



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente

Táisa Ferreira Lopes dos Santos

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA CAMADA DE COBERTURA DO ATERRO
MORRO DO CÉU, NITERÓI - RJ**

Rio de Janeiro
2009

Táisa Ferreira Lopes dos Santos

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA CAMADA DE COBERTURA DO ATERRO
MORRO DO CÉU, NITERÓI - RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Área de concentração: Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Elisabeth Ritter

Rio de Janeiro
2009

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC



Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Táisa Ferreira Lopes dos Santos

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA CAMADA DE COBERTURA DO ATERRO
MORRO DO CÉU, NITERÓI – RJ.**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Área de concentração: Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.

Aprovado em: _____

Banca Examinadora:

Prof^a. Elisabeth Ritter, D.Sc. – Presidente
PEAMB/UERJ

Prof. Fernando Antônio Medeiros Marinho, Ph.D.
USP

Prof. Maria Cristina Moreira Alves, D.Sc.
UFRJ

Prof. Rogério Luiz Feijó, D.Sc.
UERJ

DEDICATÓRIA

Para a minha família toda, pelo contínuo incentivo e apoio nos momentos mais difíceis da minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

À minha família, avó, avô, namorado e meus amigos pelo incentivo e apoio.

À minha orientadora, Professora Elisabeth Ritter, pela compreensão, ajuda com os seus conhecimentos e sugestões para o trabalho.

Ao professor Rogério Feijó, ao Adelino e à equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ, pelos ensinamentos e pela ajuda contínua.

Ao professor Fernando Marinho pela contribuição nesta dissertação e elucidação das dúvidas e a equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos da USP.

Aos meus professores que contribuíram para a minha formação.

Ao meu amado pai que me acompanhou na coleta das amostras e pela paciência ao me esperar toda segunda-feira no Laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ e a minha afilhada pela colaboração.

Aos meus pais e namorado pela tolerância nos meus momentos de apreensão, nervosismo e tensão.

Ao Marcus, pela ajuda com o Vadose/W.

Aos funcionários da Clin e a Bentonit União Nordeste S.A.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

SANTOS, Taísa Ferreira Lopes dos Santos. Estudo Experimental da Camada de Cobertura do Aterro Morro do Céu, Niterói - RJ. Brasil, 2009. 145 f.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de solos não saturados e descreve os diversos tipos de camada de cobertura usadas em aterro de resíduos sólidos urbanos. Apresenta trabalhos científicos que contemplam curvas características de solos tropicais brasileiros. Caracteriza o solo usado antigamente como camada de cobertura do Aterro Morro do Céu e este solo com adição de 5% de bentonita. Determina a curva característica desses dois solos pelo Método do Papel Filtro e pela Placa de Sucção e, em seguida, Placa de Pressão. As curvas obtidas por esses métodos apresentaram diferenças. A adição da bentonita no solo teve como objetivo avaliar o desempenho do mesmo. O solo com adição de bentonita apresentou maior plasticidade, menor permeabilidade e maior capacidade de retenção de água no solo. Apresenta a modelagem de camadas monolíticas, camadas monolíticas evapotranspirativas, barreiras capilares, barreiras capilares evapotranspirativas através do uso do Programa VADOSE/W como ferramenta para aferição.

Palavras-chave: Aterro Sanitário, Solos Não Saturados, Camada de Cobertura, Curva Característica, Aterro Morro do Céu, Vadose/W.

ABSTRACT

This study is a review about unsaturated soils concepts and describes some types of soil cover systems used in landfills. It presents scientific works about Brazilian tropical soil's Water Retention Curve. It characterizes the soil that was used as a cover layer system used at Morro do Céu landfill and the same soil with addition of 5% of bentonite. It determinates the soil water retention curve by Filter Paper Method and Suction Plate and, after that, Pressure Plate. The curves obtained by these two methods showed differences. The objective of the addition of the bentonite in the soil is to evaluate its performance. The soil with the addition of bentonite shows higher plasticity, lower hydraulic conductivity and higher moisture storage. It presents the modeling of monolithic covers, evapotranspirative monolithic covers, capillary barriers and evapotranspirative capillary barriers by the use of VADOSE/W Program as a tool for gauging.

Key words: Landfill, Unsaturated Soils, Landfill Cover System, Soil Water Retention Curve, Morro do Céu Landfill, Vadose/W.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos | 3 |
| 1.2 Abordagem Metodológica e Estrutura do Trabalho | 3 |
| 2 SOLOS NÃO-SATURADOS..... | 5 |
| 2.1 Fases Constituintes do Solo | 5 |
| 2.2 Fundamentos da Capilaridade e Água no Solo | 7 |
| 2.3 Potencial Total da Água no Solo | 8 |
| 2.3.1 Potencial Osmótico ou de Solute (P_o) | 9 |
| 2.3.2 Potencial Matricial (P_m) | 10 |
| 2.3.3 Potencial Gravitacional (P_g) | 10 |
| 2.3.4 Potencial de Pressão (P_p) | 11 |
| 2.4 Conceito de Sucção do Solo | 11 |
| 2.4.1 Métodos de Medição da Sucção do Solo | 13 |
| 2.4.1.1 <i>Tensiômetro</i> | 13 |
| 2.4.1.2 <i>Psicrômetro</i> | 15 |
| 2.4.1.3 <i>Placa de Sucção</i> | 15 |
| 2.4.1.4 <i>Câmara ou Placa de Pressão ou Aparelho Extrator de Richards</i> | 16 |
| 2.4.1.5 <i>Método do Papel Filtro</i> | 17 |
| 2.5 Características Hidráulicas de solos | 19 |
| 2.5.1 Curva Característica | 19 |
| 2.5.1.1 <i>Histerese</i> | 22 |
| 2.5.1.2 <i>Fatores que Interferem na Curva Característica</i> | 23 |
| 2.5.2 Condutividade Hidráulica | 30 |
| 2.5.2.1 Condutividade Hidráulica Saturada | 31 |
| 2.5.2.2 Condutividade Hidráulica Não-Saturada | 32 |
| 2.5.2.3 <i>Fatores que influenciam a condutividade hidráulica</i> | 32 |
| 3. CAMADAS DE COBERTURA | 35 |
| 3.1 Componentes do Sistema de Cobertura Final | 35 |
| 3.1.1 Camada Superficial | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.2 Camada de Proteção | 36 |
| 3.1.3 Camada de Drenagem | 37 |
| 3.1.4 Barreira Hidráulica ou de Gás | 37 |
| 3.1.5 Camada de Coleta de Gás | 38 |
| 3.1.6 Camada de Base ou Fundação | 38 |
| 3.2 Tipos de Sistema de Camada de Cobertura | 38 |
| 3.2.1 Cobertura Convencional, Monolítica ou Resistiva | 38 |
| 3.2.2 Barreira Capilar Simples | 39 |
| 3.2.3 Barreira Capilar Dupla | 40 |
| 3.2.4 Coberturas Evapotranspirativas | 41 |
| 3.3 Legislação e Normas sobre Camada de Cobertura | 44 |
| 3.3.1 Norma Brasileira | 44 |
| 3.3.2 Norma Americana..... | 45 |
| 3.4 Balanço Hídrico | 48 |
| | |
| 4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS SOLOS BRASILEIROS | 49 |
| 4.1 Estudo de Caso da CTR Nova Iguaçu, RJ (HUSE, 2007) | 49 |
| 4.1. Ensaio de Caracterização do Solo, Limites de Atterberg, Densidade Real dos Grãos, Compactação, Permeabilidade Saturada e Curva Característica | 50 |
| 4.2 Estudo de Caso de Rio das Ostras e Niterói (BARROSO, 2008) | 53 |
| 4.2.1 Caracterização dos Solos, Limites de Atterberg, Ensaio de Compactação, Permeabilidade e Curva Característica | 53 |
| 4.3 Estudo de Caso do Aterro Sanitário Experimental na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da BR 040 em Belo Horizonte, MG (SIMOES ET AL, 2008) | 58 |
| 4.3.1 Resultados de Massa Específica dos Grãos, Limites de Consistência, Granulometria dos Solos, Compactação, Permeabilidade e Curva Característica Solo | 59 |
| 4.4 Considerações sobre trabalhos que envolvem estudos com processos erosivos e taludes | 61 |
| | |
| 5 ESTUDO EXPERIMENTAL DA CAMADA DE COBERTURA DO ATERRO MORRO DO CÉU | 63 |
| 5.1 Amostragem | 64 |
| 5.2 Metodologia | 64 |
| 5.2.1 Caracterização do Solo | 64 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.2 Compactação | 64 |
| 5.2.3 Permeabilidade | 65 |
| 5.2.4 Curva Característica | 65 |
| 5.2.4.1 Método do Papel Filtro..... | 65 |
| 5.2.4.2 Placa de Sucção e de Pressão..... | 70 |
| 5.3 Resultados dos Ensaios | 71 |
| 5.3.1 Curva Granulométrica | 71 |
| 5.3.1.1 Resultados da Amostra 01 – Solo da jazida antiga | 71 |
| 5.3.1.2 Resultados da Amostra 02 – Solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita..... | 72 |
| 5.3.1.3 Comparação dos Resultados..... | 73 |
| 5.3.2 Limites de Atterberg - Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP)..... | 74 |
| 5.3.3 Densidade Real dos Grãos | 74 |
| 5.3.4 Compactação..... | 75 |
| 5.3.4.1. Resultados da Amostra 02 – Solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita..... | 75 |
| 5.3.4.2 Comparação dos Resultados..... | 76 |
| 5.3.5 Permeabilidade Saturada | 77 |
| 5.3.6 Curva Característica | 77 |
| 5.3.6.1 Método do Papel Filtro | 77 |
| 5.3.6.1.1 Resultados da Amostra 01 – Solo da jazida antiga | 77 |
| 5.3.6.1.2 Resultados da Amostra 02 – Solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita...79 | |
| 5.3.6.1.3 Comparação dos resultados das curvas características da amostra 01 e amostra 02 | 81 |
| 5.3.6.1.4 Variação do Grau de Saturação com a Umidade Gravimétrica da Amostra 01 e 02 . | 83 |
| 5.3.6.1.5 Variação da Sucção com o Grau de Saturação da Amostra 01 e 02 | 84 |
| 5.3.6.1.6 Comparação com os Resultados obtidos por Barroso (2008) | 86 |
| 5.3.6.2 Placa de Sucção e Placa de Pressão | 86 |
| 5.3.6.2.1 Resultados da Amostra 02 – Solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita..... | 87 |
| 5.3.6.2.2 Variação do Grau de Saturação com a Umidade Volumétrica da Amostra 02..... | 87 |
| 5.3.6.2.3 Variação da Sucção com o Grau de Saturação da Amostra 02..... | 89 |
| 5.3.6.3 Comparação entre os Resultados obtidos pelo Método do Papel Filtro e Placa de Sucção e Placa de Pressão..... | 90 |

| | |
|---|-----|
| 5.4 Modelagem Numérica Através do Uso do VADOSE/W | 93 |
| 5.4.1 Breve Resumo do VADOSE/W | 93 |
| 5.4.2 Resultados Obtidos com o Uso do VADOSE/W | 94 |
| 5.4.2.1 <i>Camada de cobertura monolítica com o solo da amostra 01 (solo da jazida antiga)</i> | 96 |
| 5.4.2.2 <i>Camada de cobertura monolítica evapotranspirativa com o solo da amostra 01 (solo da jazida antiga)</i> | 98 |
| 5.4.2.3 <i>Camada de cobertura monolítica com o solo da amostra 02 (solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita)</i> | 99 |
| 5.4.2.4 <i>Camada de cobertura monolítica evapotranspirativa com o solo da amostra 02 (solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita)</i> | 101 |
| 5.2.4.5 <i>Barreira capilar com o solo da amostra 01 sobreposto a um solo arenoso</i> | 102 |
| 5.2.4.6 <i>Barreira capilar evapotranspirativa com o solo da amostra 01 sobreposto a um solo arenoso</i> | 104 |
| 5.2.4.7 <i>Barreira capilar com o solo da amostra 02 sobreposto a um solo arenoso</i> | 105 |
| 5.4.2.8 <i>Barreira capilar evapotranspirativa com o solo da amostra 02 sobreposto a um solo arenoso</i> | 107 |
| 5.4.2.9 <i>Considerações Finais</i> | 108 |
| | |
| 6 CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES | 111 |
| 6.1 Conclusões | 111 |
| 6.2 Recomendações | 112 |
| | |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 114 |
| | |
| ANEXOS | |

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo no mundo globalizado, o desenvolvimento contínuo de novos produtos e o acelerado crescimento populacional vem provocando um aumento da geração per capita de resíduos sólidos e, conseqüentemente, um maior volume de lixo a ser gerenciado e destinado de forma correta.

O serviço que apresenta maior deficiência dentro do sistema de limpeza urbana é a disposição final de resíduos sólidos urbanos, o componente da limpeza pública em pior situação atualmente no Brasil, onde a presença de aterros sanitários é bastante pequena, predominando formas incorretas de destinação final.

Uma pesquisa do Sistema Nacional de Saneamento Básico (SNIS, 2005) realizada pelo Ministério das Cidades em que avaliou somente 192 municípios que responderam a pesquisa, apresenta o seguinte cenário em relação à disposição de resíduos sólidos:

- 64% dos municípios continuam depositando em lixões;
- Aproximadamente 32% depositam em aterros adequados (sanitários ou controlados);
- Cerca de 5% dos municípios não declararam onde depositam os seus resíduos.

No estado do Rio de Janeiro, somente uma quantidade pequena do lixo é encaminhada para aterro sanitário e grande parte é ainda depositada em lixão, que é um local onde os resíduos sólidos são dispostos de forma inadequada, caracterizado pela simples descarga sobre o solo a céu aberto sem nenhum cuidado com medidas controladoras dos possíveis impactos ambientais decorrentes desta prática, como impermeabilização adequada, sistema de drenagem de chorume, de gás e de águas pluviais, cobertura diária, entre outros, e sem medidas de proteção à saúde pública.

A disposição adequada de resíduos sólidos urbanos ou industriais, como o uso de aterros, continua sendo um dos grandes desafios dentro do saneamento básico.

Tecnologias mais recentes de gestão de resíduos que enfatizam, sobretudo, a redução de geração na origem, a reciclagem dos resíduos e o desenvolvimento de alternativas de tratamento, como a compostagem e a incineração, não descartam a utilização de aterros sanitários, seja para o material que não será compostado ou para as cinzas provenientes da incineração, além dos resíduos que não são passíveis de tratamentos. Assim sendo, o aterro sanitário permanece como a base principal do sistema de limpeza urbana.

O processo de degradação de resíduos sólidos no aterro sanitário gera gases, que são compostos por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e componentes-traço, entre eles o ácido sulfídrico (H₂S) e outros derivados do enxofre (mercaptans), têm características tóxicas e odores desagradáveis. Além dos gases, este processo gera também o chorume, um percolato de coloração cinza escuro com forte odor fétido e potencialmente poluidor, além do recalque proveniente da redução de volume da massa de resíduos.

Levando em consideração o elevado potencial poluidor dos gases e do chorume gerado no processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos (RSU), torna-se claro a necessidade urgente do encerramento dos lixões e da implantação de uma quantidade significativa de novos aterros sanitários com um sistema eficiente de drenagem de gases e de chorume, um monitoramento contínuo e um sistema de camada de cobertura final bem executado e projetado, a fim de prevenir possíveis migrações de gases pelas fronteiras das células do aterro e de chorume pela base e lateral do mesmo. O controle da migração do percolato é fundamental para minimizar seus impactos no meio ambiente e o volume deste pode ser reduzido com um sistema eficiente de cobertura final e de drenagem após o encerramento do aterro.

Após o término do período de vida útil de um aterro sanitário, isto é, após o encerramento das atividades de recebimento e aterramento dos resíduos, os aterros deverão receber uma camada de cobertura final que irá interagir diretamente com a atmosfera, como exemplo a camada evapotranspirativa, que para seu projeto necessita da quantificação dos processos atmosféricos na superfície do solo e do fluxo de água através de solos não-saturados (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2006).

Neste contexto, se insere a importância do projeto, da construção e do monitoramento bem executados das camadas de cobertura final das células encerradas de aterros sanitários, cuja principal função é de controlar a percolação para a base do aterro através da minimização da infiltração de águas pluviais e a conseqüente geração de chorume, acomodar os recalques diferenciais provenientes do processo de degradação da matéria orgânica presente na massa de resíduos e minimizar a migração de gases para a atmosfera, ou seja, seu principal objetivo é minimizar os impactos ambientais provenientes da disposição dos RSU.

Desta forma, o presente trabalho contribui para a avaliação da eficácia da camada de cobertura usada no aterro Morro do Céu. A avaliação da eficiência será dada através de experimentos de laboratório e do uso do programa computacional VADOSE/W.

1.1 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho foram:

- 1) Revisão dos conceitos de solos não-saturados, potencial da água no solo, sucção, curva característica e métodos laboratoriais e de campo para determinação da curva característica para o entendimento do comportamento da camada de cobertura de aterro. Foi feita uma abordagem sobre os diversos tipos de camadas de cobertura final;
- 2) Apresentação de alguns estudos que determinaram as curvas características dos solos brasileiros;
- 3) Estudo experimental através de ensaios de laboratório com os seguintes solos:
 - Solo usado anteriormente como camada de cobertura, chamado de jazida antiga, mesmo solo estudado por Barroso (2008); e
 - Solo usado anteriormente como camada de cobertura com adição de 5% de bentonita.
- 4) Modelagem computacional de camadas monolíticas, camadas monolíticas evapotranspirativas, barreiras capilares, barreiras capilares evapotranspirativas com o solo da jazida antiga e o mesmo solo com adição de bentonita para camadas de cobertura com o uso do Programa VADOSE/W.

1.2 Abordagem Metodológica e Estrutura do Trabalho

O presente estudo baseou-se em (i) revisão bibliográfica, incluindo trabalhos técnicos e científicos; (ii) realização de ensaios de laboratório; (iii) utilização de programa computacional chamado VADOSE/W.

Além do capítulo 1 que introduz o tema, capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre solos não-saturados e suas principais propriedades relacionadas à camada de cobertura e o capítulo 3 apresenta os tipos de cobertura de cobertura final de aterros sanitários.

No capítulo 4, são apresentados alguns trabalhos técnicos e científicos que determinaram as curvas características de alguns solos brasileiros.

Os resultados dos ensaios laboratoriais são apresentados no capítulo 5, assim como os resultados obtidos através do uso do Programa VADOSE/W.

As conclusões e recomendações deste trabalho são apresentadas no capítulo 6.

