, A., HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil – water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 31, p. 533-546. 1994.

- GARD/INAP. *Global Acid Rock Drainage Guide*. The International Network for Acid Prevention. Disponível em: <http://www.gardguide.com>. Acesso em 8 de maio de 2015.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2002). *VADOSE/W User's Manual*, Version 1.01, Calgary, Alberta, Canada.
- GEO-ANALYSIS 2000 Ltd. (2000). Manual preparation for SoilCover version 2000.
- GUIMARÃES, L. M. (2013). Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrifuga de pequenas dimensões. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 133 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO-IBRAM (2012). Informações e análises da economia mineral brasileira 7ª Edição. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>. Acesso em 8 de maio de 2015.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA-INMET (2015). Dados climáticos de Paracatu. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em 8 de maio de 2015.
- 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). Acesso em 8 de maio de 2015.
- KINROSS GOLD CORPORATION. Disponível em [http://www.kinross.com.br/paracatu.php?id\\_category=3](http://www.kinross.com.br/paracatu.php?id_category=3). Acesso em 8 de maio de 2015.
- LOTT, C.P.M., BESSA, G. D., VILELA, O. (2004). CVRD - Reabilitação de áreas e fechamento de minas. Disponível em: <http://www.brasilmineral.com.br/BM/pdf/228/228%20-%20CVRD.pdf>. Acesso em 8 de maio de 2015.
- MARINHO, F.A.M. & OLIVEIRA, O.M. (2006). The filter paper method revisited. *Geotech. Test. J.*, 29:1-9.
- MBONIMPA, M., AUBERTIN, M., AACHIB, M., BUSSIÈRE, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal* 40, 916–932.
- MORAES, N. C. (2010). Abatimento da drenagem ácida de mina com cobertura de entulho de construção civil: uma proposta de reabilitação de uma antiga mina de pirita. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral.
- MORRIS AND STORMONT (1997). *Capillarity Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency*, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, N. 1, p. 3-10.
- MCMULLEN, J., FIRLOTTE, R., KNAPP, R., AUBERTIN, M. (1997). Les Terrains Aurifères property site closure and rehabilitation-conceptual to construction, *Proceedings of the 29th Annual Meeting of Canadian Mineral Processors*, Ottawa, pp. 274–292.

- NICHOLSON, R.V., AKINDUNNI, F.F., SYDOR, R.C., GILLHAM, R.V. (1991). Saturated tailings covers above the water table: the physics and criteria for design. The Proceedings of the Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Montreal.
- OLIVEIRA FILHO, W. L. (2009). Notas de aula, Planejamento Ambiental em Mineração.
- 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.
- RIBEIRO, A.G.C. et al. (2010). Análise numérica de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM). COBRAMSEG, 2010.
- RIBEIRO, A.G.C. et al. (2011). Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 182 p.
- SÁNCHEZ, L.E. 2001. Desengenharia: o passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais. São Paulo: Edusp, 254 p.
- SILVA, JÚLIO CESAR DA (2004). Modelagem e simulação numérica do fluxo bifásico e do transporte multicomponente em meios porosos com interação. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, PUC - Rio, 102 p.
- SILVA, S. R., PROCOPIO, S. O., QUEIROZ, T. F. N. e DIAS, L. E.(2004). Caracterização de rejeito de mineração de ouro para avaliação de solubilização de metais pesados e arsênio e revegetação local. Rev. Bras. Ciênc. Solo. Vol.28, n.1, pp. 189-196. ISSN 0100-0683. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832004000100018](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000100018). Acesso em 8 de maio de 2015.
- 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. 20 p.
- SWANSON, D.A., BARBOUR, S.L., WILSON, G.W., O’KANE, M. (2003). Soil-atmosphere modeling of an engineered soil cover for acid generating mine waste in a humid, alpine climate. Canadian Geotechnical Journal 40, 276–292.
- TORNTHWAITE, C. W., (1948). “*An Approach toward a Rational Classification of Climate*”, Geographic Review, Vol. 38, pp. 89-99.
- TOUGHREACT User’s Guide: A Simulation Program for Non-isothermal Multiphase Reactive Transport in Variably Saturated Geologic Media, Version 2.0.
- VANAPALLI, S. K., FREDLUND, D. G., PUF AHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. Geotechnique, Vol. 49, p. 143-159, 1999

- VIEIRA, A. M. (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.
- VISUAL MODFLOW (2011). User's Manual. © Schlumberger Water Services.
- YANFUL, E.K. (1993). Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering* 119 (8), 1207–1228.
- YANFUL, E.K., AUBE, B.C. (1993). Modelling moisture-retaining soil covers. *Proceedings 1993 Joint CSCE–ASCE National Conference on Environmental Engineering*, Montreal, Quebec, Canada, pp. 273–280.
- YANFUL, E.K., MOUSAVI, S.M., SOUZA LIN-PEI DE. (2006). A numerical study of soil cover performance. *Journal of Environmental Management* 81. p 72-92.