2 SOLOS NÃO-SATURADOS

Solos argilosos compactados são muito utilizados em liners de camada de cobertura e impermeabilização lateral e de fundo de aterros sanitários, devido a sua baixa condutividade hidráulica. A escolha desses solos é baseada no seu comportamento saturado, particularmente na condutividade hidráulica saturada. Nos projetos, na operação e na manutenção de aterros é considerado que a argila está saturada durante toda a vida útil do aterro, o que não ocorre na realidade, pois os liners usados em camadas de cobertura estão na condição não-saturada. Sendo assim, as propriedades e o comportamento dos solos não-saturados devem ser entendidos e quantificados para avaliar a performance deste solo como camada de cobertura.

A condição de não saturação enseja diferentes abordagens também dos problemas geotécnicos em solos tropicais, como a capacidade de carga de fundações, os empuxos de terra e, principalmente, a estabilidade de taludes.

Neste capítulo, serão apresentadas algumas características de solos não-saturados que são importantes e devem ser consideradas na elaboração de projetos de camada de cobertura final de aterros sanitários e para acompanhamento da sua performance.

2.1 Fases Constituintes do Solo

O solo é um material constituído por um conjunto de partículas sólidas com vazios entre si, que podem estar preenchidos totalmente ou parcialmente com água, caracterizando solo saturado ou solo não-saturado, respectivamente, e com ar.

O solo não-saturado é compreendido por um sistema trifásico constituído por uma fase sólida (partículas minerais), por uma fase líquida (em geral, água) e por outra fase gasosa (ar), conforme figura 2.1 a). Fredlund e Morgenstern propuseram, em 1977, a introdução de uma quarta fase independente, referente a interface ar-água, denominada membrana contráctil, de acordo com a figura 2.1 b). Esta membrana, em termos de relação massa-volume, pode ser considerada como parte da fase líquida (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

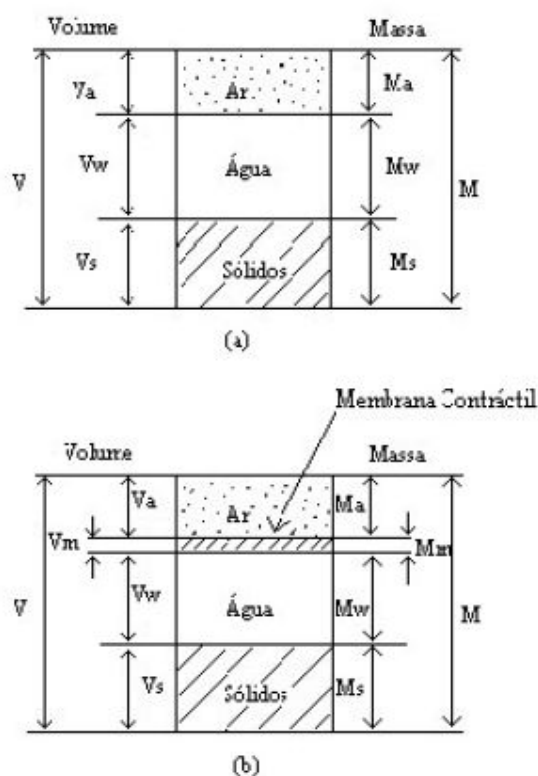


Figura 2.1: Fases do solo não-saturado, (a) diagrama simplificado de três fases; (b) diagrama completo de quatro fases (fonte: FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A membrana contráctil é composta por uma película com propriedades diferentes das propriedades da água e do ar. O volume da membrana contráctil é desprezado e seu peso é incorporado ao peso da água, pois as relações massa-volume consideram o solo como um sistema trifásico (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). A membrana contráctil possui uma propriedade chamada de tensão superficial, que tem a capacidade de exercer uma tensão de tração que é consequência da atuação das forças intermoleculares dentro dessa membrana. A tensão superficial faz com que a membrana contráctil se comporte como uma membrana elástica. Em virtude desta tensão, a superfície de contato entre a água e o solo nos vazios pequenos das partículas apresenta uma curvatura, indicando que a pressão nos dois fluidos não é a mesma, esta diferença de pressão é denominada de tensão de sucção.

Pode-se considerar o solo não-saturado, objeto de estudo deste trabalho, como uma mistura de duas fases que se equilibram sob a aplicação de gradientes de tensão (partículas sólidas e membrana contráctil) e duas que fluem (ar e água).

2.2 Fundamentos da Capilaridade e Água no Solo

Na molécula de água, os átomos de hidrogênio e oxigênio são ligados por pontes de hidrogênio ao oxigênio de forma assimétrica. Desta forma, a molécula da água exibe polaridade, conforme figura 2.2.

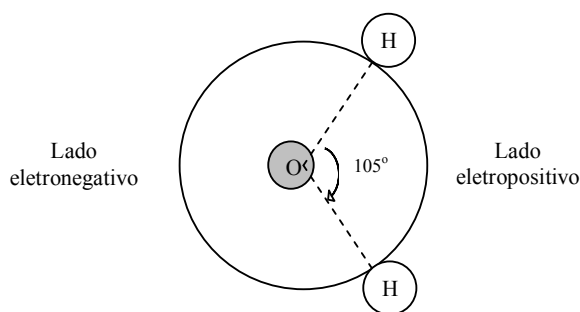


Figura 2.2: Representação bidimensional de uma molécula de água

As pontes de hidrogênio, ligações relativamente de baixa energia, determinam duas forças básicas responsáveis pela retenção e movimento da água no solo: a atração entre moléculas de água (coesão) e atração das moléculas de água pelas superfícies sólidas (adesão). Pela adesão, também chamada adsorção, algumas moléculas de água são firmemente retidas nas superfícies das partículas sólidas do solo e por coesão retêm outras moléculas de água mais distantes das superfícies sólidas. Juntas, as forças de adesão e coesão tornam possível que as partículas sólidas do solo retenham água.

Quando a água é colocada num tubo capilar, pode-se notar o movimento ascendente da água no tubo. Este fenômeno é conhecido como capilaridade, que é maior em solos com textura fina do que em solos grossos. Duas forças são responsáveis pela capilaridade: atração da água por superfícies sólidas (adesão ou adsorção) e tensão superficial da água, que é em grande parte devida à atração entre as moléculas de água (coesão).

A altura de ascensão do líquido em um tubo capilar é inversamente proporcional ao raio (r) do tubo e a densidade do líquido ρ , diretamente proporcional à tensão superficial do líquido σ e ao grau de atração adesiva à superfície sólida.

2.3 Potencial Total da Água no Solo

O estado de energia da água de um solo pode ser expresso como a soma da energia potencial e da energia cinética. Como a velocidade da água no solo é reduzida, a fração correspondente a energia cinética pode ser considerada nula e a energia potencial caracteriza o estado de energia da água no solo.

O nível de energia da água no solo é afetado por três importantes forças: pela adesão ou atração da água pelos sólidos do solo, que promovem uma força matricial (responsável pela adsorção e capilaridade); pela atração da água aos íons e outros solutos, resultando em forças osmóticas, que tendem a reduzir o estado de energia da água na solução do solo; e pela força da gravidade.

A diferença entre os níveis de energia de um local ou condição para outro determina a direção e a taxa de movimento da água no solo. A água se movimentará do solo com maior estado de energia para o solo com menor estado de energia.

O gradiente que provoca fluxo pode ser expresso em termos de energia disponível na água no interior do solo, em relação à água livre. Esta energia pode ser expressa em termos de potencial equivalente, sendo denominada potencial total.

O potencial de água no solo é o trabalho realizado quando a unidade de massa (volume ou peso) de água em estado padrão é levada isotérmica, isobárica e reversivelmente para o estado considerado no solo. Como pode ser observado na figura 2.3, o potencial total da água do solo representa o trabalho útil que deve ser realizado em uma quantidade infinitesimal de água pura, para conduzi-la de um reservatório situado a uma altura conhecida (Ponto A) até a água no solo, na cota de interesse (Ponto B).

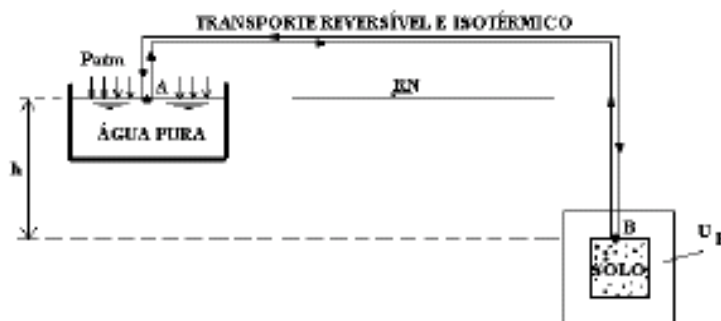


Figura 2.3: Esquema ilustrativo da definição de potencial total da água no solo (fonte: BARROSO, 2008)

O potencial total é devido a diversas forças e pode ser dividido em parcelas menores, conforme equação 2.1 (AITCHISON ET AL., 1965 em RIDLEY e BURLAND, 1993). Outros componentes podem ser incluídos, como o potencial de consolidação e o potencial térmico, porém, serão descartados por terem menor importância no comportamento geotécnico de solos não-saturados.

$$P_t = P_o + P_m + P_g + P_p \quad (\text{eq. 2.1})$$

Onde:

P_t : potencial total;

P_o : potencial osmótico ou de soluto, corresponde a pressão osmótica da água do solo;

P_m : potencial matricial, resultante de forças capilares e de adsorção;

P_g : potencial gravitacional, que corresponde a elevação do ponto considerado em relação ao nível de referência;

P_p : potencial de pressão, que corresponde a pressão na água.

2.3.1 Potencial Osmótico ou de Solute (P_o)

O potencial osmótico é atribuído à presença de solutos na solução de solo, ou seja, ele surge em função da diferença de composição entre a água do solo (presença de sais minerais e substâncias orgânicas) e a água pura. A presença desses solutos, que podem ser sais inorgânicos ou componentes orgânicos, reduz a energia potencial da água, principalmente por reduzirem a liberdade de movimento das moléculas da água que se agrupam em torno de cada íon soluto ou molécula. Essa redução na energia potencial é chamada de potencial osmótico.

A diferença de composição somente causará o movimento da água pura quando o sistema estiver “separado” por uma membrana semipermeável, que permite passagem de solvente (no caso a água pura), não deixando passar o soluto. Como, de fato, no solo não existem membranas semipermeáveis, qualquer diferença de potencial osmótico que se estabeleça provoca um movimento de solutos (que se redistribuem) e um movimento desprezível da água.

2.3.2 Potencial Matricial (P_m)

O potencial matricial é um potencial de pressão e é resultante do efeito de capilaridade e da adsorção que surge da interação entre as partículas sólidas e a água que compõem o solo (figura 2.4). À medida que o solo vai se tornando não saturado, o efeito da capilaridade começa a atuar e o potencial matricial torna-se negativo.

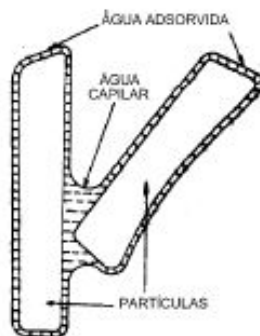


Figura 2.4: Água de um solo não saturado sujeita a um potencial matricial (fonte: HILLEL, 1971).

Para altos valores de umidade, a capilaridade é o principal fenômeno que determina o potencial matricial. Nestas condições, o arranjo poroso determinado pela estrutura, textura e composição das partículas, é de enorme importância. Para baixos valores de umidade, o fenômeno de capilaridade deixa de ter importância e a adsorção passa a governar os valores de potencial matricial (REICHARDT, 1987).

2.3.3 Potencial Gravitacional (P_g)

O potencial gravitacional traduz a componente de posição, isto é, quando considerado apenas o campo gravitacional, a água tem uma energia potencial gravitacional que depende da posição na qual ela se encontra em relação a um dado plano referencial, que é o estado padrão para a gravidade e o plano mais comumente escolhido é a superfície do solo (REICHARDT, 1987). O potencial gravitacional tem valor zero no plano de referência, é positivo acima dele e negativo abaixo dele.

2.3.4 Potencial de Pressão (P_p)

A pressão hidrostática é responsável pelo que é chamado de potencial de pressão (P_p), um componente que só é considerado em áreas saturadas.

O potencial de pressão é medido em relação à condição padrão, como sendo a água submetida à pressão atmosférica local e, nestas condições, admite-se que o potencial de pressão seja igual a zero. O potencial de pressão considera somente pressões manométricas positivas (acima da pressão atmosférica), portanto, este componente só existirá se existir água livre exercendo carga hidráulica sobre solo saturado (REICHARDT, 1987). Quando o solo estiver na condição não saturada, o potencial matricial passará a atuar no lugar do potencial de pressão.

2.4 Conceito de Sucção do Solo

A sucção do solo pode ser definida como a quantidade de energia que representa a capacidade do solo de reter água, isto é a energia aplicada por unidade de volume de água. Para liberar a água adsorvida, uma energia externa tem que ser aplicada para contrapor-se à força de retenção da água, energia esta conhecida como sucção do solo (LEE e WRAY, 1995).

A sucção tem grande importância no entendimento do comportamento mecânico e de deformabilidade de solos não-saturados. É definida como a pressão da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais (MARINHO, 1997).

A partir da equação 2.2, que define a energia potencial total, e admitindo que não exista carga sobre o solo, que o ar existente nos poros do solo esteja interligado com a atmosfera e desprezando o potencial gravitacional, o potencial pode reescrito da seguinte forma:

$$P_t = P_o + P_m \quad (\text{eq. 2.2})$$

Os potenciais matricial e osmótico podem ser tratados pelas suas pressões correspondentes, que são a sucção matricial e a sucção osmótica, respectivamente. Desta

forma, a soma das parcelas osmótica e matricial é definida como sucção total, conforme equação 2.3.

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o \quad (\text{eq. 2.3})$$

Onde:

Ψ_t : sucção total

Ψ_m : sucção matricial

Ψ_o : sucção osmótica

Quando o solo se encontra saturado, a componente matricial é insignificante, logo a sucção osmótica (Ψ_o) é equivalente à sucção total, restando apenas o efeito da concentração de solutos.

A sucção matricial (Ψ_m) é equivalente à sucção total quando a componente osmótica é nula, isto é, quando a água do solo é idêntica à água padrão (água pura ou solução com a mesma composição da água do solo), restando apenas o efeito da matriz do solo (capilaridade e adsorção).

Edil et al. (1981) verificou, através de ensaios triaxiais com sucção controlada, que o comportamento mecânico do solo não-saturado é afetado basicamente pela sucção matricial. Fredlund (1979) também considerou que esta componente é suficiente para descrever o comportamento de resistência dos solos não-saturados.

A sucção matricial é definida como sendo a pressão negativa da água intersticial devido aos efeitos de capilaridade e as forças de adsorção, podendo ser também definida como a diferença entre a pressão do ar (u_a) e a pressão da água (u_w) presentes nos poros do solo, conforme a equação 2.4:

$$\Psi = \Psi_m = u_a - u_w \quad (\text{eq. 2.4})$$

Onde:

u_a : pressão do ar

u_w : pressão da água

2.4.1 Métodos de Medição da Sucção do Solo

Existem diversas técnicas disponíveis para medição da sucção do solo, seja no campo ou no laboratório. A tabela 2.1 apresenta um resumo de algumas técnicas de medição direta e indireta de sucção do solo.

Tabela 2.1: Técnicas de medida de sucção (fonte: VILAR, 2002).

| Método | Tipo de sucção medida | Faixa de medida (kPa) |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Tensiômetro | Matricial e total | 0 – 90 |
| Aparelho extrator de Richards | Matricial | 0 – 1500 |
| Condutividade térmica | Matricial | 0 – 400 |
| Condutividade elétrica | Matricial e osmótica | 20 – 1500 |
| Psicrômetro | Total e osmótica | 100 – 8000 |
| Funil de placa porosa | Matricial | 0 – 70 |
| Papel-filtro | Matricial e total | 0 – 29000 |

2.4.1.1. Tensiômetro

Mede diretamente a sucção matricial do solo e consiste em um tubo onde em uma extremidade existe um sistema de medição de pressão, que pode ser um manômetro de mercúrio, um manômetro de vácuo ou um transdutor de pressão, e na outra extremidade existe uma placa porosa, a qual permite o fluxo de água entre o solo e o próprio tensiômetro. Pode ser usado no campo ou em laboratório.

O princípio básico de funcionamento do tensiômetro é a sucção da água do instrumento pelo solo, até que se estabeleça o equilíbrio, onde o fluxo é cessado, sendo assim a água no tensiômetro terá a mesma sucção do solo. O fluxo ocorre devido à diferença de pressão entre o tensiômetro e o solo.

Dentre as limitações, a maior delas está relacionada com a máxima sucção possível de ser medida devido a cavitação, que é a formação de microbolhas de ar dentro do sistema devido a baixa pressão. Os tensiômetros medem sucções até aproximadamente 90 kPa.

Segundo Marinho e Chandler (1994), para se evitar a cavitação em tensiômetros, os seguintes passos devem ser seguidos: uso de água deaerada para evitar a saturação da água por ar; a água e todas as superfícies dentro do sistema de medição devem ser puras e limpas; as superfícies em contato com a água do sistema devem ser bem polidas para evitar ou reduzir o número e tamanho das microcavidades; o sistema deve ser submetido a vácuo para que seja

removida a maior quantidade de ar possível aprisionado nas microcavidades e deve ser submetido a um processo de ciclos de pressão, indo de zero (ou negativa) até uma pressão positiva da ordem de 3 MPa para contribuir na dissolução ou liberação do ar presentes nas cavidades.

A seguir é apresentado um tipo de tensiômetro de alta capacidade, que mede sucções maiores que 90 kPa sem apresentar o fenômeno da cavitação.

- Tensiômetro de Alta Capacidade

Ridley e Burland (1993) desenvolveram um equipamento capaz de realizar medições diretas de sucção de até 1500 kPa. Ele usa um transdutor de poropressão miniatura em aço inox, do tipo ENTRAN EPX-500, com uma faixa de trabalho de 3500 kPa. É envolto por um revestimento também de aço inox, com uma pedra porosa de alta entrada de ar (1500 kPa) e um reservatório de água livre entre esta pedra e o transdutor de aproximadamente 3mm^3 . Segundo os autores, este pequeno volume parece inibir a formação de bolhas de ar na água, evitando a cavitação e aumentando a faixa de medição direta de sucção além da atingida normalmente por outros instrumentos. A saturação da pedra porosa é feita com o uso de uma bomba de água de alta pressão.

Marinho e Pinto (1997) também apresentaram um tensiômetro que permite medições de sucção maiores que 100 kPa. Ele trabalha com uma técnica que evita a cavitação. O instrumento também usa um pequeno volume de água (perto de 20mm^3) e área superficial interna igualmente pequena. A técnica de saturação é aplicada com uma pressurização do sistema a 3,5 MPa, mantida por 24 horas e, então, fazendo-se ciclos de 0 a 3,5 MPa por dez vezes. Isto reduziria a possibilidade de cavitação e o equipamento estaria apto a sustentar sucções da ordem de 600kPa.

Como vantagens do uso do tensiômetro, podem ser apresentados os tempos curtos para o alcance do equilíbrio, a facilidade de interpretar os dados adquiridos, a versatilidade do equipamento (pode ser usado no campo ou no laboratório) e a possibilidade de incorporá-lo a diversos equipamentos de ensaio.

Como aspectos negativos do tensiômetro do tipo convencional, existem os limites de mensuração e a possibilidade de ocorrer osmose na interface entre a ponteira e o solo.

2.4.1.2 Psicrômetro

A metodologia para medição de sucção com o uso do psicrômetro é baseada na curva de calibração do equipamento que relaciona a umidade relativa com a sucção. São aparelhos de medição direta, que podem ser utilizados no campo ou laboratório, e servem para medir a sucção total do solo por meio da medição da umidade relativa do ar nele, em equilíbrio com a interface solo-água. Trata-se de um bulbo poroso fino que entra em contato com o solo, permitindo o estabelecimento de um equilíbrio entre o teor de umidade relativo do ar dos vazios do solo e do ar do interior do bulbo. Imerso no interior do bulbo poroso encontra-se um termopar ligado a um microvoltímetro, uma fonte de alimentação elétrica, e um sensor de temperatura como o mostrado na Figura 2.5.

De uma forma geral, a medição de sucção por psicrômetro fica no intervalo entre 100 kPa e 8 MPa (MARINHO e PEREIRA, 1998). Ele apresenta melhores resultados para valores altos de sucção, já para valores baixos de sucção a medição do equipamento é muito instável, o que dificulta o seu uso.

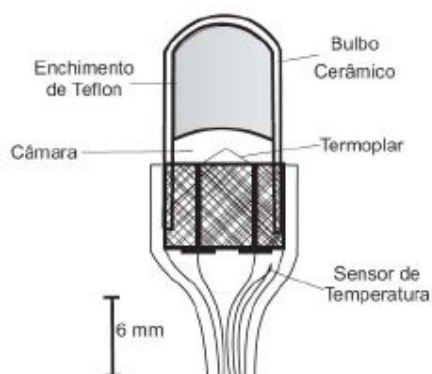


Figura 2.5: Esquema de um Psicrômetro (fonte: CALLE, 2005).

2.4.1.3 Placa de Sucção

No equipamento placa de sucção, a amostra de solo é disposta em disco cerâmico de alta entrada de ar, que se apóia sobre uma plataforma de altura regulável. O disco cerâmico permanece hidráulicamente conectado a um reservatório d'água, que está sempre posicionado a uma cota inferior à da plataforma. A pedra porosa deve ser saturada antes de proceder a tomadas de medidas pela placa de sucção.

A fonte de sucção é a diferença de potencial gravitacional estabelecida entre a amostra e o reservatório da água. Para cada desnível imposto entre o disco cerâmico e o reservatório de água, mede-se um valor de sucção no corpo de prova.

É um equipamento de técnica simples, usado em laboratório, que dispensa o emprego de compressores de ar e câmaras herméticas. Como desvantagem, pode ser citada um limite para valores a serem mensurados, em torno de 100 kPa, devido à possibilidade de ocorrência de cavitação (GOMES, 2007).

2.4.1.4 Câmara ou Placa de Pressão ou Aparelho Extrator de Richards

A câmara de pressão compõe-se de uma câmara hermética conectada a uma tubulação de ar pressurizado e a um reservatório de água deaerada usada em laboratórios. No interior da câmara, sobre um disco cerâmico de alta entrada de ar que deve estar saturado, dispõe-se o corpo de prova (figura 2.6). Uma pressão de ar sobre a atmosfera interna do equipamento é imposta, sendo permitida a interação entre o corpo de prova e o disco cerâmico saturado, ocorrendo troca de água entre eles e o manômetro do reservatório de água indica a variação de pressão. A diferença entre a pressão de ar imposta e a pressão hidráulica é o valor sucção matricial do corpo de prova (GOMES, 2007).

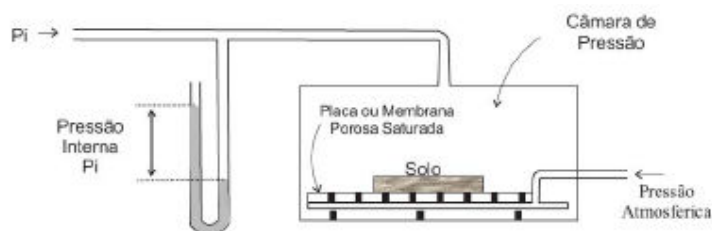


Figura 2.6: Câmara de Pressão (fonte: REICHARDT, 1985)

Foram desenvolvidas para se medir sucções acima de 100 kPa, podendo atingir valores de 1.500 kPa com o uso de pedras cerâmicas especiais e 10.000 kPa com o uso de membrana de celulose.

A placa de pressão faz o uso da técnica de translação de eixos que objetiva evitar que o fenômeno da cavitação ocorra no sistema. Essa técnica consiste em aumentar a pressão no ar, assim o referencial zero de pressão é deslocado, de modo que a água do equipamento fique

submetida a pressões positivas, permitindo assim a sua medida. A sucção não se altera, pois a diferença entre a pressão no ar e pressão na água permanece igual.

O aumento da pressão do ar que envolve o solo eleva a pressão na água do reservatório a um valor superior ao da sucção a ser medida. Desta forma, a pressão neutra negativa da amostra é elevada até um valor positivo, ainda inferior a pressão da água no reservatório. Sendo assim, ocorre um fluxo de água do reservatório para a amostra até que o equilíbrio seja alcançado (GOMES, 2007).

As vantagens do uso desta técnica é que a sucção pode ser medida ou controlada e o método pode ser incorporado a diversos ensaios laboratoriais. Porém, como desvantagens, valores superestimadas de sucção são obtidos para amostras com grau de saturação superior a 80% ou para corpos de prova que contenham bolhas de ar oclusas. A sucção pode ser subestimada devido a difusão de ar através da placa porosa e existe a possibilidade da ocorrência de osmose em função da qualidade da pedra porosa e da amostra ensaiada (GOMES, 2007).

2.4.1.5 Método do Papel Filtro

O método do papel filtro é um método de medição indireta da sucção do solo utilizado em laboratório e terá um maior destaque, pois foi um dos métodos adotados neste trabalho.

Quando dois materiais porosos são colocados juntos e lacrados em um meio ambiente, eles trocarão água entre si até chegarem ao equilíbrio. A troca de água pode ser em forma só de vapor (se não é permitido o contato com os materiais) ou tanto na forma de fluxo de líquido quanto de vapor (se há contato direto). O papel filtro, um material poroso, se comporta da mesma maneira quando lacrado com um solo qualquer. A água que o papel filtro absorve pode ser usada como um indicador da sucção, sendo que, em geral, quanto mais seco o papel filtro na umidade de equilíbrio, maior a sucção do solo.

Dependendo do tipo de contato (se há ou não) entre o papel e o solo, o papel filtro pode medir tanto sucção matricial quanto total. No ensaio em que o papel não fica em contato com o solo, é usual a colocação de um disco de material inerte entre ele e o solo, para garantir que somente vapor será trocado (figura 2.7). Antes de ser absorvido pelo papel filtro, o vapor de água tem de superar a força matricial e osmótica para sair do solo, resultando, assim, numa estimativa da sucção total. Quando ocorre o contato entre o papel filtro e o solo (figura 2.7),

só a sucção matricial é medida, pois a solução ou fluido dos vazios do solo se move através do papel filtro junto com a água adsorvida (Lee e Wray, 1995).

Quando o ensaio é realizado por meio da colocação do papel filtro em contato direto com o solo, espera-se um tempo para que a umidade do papel filtro esteja em equilíbrio com a umidade do solo. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), o tempo de resposta do papel é da ordem de no mínimo uma semana. Uma vez atingido o equilíbrio, mede-se a umidade do papel filtro e determina-se a sucção do solo segundo uma curva de calibração do papel filtro, obtida do equilíbrio do papel com soluções salinas de sucção osmótica conhecida, proposta por Chandler et al. (1992).

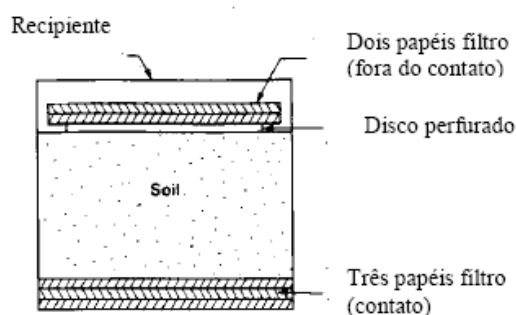


Figura 2.7: Papel filtro no contato (sucção matricial) e fora (sucção total) (fonte: FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Os dois tipos de papel filtro mais frequentemente utilizados são os das marcas Whatman's 42 e Schleicher & Schuell n° 589.

Chandler e Gutierrez (1986) informam que o papel filtro deve ser usado diretamente da caixa, isto é, no estado seco ao ar. O ensaio do papel filtro foi padronizado pela norma americana ASTM D 5298-03, que sugere que o papel filtro seja seco em estufa por no mínimo 16 horas antes do uso. Segundo Marinho (1997), este procedimento pode afetar as características de absorção do papel resultando na alteração da curva de calibração.

Por ser o método mais simples para se medir a sucção, muito cuidado deve ser tomado durante a determinação do teor de umidade do papel-filtro. De acordo com Woodburn e Lucas (1995), o método tem três desvantagens principais que afetam a sua utilidade. São elas:

- Tempo exigido para se atingir o equilíbrio

O tempo para o alcance do equilíbrio é em torno de 7 dias, de acordo com a ASTM D 5298-03. Tempos maiores são considerados melhores, mas existe o risco de flutuações de

temperatura, que aumentam a possibilidade de condensação de vapor, o que poderia invalidar os resultados (Swarbrick, 1995). Para se certificar da taxa em que papeis filtro atingem o equilíbrio, Swarbrick realizou alguns ensaios em amostras com diferentes teores de umidade inicial. Ele verificou que o tempo de sete dias para o equilíbrio é adequado para todas as situações, conforme preconiza a ASTM e Fredlund e Rahardjo (1993).

- Efeito da variação de temperatura

O problema de flutuação de temperatura pode ser minimizado se os recipientes com as amostras forem colocados em caixas isolantes, como isopor. De acordo com Woodburn e Lucas (1995), quando se mede a sucção matricial, o recipiente com solo e papel devem ser colocados em locais com variação de temperatura menor que 3 °C e, para sucção total, 0,5 °C.

- Exigência para medições muito precisas da massa do papel

Segundo Chandler e Gutierrez (1986), para evitar que o papel filtro ganhe ou perca umidade para a atmosfera, o tempo de pesagem do mesmo deve ser de aproximadamente 30 segundos. A técnica também requer manuseio do papel e precisão da pesagem (da ordem de 0,001g). De acordo com Marinho e Chandler (1994) o tempo de transferência do papel filtro para uma cápsula fechada ou um saco plástico autoselante deve ser de no máximo 5 segundos.

A técnica do papel filtro tem sido muito utilizada para obtenção da curva característica por ser um método de fácil execução, de baixo custo e por cobrir uma faixa de sucção relativamente ampla. Segundo Swarbrick (1995), a grande vantagem deste método é que o papel filtro é adaptado ao valor da sucção do solo, ao invés do solo se adaptar ao valor da sucção aplicada.

2.5 Características Hidráulicas de solos

2.5.1 Curva Característica

As curvas que mostram a relação entre a quantidade de água presente nos poros e a sucção do solo são conhecidas como curva característica de retenção de água no solo ou curva característica, que é uma representação da capacidade do solo de armazenar água. É uma ferramenta fundamental usada para representar o comportamento de um solo não-saturado. A

quantidade de água pode ser medida em relação aos teores de umidade volumétrico (θ), gravimétrico (w) ou grau de saturação (S). Já a sucção pode ser estabelecida em termos de sucção matricial (ψ_m) ou sucção total (ψ). Para elevados valores de sucção (acima de 1500 kPa), a sucção matricial e a sucção total podem ser consideradas equivalentes (FREDLUND e XING, 1994).

Para se obter a curva característica em laboratório podem ser utilizados dois procedimentos:

- secagem (ou desidratação): quando a umidade de uma amostra previamente saturada é reduzida gradativamente, ou seja, é exposta a potenciais matriciais crescentes. A perda de água do solo pode ser obtida mediante a aplicação de pressões na amostra ou deixando evaporar ao tempo; e
- umedecimento (ou hidratação): quando uma amostra seca tem o potencial matricial reduzido gradualmente, aumentando-se a umidade.

A curva característica pode ser dividida em três estágios de drenagem e são caracterizados na figura 2.8:

- O primeiro estágio, chamado de “Efeito Limite” (*Boundary Effect Stage*) ocorre até o valor de entrada de ar. Brooks & Corey (1966) introduziram o conceito de valor de entrada de ar em termos de sucção como sendo o valor da sucção matricial que tem de ser excedida para o ar poder entrar para os vazios do solo. Para se definir a sucção de entrada de ar, pode-se usar o método de Brooks e Corey (1964) em Gerscovich (2001), que sugerem um procedimento gráfico a partir da interseção entre dois trechos lineares.
- O segundo estágio ocorre entre a pressão de entrada de ar e o ponto de início da umidade residual. Brooks & Corey (1966) também definiram o conceito de grau de saturação residual como aquele a partir do qual um aumento da sucção matricial não produziria variações significativas no grau de saturação. Também chamado de fase de transição, neste estágio o fluxo de água ocorre na fase líquida quando a sucção aplicada aumenta e o solo é drenado com o aumento da sucção.
- Já no terceiro estágio, fase residual de drenagem, a continuidade da água nos vazios é bastante reduzida e descontínua e acréscimos adicionais na sucção levam a pequenas mudanças no grau de saturação do solo. (Vanapalli et al., 1999).

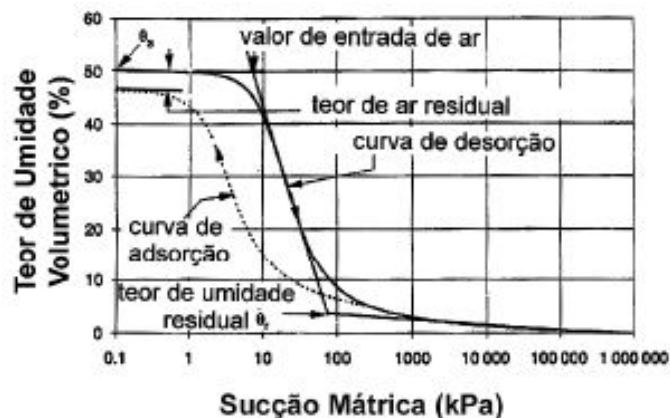


Figura 2.8: Curva característica Típica de um Solo Siltoso (adaptado de Fredlund e Xing, 1994)

Algumas curvas características assumem a forma de duplo “S”, sendo conhecida por curva característica bimodal, conforme figura 2.9. Para esses solos têm-se duas pressões de entrada de ar, uma correspondente aos microporos e outra aos macroporos, pois esses solos apresentam-se geralmente agregados, conduzindo à predominância de microporos no interior dos agregados e macroporos entre eles.

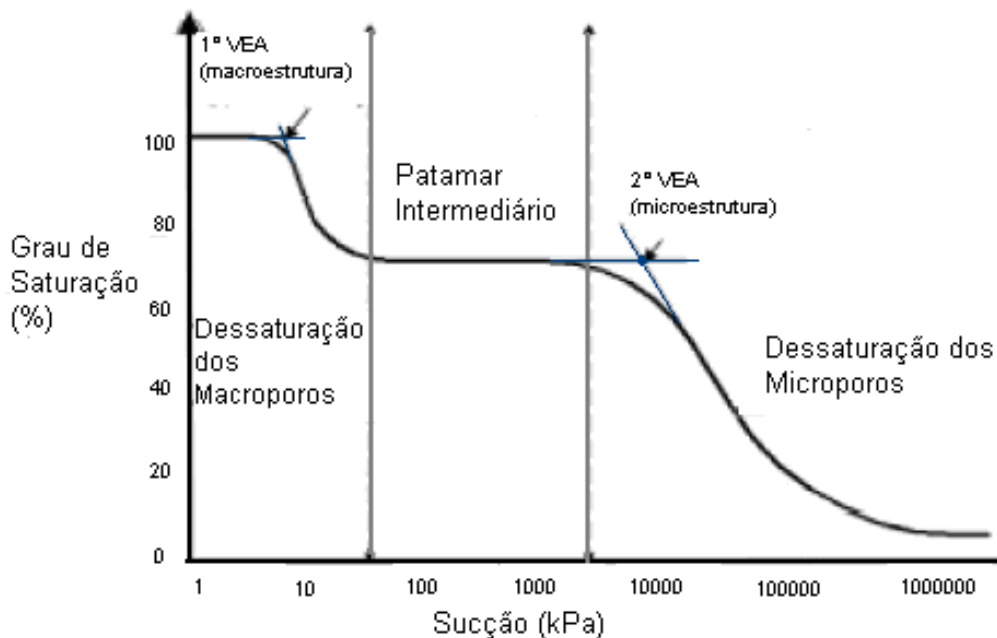


Figura 2.9: Curva característica bimodal “2S” (fonte: CAMPOS ET AL, 2008)

2.5.1.1 Histerese

A histerese é o fenômeno que diferencia as curvas características obtidas pelo procedimento de umedecimento da amostra, daquelas obtidas pelo procedimento de secagem da amostra, pois a relação entre conteúdo de água no solo e potencial não será igual.

De acordo com a figura 2.10, verifica-se que o solo apresenta teores de umidade maiores, durante o processo de secagem, para atingir as sucções desejadas. Pode ser observado também que, tanto para a curva de secagem, quanto para a curva de umedecimento, o valor da umidade residual (θ_r) é o mesmo quando se trabalha com o mesmo solo e este apresenta a mesma estrutura.



Figura 2.10: Curvas características por umedecimento e secagem (fonte: HILLEL, 1971).

A histerese produzida pelos processos de secagem e umedecimento pode ser atribuída à não uniformidade dos vazios e dos poros do solo, às bolhas de ar capturadas nos vazios do solo durante o umedecimento e à alteração na estrutura do solo decorrente da expansão ou contração do mesmo (CALLE, 2000). Alguns dos poros de menor tamanho não são preenchidos, deixando ar aprisionado, o que impede a entrada da água, e alguns macroporos do solo podem estar cercados apenas por microporos. Neste caso, o macroporo não será drenado até que o potencial matricial seja suficiente para esvaziar os poros menores que o cercam. A expansão e contração de argilas, à medida que o solo seca e é reumedecido, provoca mudanças na estrutura do solo que afetam as relações entre solo e água.

O valor real da sucção depende não somente do grau de saturação, mas também do estado inicial do solo e de todo o histórico de umedecimento e secagem até aquele momento.

2.5.1.2 Fatores que Interferem na Curva Característica

As características que distinguem as curvas características e sua forma dependem de vários fatores como a estrutura do solo, teor de umidade inicial ou de moldagem, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, histórico de tensões e método de compactação.

- Distribuição dos Poros e Distribuição Granulométrica

Os solos arenosos possuem a maioria dos poros relativamente grandes, a uma dada sucção matricial, muitos poros se esvaziam e poucos ainda podem reter água, pois nesses poros grandes a água é retida com pouca energia. Em solos argilosos, a capacidade de retenção de água é maior devido à grande força de adesão entre a água e os pequenos poros de argila que possuem uma grande superfície específica. Portanto, uma pequena variação da sucção responde por uma maior variação de umidade em solos arenosos do que em solos argilosos, os quais necessitam de grandes variações de sucção para modificar sensivelmente o valor da umidade, de acordo com a figura 2.11. Além disso, o decréscimo do tamanho dos grãos leva a um aumento no valor da pressão de entrada de ar e suaviza a inclinação da curva (BARBOUR, 1998).

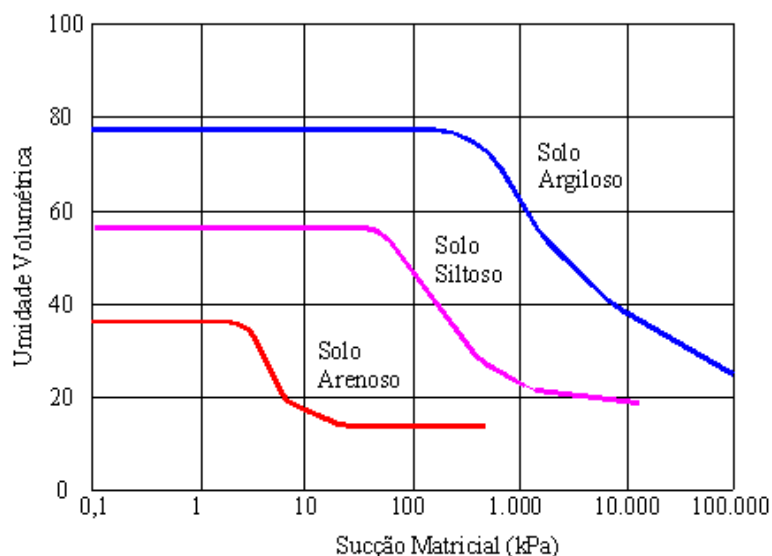


Figura 2.11: Curva característica típica para diferentes solos – Umidade Volumétrica x Sucção Matricial (fonte: FREDLUND e XING, 1994)

A figura 2.12 apresenta a curva característica com o valor da sucção variando em função do grau de saturação da amostra de solo. Nesta figura é apresentada a curva característica de um geotêxtil não tecido, que é um produto sintético usado na engenharia geotécnica, com características de material filtrante. Ele apresenta um comportamento similar ao da areia.

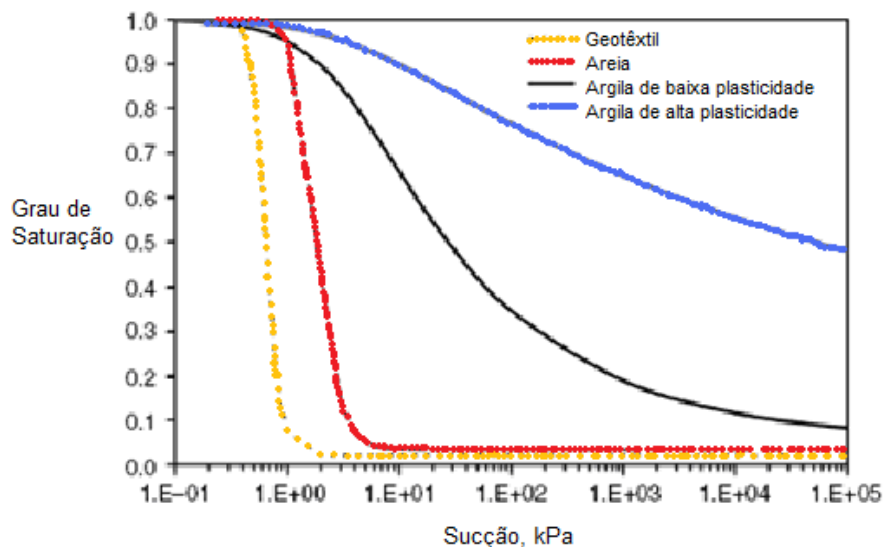


Figura 2.12: Exemplos de curvas características para diferentes tipos de solos – Grau de saturação x Sucção (fonte: ZORNBERG e MCCARTNEY, 2006)

A curva característica pode ser um indicativo da fração argila presente na amostra, pois a posição relativa da curva característica obedece geralmente à ordem da plasticidade do solo, sendo que os solos que contêm maior plasticidade estão acima dos solos de menor plasticidade. Um aumento da fração de argila leva geralmente a um aumento da quantidade de água retida sob um mesmo valor de sucção. Miller et al. (2002) apresentam dados que confirmam este comportamento, como se pode observar na figura 2.13. Nesta figura, de acordo com a Classificação dos Solos pelo Sistema Unificado da Mecânica dos Solos, a nomenclatura SM significa areia fina, CL é referente a argila de baixa e média plasticidade e CH significa argila de alta plasticidade

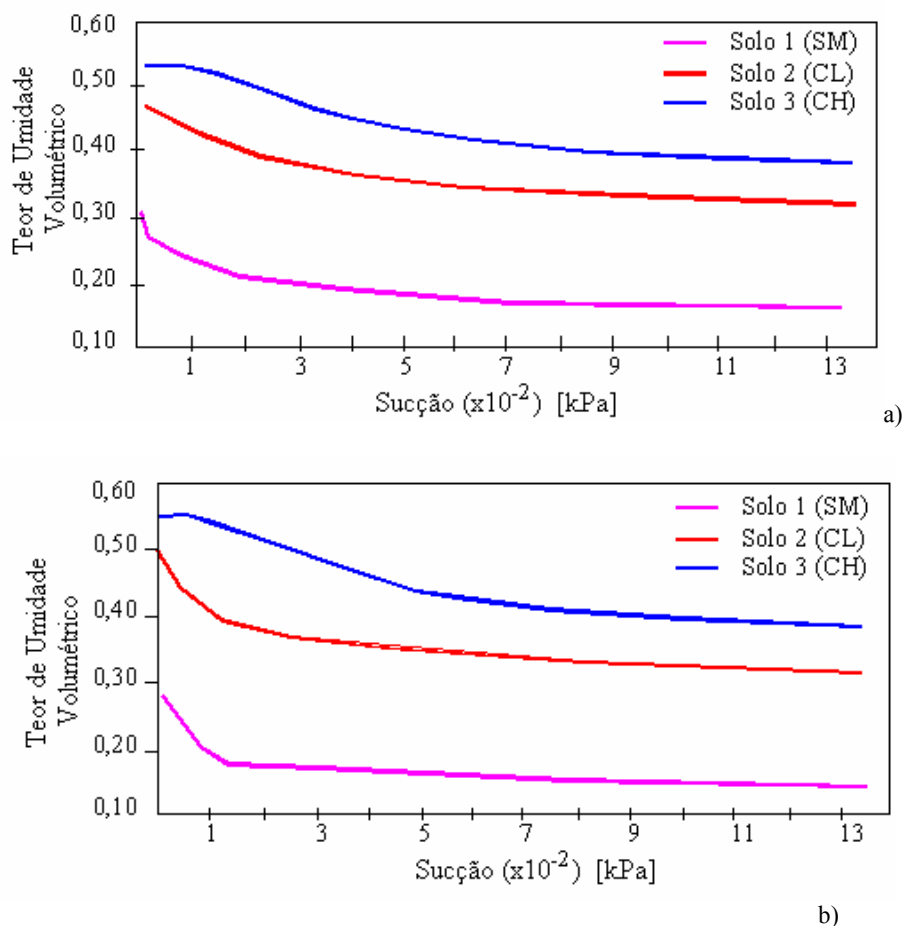


Figura 2.13: Variação da curva característica devido ao tipo de solo (a) amostra moldada com $w < w_{ót}$ (b) amostra moldada com $w > w_{ót}$ (fonte: MILLER ET AL., 2002)

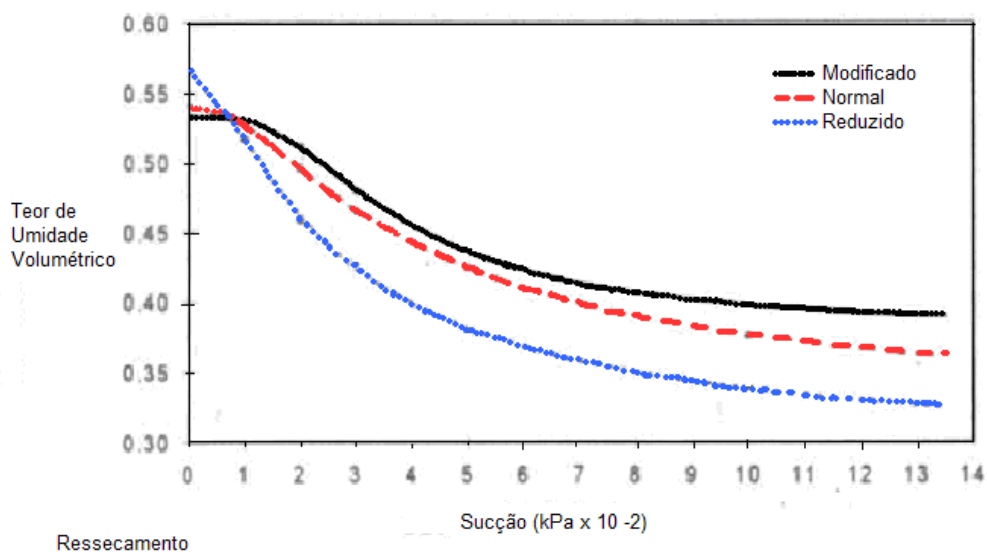
- Umidade de Moldagem e Influência da Compactação

As curvas características apresentam comportamentos diferentes de acordo com a umidade de moldagem dos corpos de prova de um mesmo solo. Vanapalli et al (1999) realizaram ensaios para a obtenção de curvas características de um solo arenoso compactado estaticamente em três condições de moldagem da curva de compactação: ramo seco, ramo úmido e umidade ótima. Para amostras moldadas no ramo seco, a dessaturação inicial é controlada pela macroestrutura, pois o arranjo das partículas permite que se formem grandes poros interconectados, pois a estrutura neste ramo da curva é floculada. No ramo úmido, como a estrutura é dispersa e mais homogênea, a capacidade de retenção de água e a sucção são maiores, pois é controlada pela microestrutura. As amostras moldadas na umidade ótima apresentam características intermediárias em relação às duas condições já apresentadas. Vanapalli et al (1999) afirmam que essas conclusões podem ser usadas para os solos finos.

Sabe-se que a sucção aumenta com o decréscimo do tamanho dos poros. Sendo assim, ao aumentar o esforço de compactação, a curva característica é levada às porções superiores do gráfico e ao aumento da pressão de entrada de ar.

Miller et al (2002) estudaram o comportamento de um solo argiloso com três diferentes energias de compactação: Proctor modificado, Proctor normal e Proctor reduzido. Este comportamento está exemplificado na Figura 2.14. O Proctor reduzido é semelhante ao padrão, porém com 15 golpes por camada ao invés de 25 golpes como é feito no normal, utiliza-se um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 30 cm, compactando-se o solo em 3 camadas. No Proctor modificado um soquete de 5 kg cai de uma altura de 45 cm, compacta-se o solo em 5 camadas com 50 golpes

Nota-se que até um certo valor de sucção (geralmente próximo à pressão de entrada de ar) a posição das curvas se inverte tanto para o ensaio através do umedecimento quanto para o ressecamento da amostra. Segundo os autores, isto ocorre porque o solo com maior porosidade (ou seja, compactado com menor esforço) terá maiores valores de teor de umidade saturado (θ_s). Contudo, com o aumento da sucção o teor de umidade associado com qualquer sucção para solos menos compactados é menor do que para os solos mais compactados.



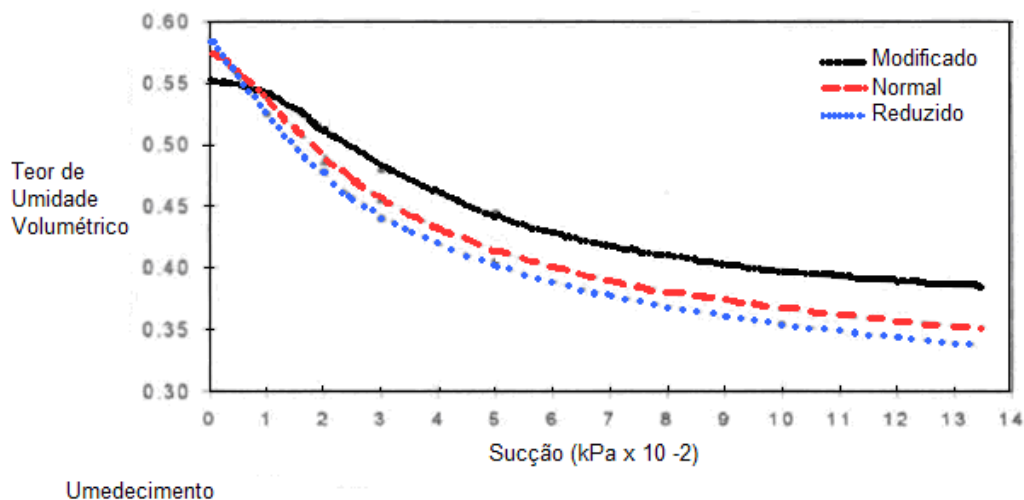


Figura 2.14: Efeito da energia de compactação sobre a curva característica: proctor modificado, normal e reduzido (fonte: MILLER ET AL., 2002)

Os autores chamam atenção, no entanto, para a limitada faixa de umidade considerada no trabalho, a qual variou no máximo em 4% em solo argiloso. Na figura 2.15, são apresentadas curvas de retenção para amostras com umidades diferentes da umidade ótima.

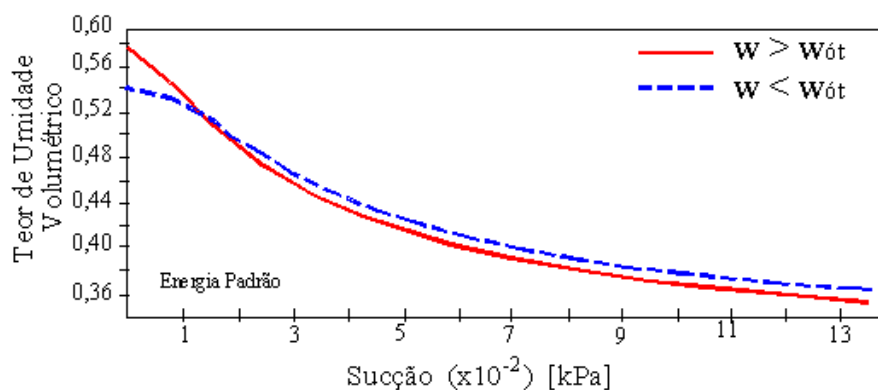


Figura 2.15: Curva característica para diferentes teores de umidades na compactação (fonte: MILLER ET AL., 2002)

Na figura 2.16, é apresentada a variação do comportamento da curva característica de amostras de solo compactada no laboratório e no campo.

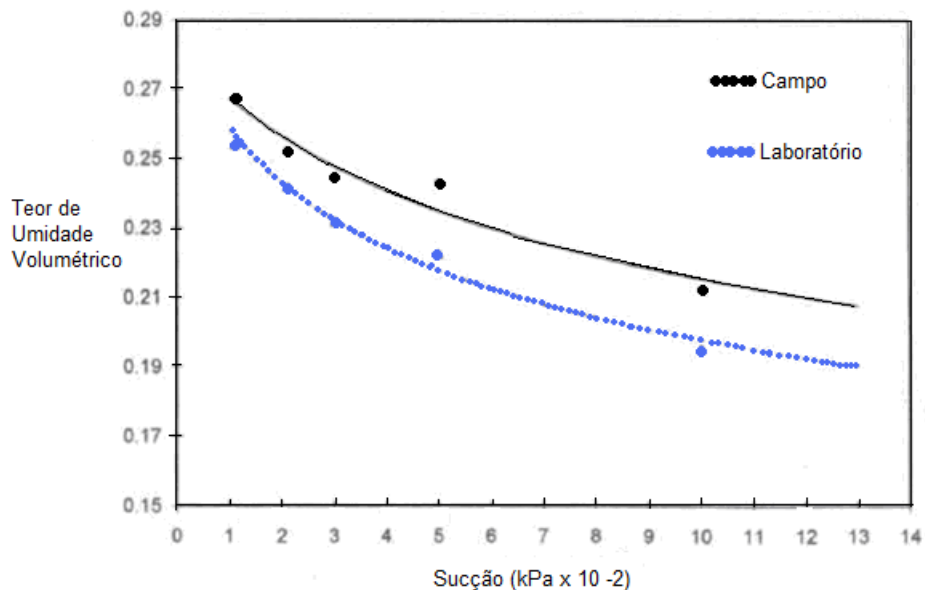


Figura 2.16: Curva característica de amostras de solo compactadas no campo e no laboratório (fonte: MILLER ET AL., 2002)

Hillel (1971) apresentou duas curvas características de um mesmo solo (figura 2.17) sendo uma para um solo que foi agregado em suas condições naturais e outra para um solo que foi compactado. De acordo com a figura a seguir, o teor de umidade saturado do material compactado é menor que no material agregado porque a compactação reduz o índice de vazios do material, diminuindo, assim, o volume de água necessário para preencher todos os vazios. Entretanto, para teores de umidade intermediários, o material compactado apresenta valores de sucção maiores que o material agregado (HILLEL, 1971).

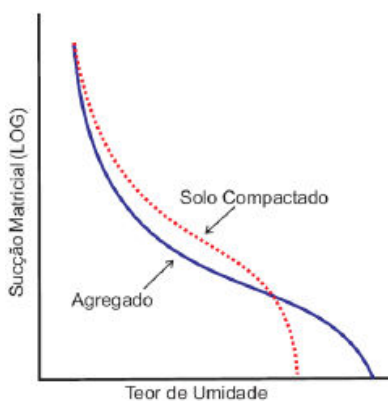


Figura 2.17: Efeito da estrutura do solo na curva característica (fonte: HILLEL, 1971).

- Influência do Histórico de Tensões

Embora as características das curvas de diversos solos possam ser generalizadas, a forma da curva depende fundamentalmente da história de tensões à qual a amostra foi submetida (MARINHO e PEREIRA, 1998).

Vanapalli et al. (1999) também apresentam uma curva característica para amostras compactadas sob diferentes umidades e sujeitas a diferentes históricos de tensões como se pode observar na figura 2.18. Neste caso os autores submetem as amostras a uma pressão (P_{equiv}) de 25 a 200 kPa e depois levadas ao descarregamento até 3,5 kPa para, então, serem submetidas ao ensaio de obtenção da curva característica. Pode-se observar que o aumento da pressão de entrada de ar é proporcional ao aumento da tensão imposta.

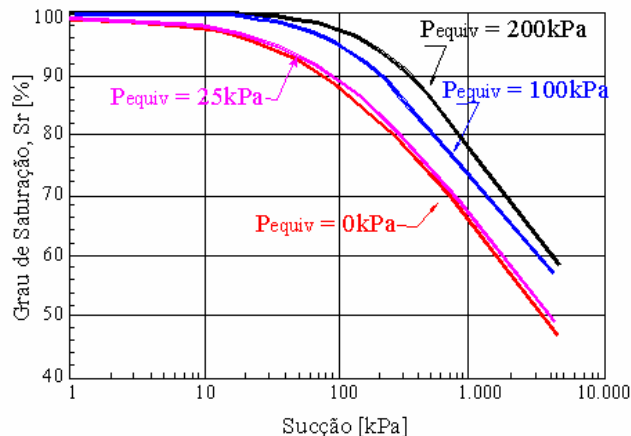


Figura 2.18: Curvas características de amostras sujeitas a diferentes históricos de tensões e $w = w_{ot}$
(fonte: VANAPALLI ET AL., 1999)

A figura 2.19 mostra a variação da pressão de entrada de ar com o índice de vazios para teores de umidade diferentes da umidade ótima.

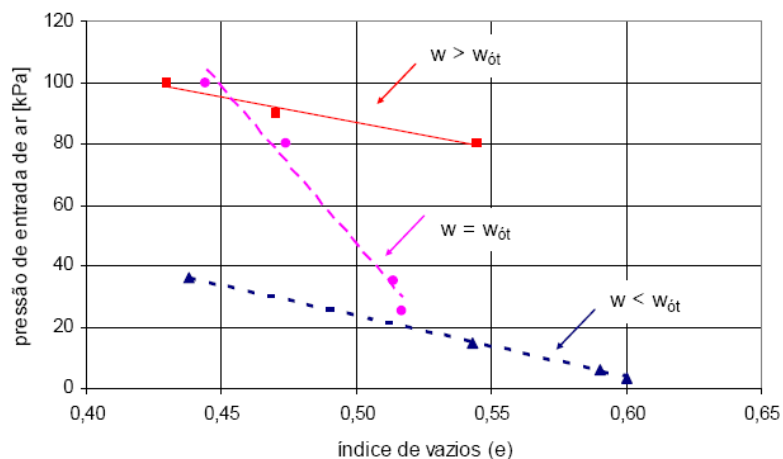


Figura 2.19: Variação da pressão de entrada de ar com o índice de vazios (fonte: VANAPALLI ET AL., 1999)

- Temperatura

A temperatura é um fator que também deve ser considerado, pois um aumento de seu valor pode causar uma diminuição na tensão superficial na interface solo-água, diminuindo a curvatura do menisco e, conseqüentemente, a sucção. Caso exista ar ocluído na massa de solo, o aumento de temperatura forçaria um aumento no diâmetro dos poros devido a expansão do ar (HUSE, 2007). Esse comportamento provocaria uma alteração da estrutura do solo, mudando o aspecto da curva característica.

2.5.2 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica e a curva característica são as propriedades hidráulicas do solo que determinam o comportamento do fluxo da água em seus vazios.

A condutividade hidráulica pode ser definida como a taxa na qual a água, sob pressão, pode se difundir através dos vazios de um solo. O coeficiente de permeabilidade (k) é a velocidade de escoamento média do fluxo de água em um solo sob a ação de um gradiente hidráulico unitário, geralmente expresso em metros por segundo (m/s) ou centímetros por segundo (cm/s). Ela pode ser saturada ou não-saturada.

2.5.2.1 Condutividade Hidráulica Saturada

A condutividade hidráulica saturada ocorre quando o solo atinge seu grau de saturação, de forma que o volume de vazios é totalmente preenchido com água e existe somente fluxo de água.

O movimento laminar de água do solo é quantificado pela lei de Darcy, que é expressa como:

$$v = K \Delta h / L \quad (\text{eq. 2.5})$$

Onde:

V: velocidade de descarga

K: coeficiente de condutividade hidráulica

Δh : perda de carga entre pontos determinados

L: distância entre pontos determinados

Os permeâmetros são utilizados em ensaios de laboratório para determinar a condutividade hidráulica de solos saturados. Esses ensaios são baseados na lei de Darcy e podem ser ensaios de carga constante ou ensaios de carga variável. Os ensaios de carga constante, mais indicados para materiais arenosos, são caracterizados pela carga hidráulica mantida constante sendo então a vazão correspondente medida. Já os ensaios a carga variável, a carga hidráulica varia com o tempo, a medição da vazão é feita a partir das medidas da variação do nível de água. Este ensaio é usado principalmente para determinação da condutividade hidráulica de solos argilosos, os quais, sendo praticamente impermeáveis, são atravessados por uma quantidade de água muito pequena durante o ensaio e o ensaio a carga constante seria muito demorado.

A permeabilidade pode ser obtida indiretamente através do ensaio de adensamento para solos finos como argilas e siltes, de acordo com a equação 2.6:

$$K = \gamma_w C_v m_v \quad (\text{eq. 2.6})$$

Onde:

γ_w : peso específico da água

C_v : coeficiente de adensamento

m_v : coeficiente de deformação volumétrica

2.5.2.2 Condutividade Hidráulica Não-Saturada

A condutividade hidráulica não-saturada pode ser definida como aquela que ocorre no solo onde os seus vazios não estão completamente preenchidos por água, ou seja, em qualquer condição de umidade menor do que a de saturação. Experiências de Richards (1931), Childs e Collis-George (1950), mostram que a lei de Darcy pode-se aplicar a solos não-saturados com a expressão:

$$v = - K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (\text{eq. 2.7})$$

Onde:

$K(\theta)$: condutividade hidráulica não saturada;

v : velocidade (ou densidade) de descarga ;

θ : umidade volumétrica;

z : coordenada de posição; e

ψ : potencial total do solo não saturado

Uma das primeiras relações para a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica para solos não-saturados foi apresentada por Childs e Collis George (1950). O método parte do princípio de que a porosidade é um fator muito importante nos solos não-saturados e a distribuição dos poros influencia os potenciais capilares (sucção matricial), o qual se baseia na variação dos tamanhos dos poros do solo.

2.5.2.3 Fatores que influenciam a condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica depende de vários fatores, como o índice de vazios, o grau de saturação, a estrutura, a textura e a composição mineralógica do solo, o peso específico e a viscosidade do líquido percolante.

- Grau de Saturação

O grau de saturação de um solo exerce uma grande influência na condutividade hidráulica, pois a quantidade de vazios preenchidos por água influencia de forma direta na condutividade. Se os vazios estiverem preenchidos por ar, eles irão bloquear os canais de percolação entre as partículas, reduzindo significativamente a condutividade hidráulica. Por isso, para o cálculo da permeabilidade não-saturada devem ser considerados os vazios interconectados do solo, isto é, a porosidade efetiva.

- Índice de Vazios

A permeabilidade varia proporcionalmente com o índice de vazios do solo, isto é, quanto maior o índice de vazios do solo maior é a permeabilidade do mesmo. Desta forma, a maneira que o solo é preparado para ser ensaiado tem um efeito considerável no tamanho e disposição dos vazios entre as suas partículas, e conseqüentemente na condutividade hidráulica.

- Estrutura dos Solos

A estrutura do solo e a disposição relativa dos grãos também influenciam na condutividade hidráulica dos solos. Por exemplo, os solos residuais, em virtude dos macroporos de sua estrutura, tendem a apresentar permeabilidades maiores. Deve-se observar também a compactidade, a consistência e se o solo apresenta-se compactado ou encontra-se no seu estado natural, tendo em vista que o solo compactado apresenta uma condutividade hidráulica menor que no seu estado natural. Geralmente quando o solo é compactado mais seco, a disposição de suas partículas, por apresentar uma estrutura floclada, tende a apresentar uma condutividade hidráulica maior em relação a um solo compactado mais úmido, onde a estrutura encontra-se dispersa, mesmo que possuam o mesmo índice de vazios.

Outro aspecto importante na estrutura dos solos é que eles não são isotrópicos em relação à condutividade hidráulica. Os solos sedimentares têm as partículas com maiores dimensões orientadas na direção horizontal, por isso tendem a apresentar maiores coeficientes de permeabilidade na direção horizontal do que na vertical, caracterizando a anisotropia dos solos.

- **Peso Específico e Viscosidade do Líquido Percolante**

Taylor (1948) deduziu a equação para o coeficiente de permeabilidade, onde correlacionou o fluxo do líquido pelo solo à percolação de água por um conjunto de tubos capilares, associando-se à lei de Darcy. Concluiu que o coeficiente de permeabilidade depende do peso específico (γ_w) e da viscosidade do líquido (μ), que são duas propriedades da água que variam com a temperatura. Como o efeito da viscosidade é inversamente proporcional a variação de temperatura, foi adotado por convenção o coeficiente referido à água na temperatura de 20° C a fim de se obter uma uniformidade.

- **Textura e Forma da Partícula**

Partículas alongadas ou irregulares criam trajetórias de fluxos mais tortuosos do que aqueles ao redor de partículas esféricas, e partículas de superfície de textura áspera apresentam maior resistência por atrito ao fluxo do que partículas de superfície lisa. Sendo assim, os efeitos das partículas alongadas, irregulares e de textura áspera, causam uma redução na condutividade hidráulica, pois a velocidade de fluxo de água é reduzida.

- **Composição Mineralógica**

Em solos finos a composição mineralógica é um fator adicional, pois os diferentes tipos de minerais conservam diferentes espessuras de água adsorvida e, conseqüentemente, o diâmetro efetivo dos poros varia. Nos solos mais granulares (com exceção da mica e da matéria orgânica), a influência da composição do solo sobre a condutividade hidráulica pode ser de pequena importância.

3 CAMADAS DE COBERTURA

A camada de cobertura final de um aterro de resíduos sólidos urbanos deve ter um desempenho que assegure a proteção à saúde humana e ao meio ambiente, minimizando os impactos através da eliminação de vetores e redução da exalação de odores; a minimização da infiltração de água de chuva no aterro encerrado; drenagem da água; a minimização do fluxo de gases e da erosão (IPT, 2000). Além disso, a camada de cobertura deve manter a sua integridade com a ocorrência de erosão, ressecamento do solo, surgimento de trincas, colmatção e recalque diferencial e deve exigir o mínimo de custos com manutenção em longo prazo (TCHOBANOGLIOUS ET AL., 1993).

Existem vários métodos de construção da camada de cobertura, sendo que a utilização de solos compactados com baixa condutividade hidráulica é o método mais empregado. As questões da relação custo/eficiência das coberturas convencionais, baseadas nas características do material usado na sua construção (argila, geomembranas etc.), levaram, recentemente, ao surgimento de uma proposta inovadora, a cobertura final evapotranspirativa, cujos critérios de projeto são estabelecidos com base em uma avaliação das condições locais, visando assegurar uma relação mais favorável entre o custo e os resultados de proteção ambiental e da saúde humana obtidos (KAVAZANJIAN JR. e DOBROWOLSKI, 2003).

De acordo com Barros (2005), na elaboração do projeto do sistema de cobertura final, alguns fatores devem ser analisados, como: tipo e classe do resíduo a ser coberto, balanço hídrico e do clima do local, estabilidade dos taludes do sistema de cobertura, recuperação da área do aterro e disponibilidade de jazida de material próximo ao aterro. Devem ser levados em conta também os aspectos geotécnicos dos solos utilizados, os fatores que influenciam o crescimento de vegetação e a possibilidade de uso dos solos conjuntamente com geomembranas, geotêxteis, geossintéticos e outros, além da geometria da cobertura e identificação de plantas disponíveis e propriedade das coberturas vegetativas.

3.1 Componentes do Sistema de Cobertura Final

Um sistema de cobertura final de aterro é composto por seis componentes básicos: camada superficial, camada de proteção, camada de drenagem, barreira hidráulica ou de gás, camada de coleta de gás e camada de base, conforme figura 3.1. Porém, a utilização

simultânea desses componentes não é obrigatória para todos os sistemas de cobertura final, dependendo da condição climática e do balanço hídrico do local.



Figura 3.1: Camadas de um sistema de cobertura final

3.1.1 Camada Superficial

Essa camada é indispensável ao sistema de cobertura final de aterro de resíduos sólidos e possui a função de separar os componentes que se encontram abaixo da camada superficial do meio ambiente, além de prevenir a erosão, promover a evapotranspiração e o crescimento da vegetação.

Para esta camada podem ser utilizados solos naturais (misturados ou não), cascalhos, concreto asfáltico e outros materiais, até mesmo alguns materiais de demolição e construção.

Quando é utilizado solo natural, este fornece o suporte para o plantio de vegetação que devolve água para a atmosfera através da evapotranspiração, traz melhorias estéticas ao ambiente e reduz a erosão, diminuindo o volume e a velocidade do escoamento superficial.

3.1.2 Camada de Proteção

Esta camada está situada abaixo da camada de superfície, e é utilizada para armazenar a água que percola através da camada de superfície, proteger as camadas do sistema de cobertura que se encontram abaixo dela contra o ressecamento e contra a penetração de animais e raízes.

Em casos onde o projeto do sistema de cobertura seja uma barreira evapotranspirativa, isto é, onde a camada de superfície é composta de vegetação, a camada de proteção deve ser capaz de sustentar o crescimento das espécies para minimizar a erosão (BARROSO, 2008).

De acordo com Koerner e Daniel (1997), geralmente os solos de granulometria média apresentam condições de germinar sementes e promover o desenvolvimento de raízes das plantas. Os de textura fina podem apresentar dificuldades em períodos úmidos para o estabelecimento inicial da vegetação. Solos arenosos podem ser problemáticos devido à baixa retenção de água e à perda de nutrientes por lixiviação. Outros materiais, como cascalhos, também podem ser usados como camada de proteção, em aplicações especiais.

3.1.3 Camada de Drenagem

Formada por materiais granulares que possuem elevada transmissividade e tem o objetivo de reduzir a carga hidráulica, drenar lateralmente a água do solo acima e eliminar a poropressão na interface da barreira subjacente. Essa camada é necessária quando excessivas quantidades de água passam pelas camadas superiores ou quando as forças de percolação são elevadas.

Na interface entre a camada de drenagem e as camadas acima é aconselhável o uso de filtros de solo e geotêxteis para evitar a obstrução do sistema.

3.1.4 Barreira Hidráulica ou de Gás

Tem como função mudar a direção e/ou impedir a percolação de qualquer forma de movimento de líquidos e/ou gases que entrem em contato com esta camada.

Para a construção desta camada geralmente são utilizados os seguintes materiais: geomembranas, *Geosynthetic Clay Liners* (GCL), que consistem em uma fina camada de argila expansiva entre dois geotêxteis ou colada a uma geomembrana, e liners de argila compactada, um solo natural rico em argila de baixa permeabilidade.

3.1.5 Camada de Coleta de Gás

Localizada entre a camada de base e a camada de barreira hidráulica ou de gás, tem como função direcionar os gases produzidos pela decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos para fora do aterro para serem tratados. Os materiais usados na construção da camada coletora de gás deverão ser materiais granulares, geotêxteis, georredes ou similares aos usados na camada de drenagem.

3.1.6 Camada de Base ou Fundação

A camada de fundação é construída diretamente sobre o resíduo, servindo de base para as outras camadas que compõem o sistema de cobertura final, e tem a função de impedir danos químicos e físicos que a massa de resíduos sólidos possa provocar na barreira hidráulica.

A camada de base pode variar de acordo com o tipo de resíduo disposto no aterro e ela pode ser composta pelo solo usado no recobrimento diário após o final do expediente do aterro, por uma cobertura de solo temporária ou por uma camada de solo colocada previamente à construção do sistema de cobertura.

3.2 Tipos de Sistema de Camada de Cobertura

3.2.1 Cobertura Convencional, Monolítica ou Resistiva

O sistema de cobertura usualmente utilizado é a compactação de uma camada de solo argiloso, com baixa permeabilidade, diretamente sobre a massa de resíduos, conforme figura 3.2. Essa camada compactada tem como objetivo evitar a penetração excessiva de precipitação, podendo apresentar alguns problemas, tais como ressecamento e formação de fissuras e trincas quando utilizadas em alguns tipos de climas (PIMENTEL, 2006).

Esta barreira é caracterizada, de acordo com a *US Resources Conservation and Recovery Act (RCRA) Subtitles D and C*, como barreira resistiva, que é constituída por um liner de solo com baixa condutividade hidráulica saturada (geralmente inferior a 10^{-7}

cm/segundo) com o objetivo de reduzir a percolação para a base do aterro, maximizando o *run-off*. (ZORNBERG ET AL., 2003)

Para que a camada de solo argiloso tenha um bom funcionamento como barreira hidráulica, o ideal é que ela tenha uma condutividade hidráulica saturada igual ou inferior a 1×10^{-7} cm/s (SHACKELFORD, 1997).



Figura 3.2: Esquema do sistema convencional de cobertura

3.2.2 Barreira Capilar Simples

O sistema de cobertura por barreira capilar simples consiste de uma camada de solo de granulometria fina colocada sobre uma camada de material de granulometria grossa, como, areia ou cascalho (figura 3.3). Elas devem possuir uma inclinação para que o solo de granulometria grossa drene lateralmente água.

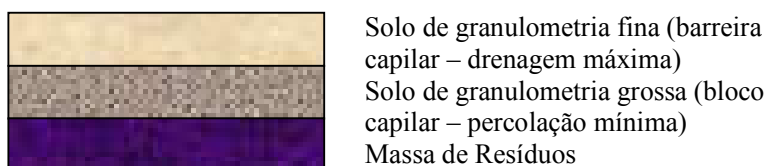


Figura 3.3: Esquema de barreira capilar simples

A barreira capilar deve atuar como barreira hidráulica para controlar a infiltração da água na superfície do aterro, armazenar toda a água infiltrada e reduzir a entrada de oxigênio, que pode reagir quando em contato com alguns resíduos, aumentando a produção de contaminantes (VIEIRA, 2005). O solo que servirá de substrato para a vegetação nativa deve ser compatível com a mesma a ser cultivada em sua superfície (PIMENTEL, 2006).

A capacidade de impedir o fluxo de água ocorre devido à grande mudança nos tamanhos dos poros entre as camadas de materiais mais finos e mais grosseiros, esta diferença de tamanhos leva a intensificação do fenômeno de capilaridade. As barreiras capilares têm a finalidade de aumentar a capacidade de armazenamento de água na camada de material mais

fino, pois elas usam o contraste dos valores de permeabilidade entre solos finos e granulares e melhoram a habilidade do solo fino reter umidade.

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

O funcionamento da barreira capilar só é garantido desde que os materiais que fazem parte da sua composição estejam na condição não saturada. Se ocorrer uma situação de saturação poderá haver a infiltração de água na massa de resíduos.

3.2.3 Barreira Capilar Dupla

Para evitar a perda de água por evaporação na camada superior argilosa da barreira capilar simples, pode ser utilizada uma barreira capilar dupla (figura 3.4). Esse tipo de barreira é muito usado em mineração a fim de evitar a drenagem ácida.

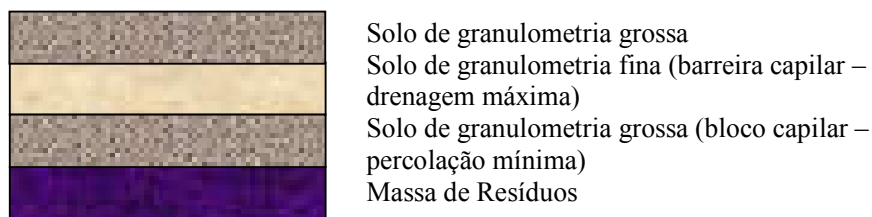


Figura 3.4: Esquema de barreira capilar dupla

Nesse tipo de barreira, a camada de material granular superior exerce duas funções importantes: na época de seca ela impede que a água armazenada na camada de material fino migre por capilaridade para a camada de material granular e na época de chuva, essa camada funciona como um dreno, conduzindo lateralmente a água que infiltra na cobertura, prevenindo a saturação da camada de material fino. Isso é bastante importante para a maioria dos climas das regiões brasileiras, que apresentam períodos de seca bem definidos no inverno e elevadas precipitações no verão (BORMA *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2003).

O conceito de barreira capilar para aterros ainda está distante de uma vasta aceitação, diversos projetos na Europa e na América do Norte têm auxiliado na divulgação do seu uso.

3.2.4 Coberturas Evapotranspirativas

O estudo para camadas evapotranspirativas é recente, o primeiro sistema de cobertura evapotranspirativa é de 1997, e foi implantado na Califórnia (Estados Unidos) para disposição final de resíduo perigoso. Em 2003, foi identificado um total de 53 coberturas evapotranspirativas em 48 diferentes locais dos Estados Unidos, sendo algumas em fase de construção, conclusão ou teste (ZORNBERG ET AL., 2003).

Camadas evapotranspirativas são sistemas alternativos vegetados com plantas nativas capazes de resistir e sobreviver às condições locais. O controle para a percolação de lixiviado para a base é alcançado, pois a camada evapotranspirativa atua como uma esponja ou reservatório que armazena umidade durante a precipitação e a devolve para a atmosfera através da evapotranspiração ou drenagem lateral. (ZORNBERG ET AL., 2003).

Projetos de sistemas de cobertura evapotranspirativa são baseados no balanço hídrico de um aterro, o qual inclui capacidade de armazenamento de água do solo, precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração. Desta maneira, siltes e argilas de baixa plasticidade são os solos mais usados em coberturas evapotranspirativas, porque são capazes de armazenar água ao mesmo tempo em que minimizam a ocorrência de potenciais rachaduras e trincas devido ao ressecamento do solo (ZORNBERG ET AL., 2003). Neste sentido, avaliar as condições de umidade e de sucção da camada de cobertura é de grande relevância.

As camadas evapotranspirativas (figura 3.5) podem ser divididas em: camadas monolíticas e barreiras capilares.

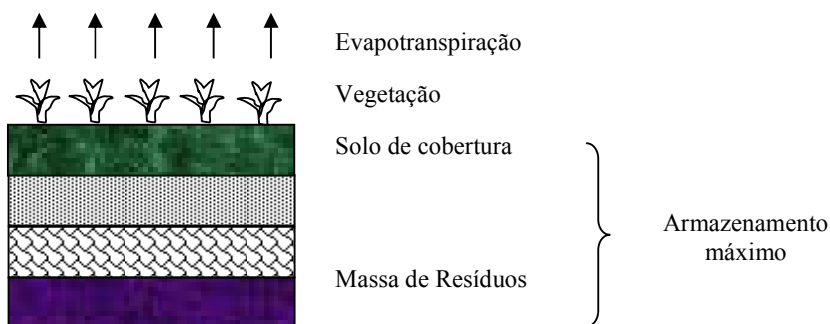


Figura 3.5: Esquema de camada de cobertura evapotranspirativa

- Camadas Monolíticas Evapotranspirativas

Este tipo de camada é caracterizado quando um solo é colocado sobre a massa de resíduos e atua como um substrato para a vegetação e como barreira hidráulica, conforme a figura 3.6. As maiores variações na umidade, devido ao umedecimento e ressecamento, ocorrerão no topo da camada. As camadas monolíticas requerem seleção de espessura de camada e armazenamento de umidade necessária para manter a percolação abaixo do valor de projeto dado às condições necessárias ao local.

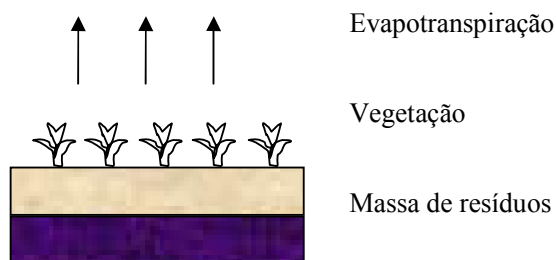


Figura 3.6: Esquema da camada de cobertura monolítica

- Barreiras Capilares Evapotranspirativas

As barreiras capilares evapotranspirativas consistem num sistema composto por solo fino sobre solo granular, de forma similar a barreira apresentada no item 3.2.2 com um diferencial: o solo fino atua como substrato para a vegetação, conforme figura 3.7.

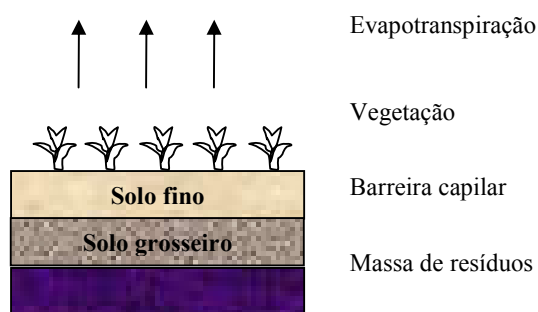


Figura 3.7: Esquema da barreira capilar evapotranspirativa

A figura 3.8 mostra que, quando um sistema argila-areia está numa sucção inicial alta (1000 kPa), a argila tem uma saturação de 0,2 enquanto a areia está na umidade residual (ZORNBERG e MCCARTNEY, 2006).

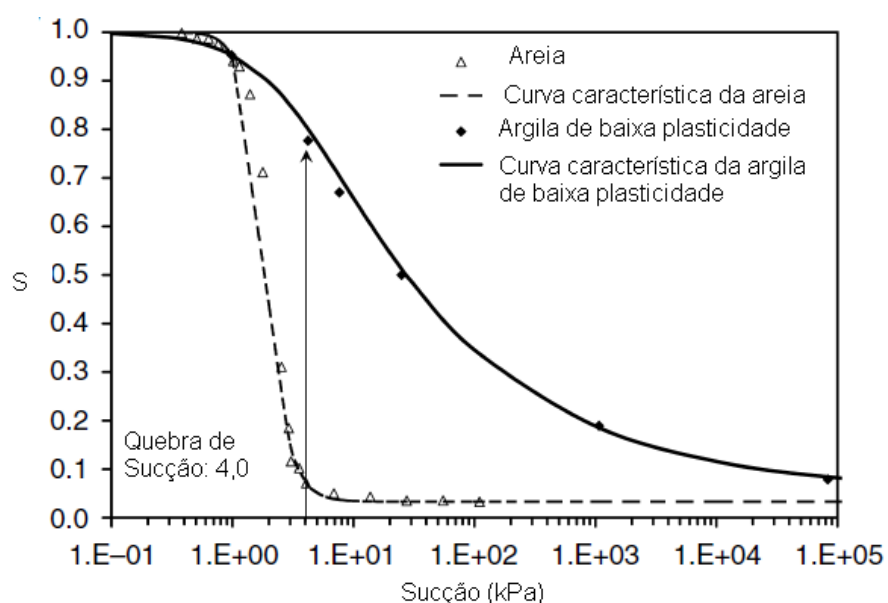


Figura 3.8: Efeito de quebra de capilaridade (fonte: ZORNBERG e MCCARTNEY, 2006)

Já a figura 3.9 indica que em sucção alta, a argila tem condutividade hidráulica de 1×10^{-13} m/s, enquanto a areia tem grande tendência ao fluxo, por serem solos grosseiros. Conseqüentemente, se a umidade infiltra para o material fino depois da precipitação e atinge a interface com o material granular, ela só poderá progredir no material granular em uma velocidade muito lenta. Conseqüentemente, a água é acumulada na interface até que a sucção da interface atinja um valor no qual a permeabilidade do solo granular não é mais inferior ao valor da condutividade hidráulica do material fino, no caso da figura 3.9 em torno de 4 kPa.

Esta sucção é chamada de valor de “quebra” de sucção (*breakthrough suction*) e que corresponde ao grau de saturação de 0,8.

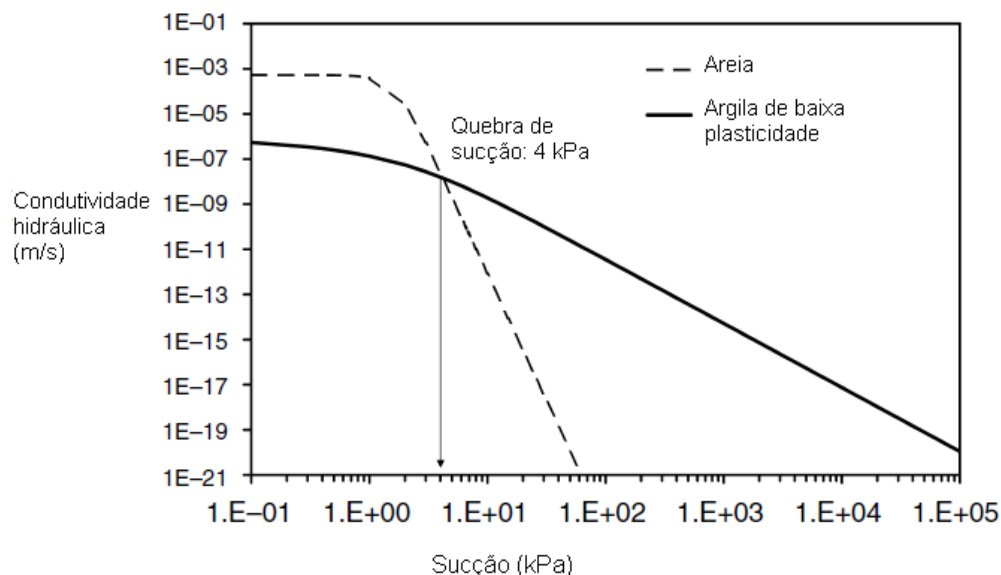


Figura 3.9: Efeito de quebra de capilaridade (fonte: ZORNBERG e MCCARTNEY, 2006)

Um importante benefício do uso da barreira capilar evapotranspirativa é que mais água pode ser armazenada em uma barreira capilar do que numa camada monolítica evapotranspirativa de espessura equivalente. De forma alternativa, uma camada menos espessa de material fino pode ser usada como uma camada da barreira capilar para obter a mesma capacidade de armazenamento.

3.3 Legislação e Normas sobre Camada de Cobertura

3.3.1 Norma Brasileira

Para aterro industrial classe I, a camada de impermeabilização superior é obrigatória, mas não há regulamentação sobre as características de projeto, como espessura, permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica (IBAM, 2001). Já para aterro industrial classe II, a camada de impermeabilização deve ser de geomembrana (com espessura de 0,8 a 1,2 mm) ou de argila de boa qualidade ($k = 10^{-6}$ cm/s e espessura maior que 50 cm).

O uso de vegetação sobre a camada de cobertura final é recomendado, pois a presença da mesma faz aumentar a evapotranspiração, diminuir a erosão e contribuir do ponto de vista estético, para o projeto de encerramento do aterro. A camada de cobertura deve ser projetada de forma que atenda a utilização futura do aterro, após seu encerramento e vida ativa.

3.3.2 Norma Americana

De acordo com o *Subtitle D da U.S. EPA (1994)*, o sistema de cobertura final deve ser projetado e construído para ter uma permeabilidade inferior a 10^{-5} cm/s, minimizar a infiltração utilizando uma camada de solo compactado que tenha no mínimo 45,72 cm de espessura e minimizar a erosão utilizando uma camada natural que possua no mínimo 15,24 cm de espessura e seja capaz de sustentar o crescimento das plantas. Deve ser executado um plano de encerramento que em 30 anos seja capaz de manter a integridade e a eficiência do sistema de cobertura.

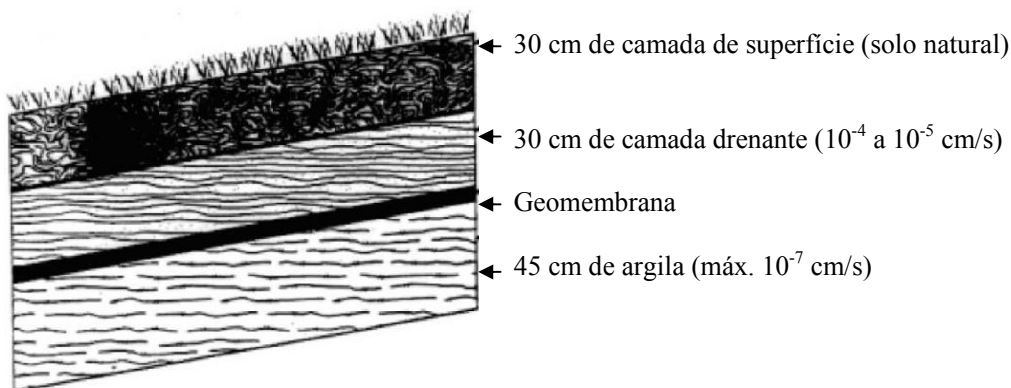
Na Tabela 3.1, são apresentados os tipos de camadas e os materiais típicos que podem existir na cobertura final de um aterro, semelhante ao sistema adotado no Brasil. A espessura recomendada de cada camada é função de algumas variáveis, como o sistema de drenagem, potencial de erosão, encostas, tipo de vegetação de cobertura, tipo de solo e clima (HUSE, 2007). Na Tabela 3.2, são apresentadas a espessura máxima e a condutividade hidráulica recomendada para cada tipo de cobertura, enquanto as Figuras 3.10 a 3.13 mostram os esquemas dos diferentes tipos de camada.

Tabela 3.1: Camadas do sistema de cobertura final (fonte: *U.S. EPA, 2003*)

| Camada | Tipo de Camada | Tipo de material |
|---------------|---------------------------------|---|
| 1 | Camada superficial | Solo, camada geosintética de controle de erosão, blocos rochosos |
| 2 | Camada de proteção | Solo, material residual recuperado ou reciclado, blocos rochosos |
| 3 | Camada de drenagem | Areia e/ou cascalho, georrede ou geocompósitos, pneu picado ou triturado |
| 4 | Camada impermeável | Argila compactada, geomembrana, camada geosintética |
| 5 | Fundação/Camada coletora de gás | Areia e/ou cascalho, solo, georrede ou geotêxtil, material residual recuperado ou reciclado |

Tabela 3.2: Sistema de cobertura final mínimo recomendado (fonte: *U.S. EPA*, 2003)

| Tipo de cobertura | Sistema de camadas recomendado (do topo para baixo) | Espessura (cm) | Condutividade hidráulica (m/s) |
|---|---|----------------|---|
| Camada dupla (<i>Double liner</i>) | Camada de superfície | 30 | Sem restrição |
| | Camada drenante | 30 | 1×10^{-4} a 1×10^{-5} |
| | Geomembrana | 0,07 (PVC) | - |
| | | 0,015 (HDPE) | - |
| | Argila | 45 | $\geq 1 \times 10^{-7}$ |
| Camada composta (<i>Composite liner</i>) | Camada de superfície | 30 | Não é aplicável |
| | Camada drenante | 30 | 1×10^{-4} a 1×10^{-5} |
| | Geomembrana | 0,07 (PVC) | - |
| | | 0,015 (HDPE) | - |
| | Argila | 45 | $\geq 1 \times 10^{-7}$ |
| Camada simples de argila (<i>Single clay liner</i>) | Camada de superfície | 30 | Não é aplicável |
| | Camada drenante | 30 | 1×10^{-4} a 1×10^{-5} |
| | Argila | 45 | $\geq 1 \times 10^{-7}$ |
| Camada simples de argila (<i>single clay liner</i>) em semi-árido | Blocos rochosos | 5-10 | Não é aplicável |
| | Camada drenante | 30 | 1×10^{-4} a 1×10^{-5} |
| | Argila | 45 | $\geq 1 \times 10^{-7}$ |
| Camada simples sintética (<i>Single synthetic liner</i>) | Camada de superfície | 30 | Não é aplicável |
| | Camada drenante | 30 | 1×10^{-4} a 1×10^{-5} |
| | Geomembrana | 0,07 (PVC) | - |
| | | 0,015 (HDPE) | - |
| | Argila | 45 | $\geq 1 \times 10^{-7}$ |
| Cobertura natural | Solo | 60 | Não mais permeável que o solo que serve de base |

Figura 3.10: Sistema de cobertura final para camada dupla ou camada composta (fonte: *U.S. EPA*, 2003)

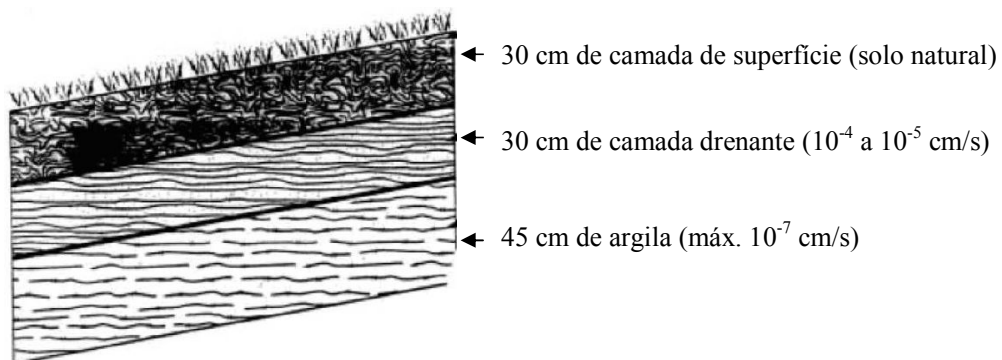


Figura 3.11: Sistema de cobertura final para camadas simples de argila (fonte: *U.S. EPA*, 2003)

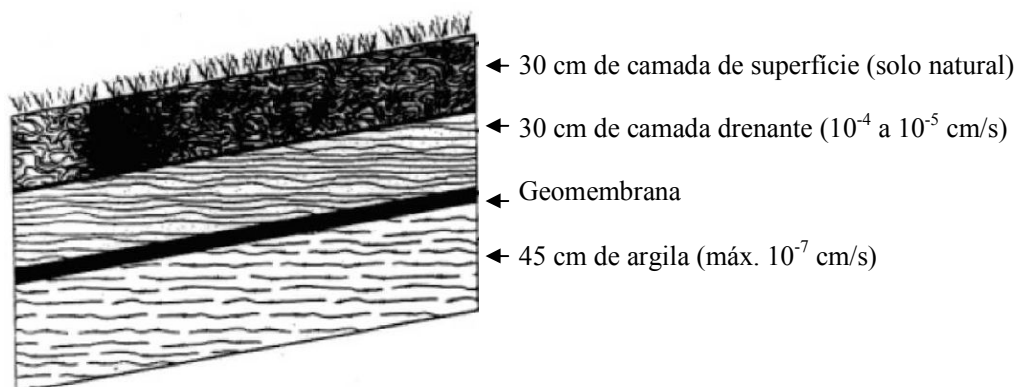


Figura 3.12: Sistema de cobertura final para camadas simples sintéticas (fonte: *U.S. EPA*, 2003)

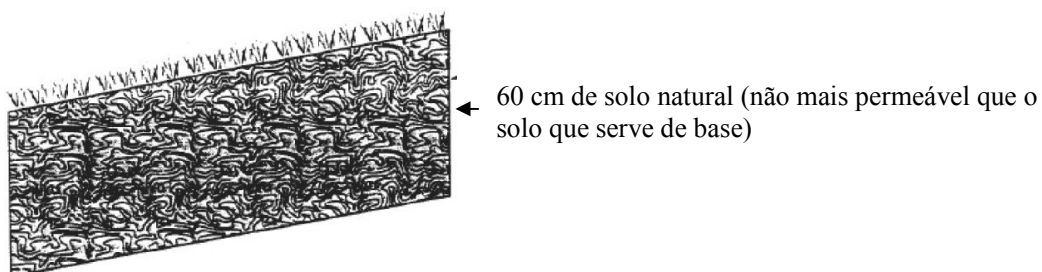


Figura 3.13: Sistema de cobertura final para cobertura natural (fonte: *U.S. EPA*, 2003)

3.4 Balanço Hídrico

Uma forma tradicional de se analisar a presença de água no solo em aterros sanitários é através do balanço hídrico, que é a soma das parcelas de água que entram no aterro e a subtração das parcelas que deixam o aterro em um dado período de tempo.

O balanço hídrico, tanto para o estudo do solo quanto da água, é baseado na relação existente entre a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial e o armazenamento de água no solo.

O processo de evapotranspiração é praticamente o transporte de água de volta para a atmosfera, sendo o inverso do processo de precipitação. O escoamento superficial representa o fluxo superficial da água na área de interesse. A capacidade de armazenamento representa a quantidade de água que pode ficar retida no solo e, no caso de aterro sanitário, nos resíduos.

A principal fonte de entrada de água no sistema ocorre através da percolação de água pela camada de cobertura. Por essa razão, é fundamental o conhecimento do regime de chuvas na área do aterro.

O escoamento superficial ocorre a partir da saturação do solo, onde o excesso de água não infiltrado começa a escoar pela superfície. A água infiltrada no solo sofre a ação da capilaridade e da gravidade, e atinge a massa de resíduos, umedecendo-a de cima para baixo. Mesmo após o encerramento da chuva, ainda ocorre a movimentação de água no interior da célula (IPT, 2000).

Como a forma predominante de entrada de água no aterro é através da precipitação, é essencial o projeto e a construção de uma barreira efetiva, de vida útil longa, na superfície desses empreendimentos.

4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS SOLOS BRASILEIROS

Com o objetivo de investigar a metodologia utilizada para a determinação da sucção, assim como os resultados obtidos, serão apresentados, neste capítulo, alguns trabalhos da literatura que contemplam curvas características de solos brasileiros. São estudos sobre casos de processos erosivos, taludes e, principalmente, camadas de cobertura de aterros sanitários, todos os casos envolvem solos tropicais não saturados.

Nos itens 4.1 a 4.3 são apresentados estudos sobre camadas de cobertura final de aterros sanitários, a metodologia adotada e as curvas características obtidas.

No item 4.4 são apresentados estudos sobre processos erosivos e taludes, envolvendo a metodologia adotada para a determinação da sucção dos solos e da curva característica.

4.1 Estudo de Caso da CTR Nova Iguaçu, RJ (HUSE, 2007)

HUSE (2007) apresentou curvas características de amostras de solo retiradas da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Nova Iguaçu, localizado no município de Nova Iguaçu, RJ, que são usadas como camada de cobertura de aterros sanitários.

Como aditivo para diminuir a condutividade hidráulica do solo da CTR Nova Iguaçu, utilizou-se bentonita sódica (aditivada), produzida pela Bentonit União Nordeste S.A.

Foram estudadas amostras de solo do CTR Nova Iguaçu, amostra de bentonita sódica aditivada (Permagel) e amostra de solo do CTR misturado com 5% com Permagel. Foram realizados ensaios com amostras de tamanho Proctor (diâmetro de 10cm e altura de 13cm) e CBR (diâmetro de 15cm e altura de 17,5cm). Na amostra de tamanho Proctor, o corpo de prova foi compactado seguindo-se o procedimento de compactação de Proctor Normal. Já para o tamanho CBR, foi compactado com energia normal, ou seja, em cinco camadas com doze golpes por camada e sem o disco espaçador, sendo este o corpo de prova de maior tamanho.

4.1.1 Ensaios de Caracterização do Solo, Limites de Atterberg, Densidade Real dos Grãos, Compactação, Permeabilidade Saturada e Curva Característica

- Ensaio de Granulometria, Limites de Atterberg e Densidade Real dos Grãos

O resultado da caracterização das amostras do solo do CTR Nova Iguaçu, bentonita sódica aditivada (Permagel) e amostra de solo do CTR misturado com 5% com Permagel está apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição granulométrica dos solos estudados por Huse (2007)

| Amostra | Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) | | | | | |
|--|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| | Argila | Silte | Areia | | | Pedregulho |
| | | | Fina | Média | Grossa | |
| Solo do CTR Nova Iguaçu | 13,8 | 31,8 | 16,8 | 19,3 | 15,4 | 2,9 |
| Bentonita sódica aditivada (Permagel) | 86,6 | 13 | 0,4 | 0 | 0 | 0 |
| Amostra de solo misturado com 5% de Permagel | 16,1 | 29,8 | 16,8 | 19,9 | 14,7 | 2,7 |

Os limites de Atterberg encontrados para os solos do CTR Nova Iguaçu, bentonita sódica aditivada (Permagel) e amostra de solo misturado com 5% com Permagel está apresentado na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Limites de Atterberg obtidos por Huse (2007)

| Limites | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|--|--------|--------|--------|
| Solo do CTR Nova Iguaçu | 44,50 | 21,12 | 23,38 |
| Bentonita sódica aditivada (Permagel) | 505,60 | 46,30 | 459,30 |
| Amostra de solo misturado com 5% de Permagel | 75,50 | 28,26 | 47,24 |

A amostra de bentonita apresenta grande trabalhabilidade, devido ao elevado valor de umidade correspondente ao limite de liquidez. Quanto a amostra de solo misturado com 5% de Permagel, pode-se notar um ganho em relação as características geotécnicas, com aumento dos índices de plasticidade, melhorando as condições de trabalhabilidade.

Os resultados da densidade real dos grãos encontrados para o solo do CTR Nova Iguaçu foi de 2,67 e para a bentonita sódica aditivada foi de 2,78.

- Curva de Compactação Proctor Normal

Os valores encontrados para a massa específica seca máxima e para a umidade ótima dos solos do CTR puro e para a amostra de solo do CTR misturado com 5% com Permagel estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de compactação (HUSE, 2007)

| Amostra | Umidade ótima (%) | Peso específico aparente seco (g/cm ³) |
|--|-------------------|--|
| Solo do CTR Nova Iguaçu | 24,5 | 1,52 |
| Amostra de solo misturado com 5% de Permagel | 23,4 | 1,53 |

- Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica foi determinada através de ensaio realizado a carga variável. Para o solo do CTR Nova Iguaçu, a condutividade é da ordem de 10^{-6} cm/s, sendo um valor baixo, mas não suficiente para que esse solo possa ser utilizado como camada de cobertura de aterro, por este motivo foi sugerida a adição de bentonita (HUSE, 2007). A bentonita possui uma condutividade hidráulica da ordem de 1×10^{-12} cm/s (HUSE, 2007) e a mistura de solo do CTR com 5% de Permagel apresentou a condutividade hidráulica na ordem de 10^{-7} cm/s, valor suficiente para ser utilizado como camada de cobertura de aterro de resíduos.

- Curvas Características

As curvas características foram determinadas através do uso de tensiômetros acoplados em um transdutor de pressão. O tensiômetro usado no estudo de Huse (2007) foi desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ, permitindo a medição de sucção de pelo menos até 1500 kPa. Esse tensiômetro foi desenvolvido por Mahler et al. (2004). O tensiômetro usado no trabalho de Huse consistiu de uma pedra porosa colada a um cabeçote acrílico, acoplada a um transdutor de pressão.

Os gráficos das curvas características foram determinados para as amostras tamanho tipo Proctor (figura 4.1) e tipo CBR (figura 4.2). Os solos estudados foram: solo do CTR, chamado de SA Paulista; e solo do CTR com adição de 5% e 10% de bentonita, nomeado como SA Paulista 5% e SA Paulista 10%, respectivamente.

Observou-se que para o solo tamanho tipo Proctor, com o mesmo valor de umidade, a sucção do solo SA Paulista 10% foi inferior a sucção apresentada para o solo SA Paulista 5%. Segundo Huse (2007) não existiu justificativa clara para tal comportamento, podendo ser consequência de algum fator externo, como, por exemplo, influência da umidade de compactação. Os dias de realização dos ensaios foram chuvosos e com temperaturas baixas, havendo uma baixa evaporação durante esse período (HUSE, 2007).

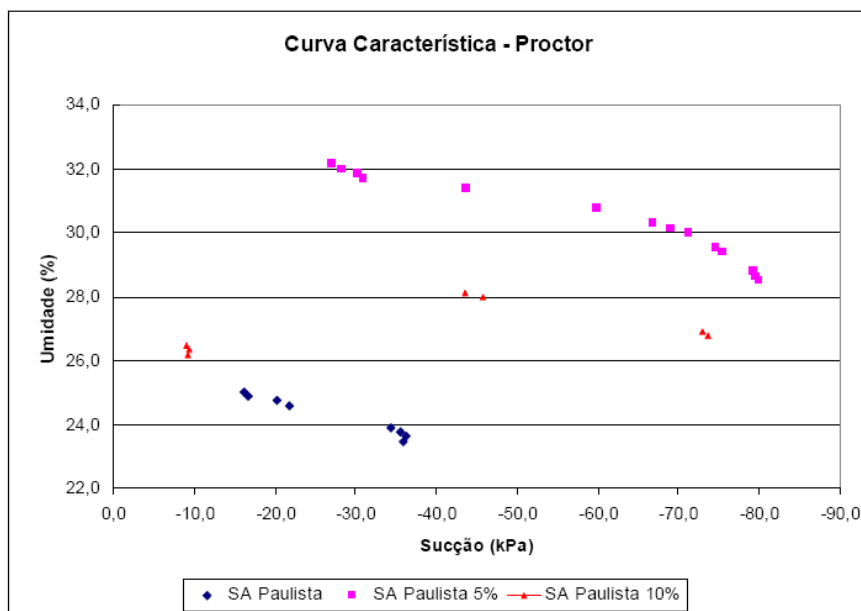


Figura 4.1: Comparação da curva característica para os corpos de prova do tamanho Proctor, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo (fonte: HUSE, 2007).

Na figura 4.2, a curva característica foi elaborada para os solos com o corpo de prova do tamanho do tipo CBR. Observou-se que, para um mesmo valor de umidade, a sucção cresce com o aumento da adição de bentonita, pois o número de finos presentes no solo é aumentado.

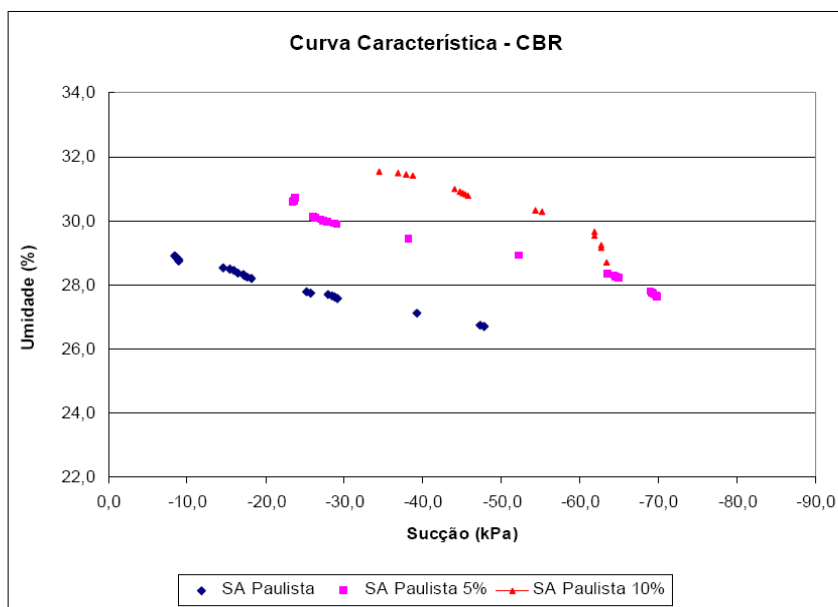


Figura 4.2: Comparação da curva característica para os corpos de prova do tamanho CBR, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo (fonte: HUSE, 2007).

4.2 Estudo de Caso de Rio das Ostras e Niterói (BARROSO, 2008)

Barroso (2008) estudou as camadas de cobertura do Aterro de Morro do Céu localizado em Niterói e do Aterro Sanitário de Rio das Ostras, ambos localizados no estado do Rio de Janeiro. Pires (2007) caracterizou o solo usado como camada de cobertura do Aterro de Sanitário de Rio das Ostras.

4.2.1 Caracterização dos Solos, Limites de Atterberg, Ensaio de Compactação, Permeabilidade e Curva Característica.

- Ensaio de Granulometria, Limites de Atterberg e Densidade Real dos Grãos

Barroso (2008) estudou duas amostras de solo do Aterro do Morro do Céu, que apresentaram as curvas granulométricas conforme as figuras 4.3 e 4.4.

A amostra nº 1 retirada do Aterro de Morro do Céu (Niterói) pode ser caracterizada como uma areia argilo-siltosa e a amostra nº 2 como uma areia silto-argilosa (BARROSO, 2008). O solo do Aterro de Rio das Ostras pode ser descrito como uma argila arenosa com pedregulhos de coloração amarela clara (PIRES, 2007).

Os limites de Atterberg encontrados para os solos da camada de cobertura do aterro sanitário de Morro do Céu e de Rio das Ostras estão apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Limites de Atterberg

| Amostra | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| Morro do Céu – amostra nº1 | NP | NP | NP |
| Morro do Céu – amostra nº2 | 28,13 | 20,65 | 7,35 |
| Rio das Ostras | 56,57 | 39,08 | 17,5 |

Os resultados encontrados para densidade real dos grãos para a amostra nº 1 e para a amostra nº 2 do Aterro Morro do Céu foram de 2,631 e 2,673 respectivamente e para Rio das Ostras o valor foi de 2,584 (BARROSO, 2008).

- Curva de Compactação Proctor Normal

Os valores encontrados para a massa específica seca máxima e para a umidade ótima dos solos do aterro sanitário de Morro do Céu e de Rio das Ostras estão apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resultados dos ensaios de compactação

| Amostra | Umidade ótima (%) | Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³) |
|----------------------------|-------------------|--|
| Morro do Céu – amostra nº1 | 11,5 | 1,879 |
| Morro do Céu – amostra nº2 | 12,4 | 1,893 |
| Rio das Ostras | 22,7 | 1,585 |

- Permeabilidade Saturada

A permeabilidade saturada foi obtida através do ensaio de permeabilidade de carga variável. As amostras foram compactadas e moldadas na umidade ótima. O valor encontrado para o Morro do Céu foi de $k = 2,85 \times 10^{-7}$ cm/s e para Rio das Ostras foi de $1,87 \times 10^{-7}$ cm/s (BARROSO, 2008).

- Curvas Características

O ensaio utilizando o método do papel filtro foi realizado conforme o procedimento padrão descrito na Norma ASTM D 5298-03.

O solo da amostra nº 1 do Aterro do Morro do Céu não pôde ser ensaiado, porque não foi possível a moldagem do corpo de prova, pois esta amostra era composta de muito pedregulho. Para a amostra nº 2 de Morro do Céu e para Rio das Ostras foram moldados três e cinco corpos de prova, respectivamente, com o solo compactado na umidade ótima.

Barroso (2008) utilizou o método de secagem, onde inicialmente as amostras são levadas a saturação e a partir daí sofrem o ressecamento.

Na figura 4.6, estão apresentadas as três curvas características de Morro do Céu. Verifica-se uma tendência de comportamento similar para as três curvas. No entanto, observa-se que o valor de sucção para a umidade de 12,5% para as três amostras verifica-se uma variação de 4000 kPa a cerca de 12000 kPa, que podem ser considerados valores altos de sucção.

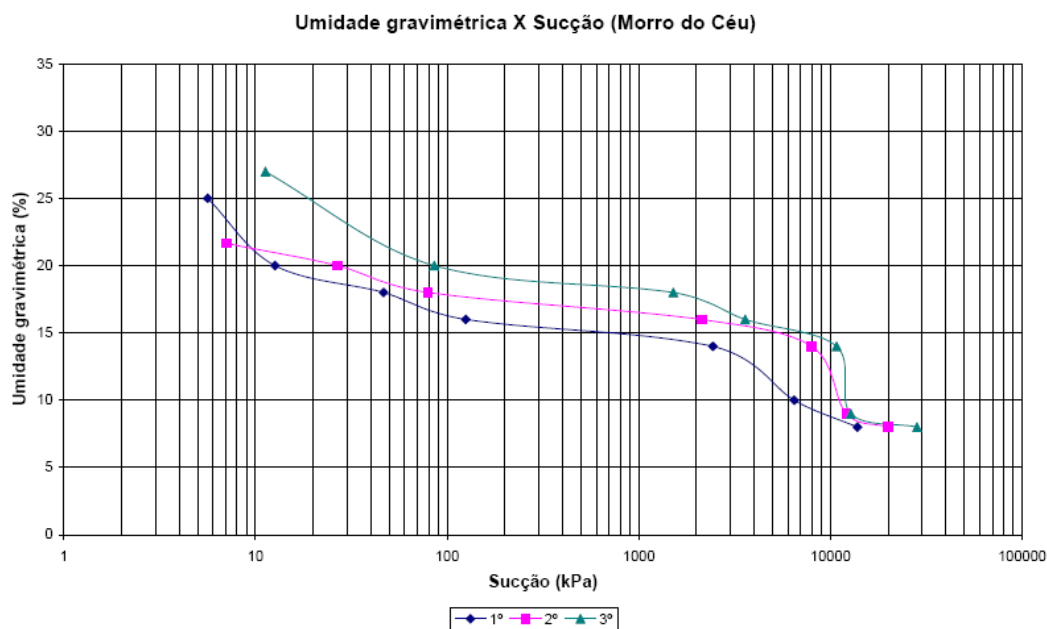


Figura 4.6: Curva característica do Morro do Céu (fonte: BARROSO, 2008)

O solo de Rio das Ostras também mostrou a mesma tendência de comportamento para as cinco curvas, Figura 4.7, com elevados valores de sucção.

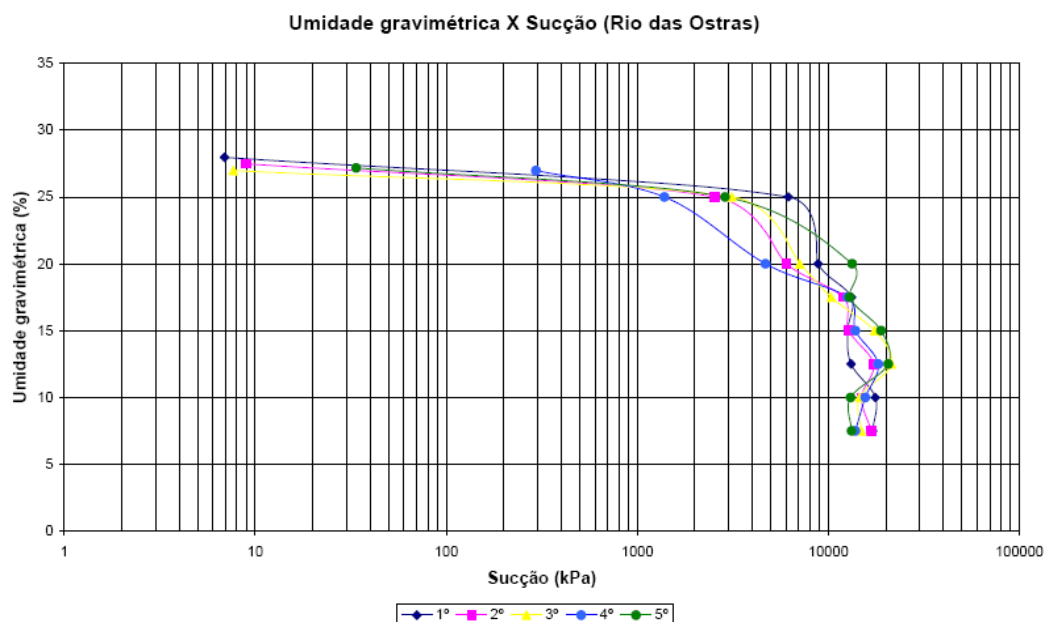


Figura 4.7: Curva característica de Rio das Ostras (fonte: BARROSO, 2008)

4.3 Estudo de Caso do Aterro Sanitário Experimental na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da BR 040 em Belo Horizonte, MG (SIMOES ET AL, 2008)

O trabalho de Simões et al. (2008) apresentou os resultados obtidos no monitoramento de duas configurações de camadas de cobertura final, camada evapotranspirativa e barreira capilar (utilizando solo argiloso e resíduos de construção civil beneficiados), implantadas no aterro sanitário experimental na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da BR 040 em Belo Horizonte, MG, com o objetivo de comparar o desempenho desses sistemas.

O aterro possui 3,8 m de altura e 71,50 m x 73,60 m de dimensões externas, enquanto que as internas são 51,80 m x 52,80 m (figura 4.8). Na metade da área superficial do aterro sanitário experimental foi executada a Camada 1 (perfil 1), composta de uma camada de material argiloso, com espessura de 0,60 m. Na outra metade do aterro, foi executada a Camada 2 (perfil 2), composta de uma camada de resíduos de construção civil beneficiados, com espessura de 0,30 m, que foi executado diretamente sobre os resíduos, subjacente a uma camada de 0,30 m do mesmo material argiloso empregado na execução da Camada 1.

Sobre todo o aterro foi colocada uma camada com espessura de 0,05 m de resíduos da construção civil beneficiados para proporcionar uma proteção mecânica para o solo argiloso empregado na Camada 1, principalmente.



Figura 4.8: Vista do aterro sanitário experimental (fonte: SIMÕES ET AL, 2008)

4.3.1 Resultados de Massa Específica dos Grãos, Limites de Consistência, Granulometria dos Solos, Compactação, Permeabilidade e Curva Característica

Os resultados da caracterização geotécnica do solo argiloso utilizado foram:

- Massa específica dos grãos: 2,81 g/cm³
- Limite de liquidez: 45%
- Limite de Plasticidade: 30%
- Granulometria: Pedregulho: 6%; Areia: 19%; Silte: 30%; Argila: 45%
- Compactação: wot: 22% e $\rho_{dm\acute{a}x}$: 1,62 g/cm³
- Permeabilidade em campo (Guelph): $1,8 \times 10^{-7}$ m/s

Os resultados da caracterização completa dos resíduos de construção civil beneficiados podem ser encontrados em Catapreta (2007). A Figura 4.9 apresenta as curvas granulométricas típicas dos resíduos utilizados, que foram obtidos nas Usinas de Reciclagem de Entulho do Município de Belo Horizonte.

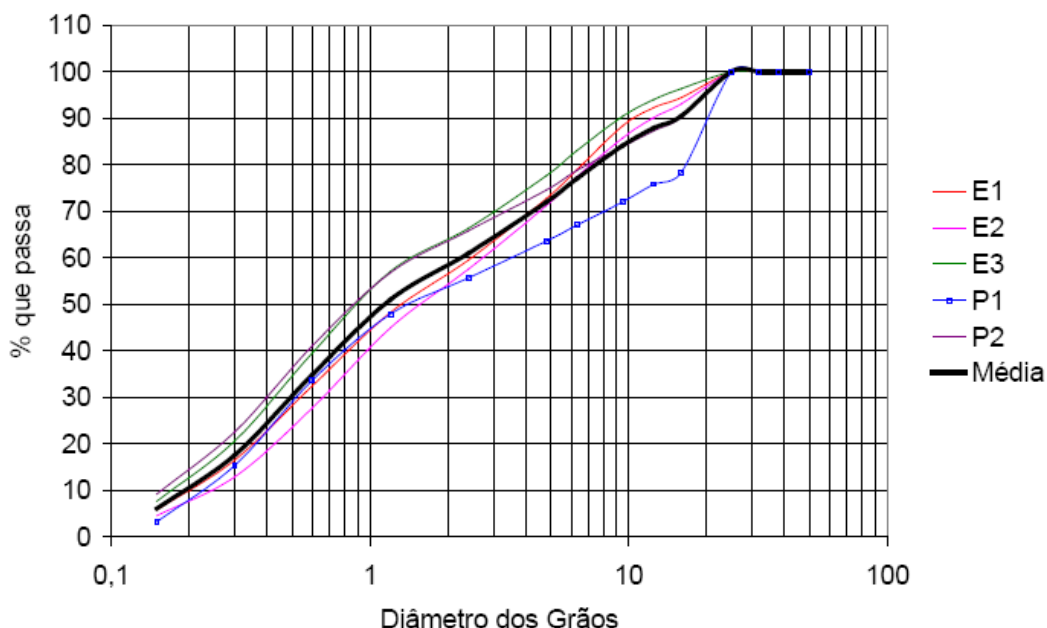


Figura 4.9: Curvas granulométricas dos resíduos de construção civil beneficiados (fonte: SIMÕES ET AL, 2008)

- Curvas Características

A curva característica foi obtida através da instalação de tensiômetros e termopares. Foram instalados 18 termopares e 18 tensiômetros nas profundidades de 10, 25 e 50 centímetros em seis pontos da camada de cobertura final do Aterro Sanitário Experimental, sendo que, cada grupo de três pontos, monitora o comportamento de um sistema de cobertura. O período de monitoramento foi de 16 meses.

Foram também confeccionados em laboratório dois lisímetros onde foram realizados controles de temperatura, sucção e obtenção do balanço hídrico por pesagem. O objetivo principal foi possibilitar a determinação, de forma indireta, da curva característica de sucção dos solos utilizados. Com os dados obtidos em campo e laboratório foram realizadas simulações numéricas dos fluxos de umidade nas camadas de cobertura, que auxiliaram na quantificação do balanço hídrico e a avaliação da eficiência das duas configurações de camadas estudadas (SIMÕES ET AL, 2008).

As curvas características obtidas para os modelos propostos por Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) com uso do programa computacional unidimensional WinUNSAT-H, desenvolvido pela Universidade de Wisconsin-Madison, EUA, estão apresentadas na figura 4.10.

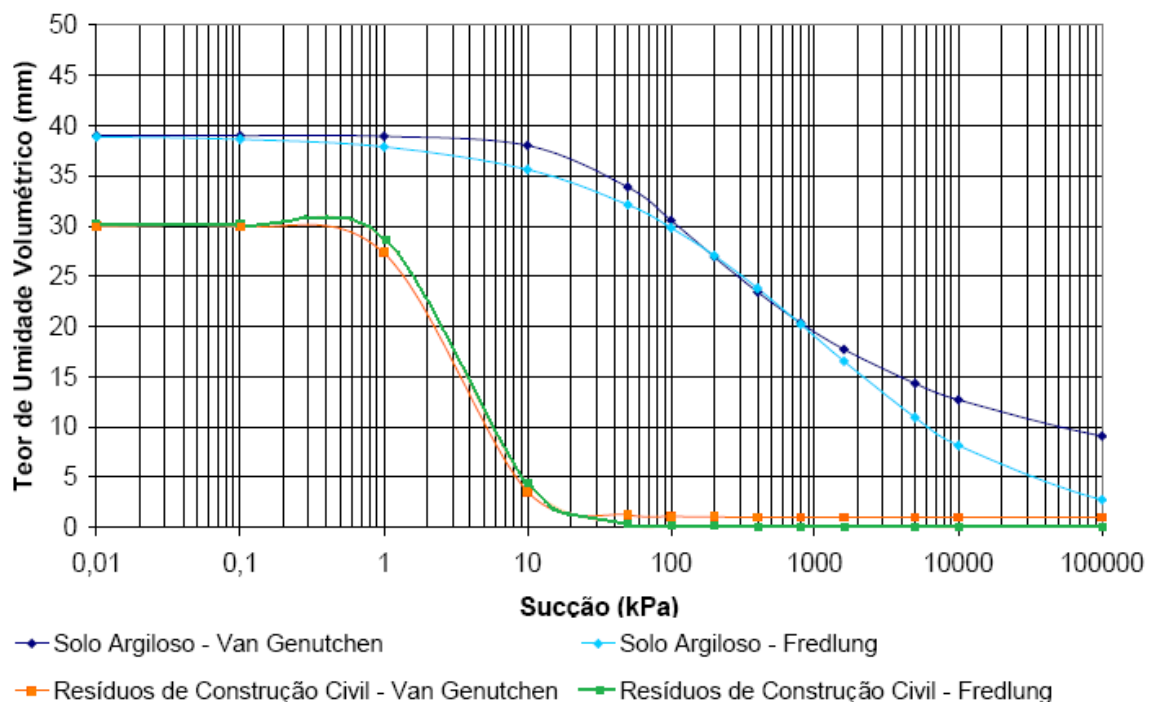


Figura 4.10: Curvas características obtidas pela otimização dos resultados dos lisímetros (fonte: SIMÕES ET AL, 2008)

Através do uso do programa WinUNSAT-H pode-se observar, de forma qualitativa, que camadas do tipo barreira capilar tendem a ser mais eficiente, quando apresentam a mesma espessura de solo fino que as evapotranspirativas.

O desempenho dos termopares instalados foi inadequado, suas leituras apresentaram valores errôneos e incoerentes. Sendo assim, seus resultados não foram considerados.

4.4 Considerações sobre trabalhos que envolvem estudos com processos erosivos e taludes

Mesmo com situações diferenciadas com amostras deformadas coletadas em campo ou amostras compactadas em laboratório de solos tropicais, devem ser realizadas algumas observações sobre as metodologias, curva característica e valores de sucção encontrados nos trabalhos que envolvem estudos sobre processos erosivos e taludes de solos tropicais brasileiros.

A seguir são apresentadas algumas considerações sobre estes estudos:

- Futai (2002) utilizou a Membrana de Pressão e o Método do Papel Filtro para determinação da curva característica de solos naturais de Minas Gerais. Encontrou resultados semelhantes pelos dois métodos e o Método do Papel Filtro apresentou valores de sucção superiores a 10.000 kPa.
- Diene (2004) montou e monitorou lisímetros com os solos de Bom Jardim e Itaguaí, RJ, para testar tensiômetros de medição de sucção elevada. Determinou as curvas características por estes tensiômetros e pelo Método do Papel Filtro. Os resultados encontrados foram semelhantes e alcançaram valores de até 1.500 kPa.
- Lopes (2006) estudou o solo de uma encosta de Belo Horizonte, MG, e determinou a curva característica para três amostras desse solo através do Método do Papel Filtro. Todas as curvas características apresentaram valores de sucção acima de 10.000 kPa e duas amostras apresentaram a curva no formato bimodal com dois valores de entrada de ar.
- Campos et al (2008) estudaram duas amostras de bentonita do grupo das esmectitas provenientes da Paraíba e Minas Gerais e um solo saprolítico do Distrito Federal. As curvas características foram determinadas pelo Método do Papel Filtro e alcançaram valores superiores a 10.000 kPa.
- Meira (2008) estudou o solo de uma encosta localizada em Recife, PE. Determinou as curvas características através do Método do Papel Filtro, Câmara de Pressão de Richards e Funil de Haines. A curva determinada pelo método do Papel Filtro alcançou valores acima de 10.000 kPa.
- Neto e Vilar (2008) avaliaram o comportamento da sucção de um solo areno-argiloso compactado do estado de São Paulo. As curvas características foram determinadas pelo Funil de Placa Porosa, Método do Papel Filtro e tensiômetro de alta capacidade. A curva determinada pelo método do Papel Filtro iniciou a partir de 10 kPa e alcançou valores acima de 10.000 kPa.

Dentre os estudos apresentados, o Método do Papel Filtro parece ser confiável e preciso e alcança valores de sucção relativamente elevados.

5 ESTUDO EXPERIMENTAL DA CAMADA DE COBERTURA DO ATERRO MORRO DO CÉU

O Aterro do Morro do Céu, localizado no bairro do Caramujo em Niterói funciona intermitentemente e possui uma área de 200.000 m². Atende uma população de 474.002 habitantes segundo IBGE (2008) e recebe cerca de 800 toneladas de resíduos por dia.

Neste trabalho foi estudado o solo que era usado anteriormente como camada de cobertura do Aterro Morro do Céu e foi nomeado como jazida antiga. Este solo ainda pode ser encontrado no aterro, porém encontra-se em desuso. É um solo de coloração amarelada e foi o mesmo solo estudado por Barroso (2008).

De acordo com os resultados obtidos por Barroso (2008), este solo se mostrou arenoso (com até 58% de areia), uma amostra foi considerada como não plástica e outra apresentou um índice de plasticidade (IP) de 7%. Sendo assim, optou-se por adicionar 5% de bentonita sódica neste solo para avaliar o seu comportamento. A bentonita adicionada é comercializada pela Bentonit União Nordeste S.A.

A bentonita sódica é um argilomineral do tipo 2:1, isto é, possui duas folhas de tetraedro de silício e uma de octaedro de alumínio. Faz parte do grupo das esmectitas, onde um cátion de sódio une as unidades, sendo também chamada de esmectita sódica. Como essa ligação com os cátions é uma ligação fraca, ela não impede a entrada de água e favorece a elevada capacidade de adsorção de água desses argilominerais, tornando-o expansivo na presença de água.

Foram realizados ensaios no solo puro e no solo com adição de 5% de bentonita para se ter um comparativo do desempenho desses solos, de forma a avaliar se existe uma melhora no comportamento dos mesmos para serem usados como camada de cobertura de aterro.

As amostras foram nomeadas da seguinte maneira:

- solo da jazida antiga: amostra 01; e
- solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita: amostra 02.

Neste capítulo são descritas informações sobre as amostragens, metodologia, características dos solos, resultados dos ensaios, são feitas comparações com os ensaios realizados por Barroso (2008) e são apresentadas simulações de camadas monolíticas, camadas monolíticas evapotranspirativas, barreiras capilares, barreiras capilares evapotranspirativas com o solo da amostra 01 e amostra 02 para camadas de cobertura com o uso do Programa VADOSE/W.

5.1 Amostragem

As amostras foram retiradas no dia 25/09/08 no Aterro Morro do Céu, em Niterói. Foram coletadas amostras deformadas da jazida antiga com auxílio de pá, colocadas em sacos plásticos (figura 5.1) e levadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).



Figura 5.1: Coleta de amostras de solo usado anteriormente como camada de cobertura (jazida antiga).

5.2 Metodologia

5.2.1 Caracterização do Solo

Foram realizados ensaios de caracterização conforme a NBR 7181/1984, limites de Atterberg conforme NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 e determinação da densidade real dos grãos conforme a norma DNER-ME 093/94 - Solos - Determinação da densidade real dos grãos.

5.2.2 Compactação

Foi realizado ensaio de compactação tipo Proctor Normal segundo a NBR 7182/1986 para a determinação da umidade ótima de compactação e da massa específica seca máxima do

solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, amostra 02 (figura 5.2). Não foi possível ensaiar a amostra 01, solo da jazida antiga, pois não havia quantidade suficiente de solo.



Figura 5.2: Sequência do ensaio de compactação

5.2.3 Permeabilidade

Foi realizado o ensaio de permeabilidade de carga variável a fim de verificar a influência da bentonita adicionada e a condutividade hidráulica do solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita. Não foi possível ensaiar a amostra 01, solo da jazida antiga, pois não havia quantidade suficiente de solo.

5.2.4 Curva Característica

A curva característica foi determinada através do Método do Papel Filtro com contato direto com a amostra de acordo com a ASTM D 5298-03 e pela Placa de Sucção e de Pressão.

Foram enviados três corpos de prova compactados na umidade ótima com as amostras de solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita (amostra 02) para a Universidade de São Paulo (USP) para determinação da curva característica através da Placa de Sucção e de Pressão.

5.2.4.1 Método do Papel Filtro

O ensaio para a determinação da curva característica pelo Método do Papel Filtro foi realizado conforme a ASTM D 5298-03. Algumas alterações foram feitas: o papel filtro foi

utilizado diretamente da caixa, no estado seco ao ar; e foi utilizado um papel filtro de cada lado da amostra e a sucção foi determinada pela média do teor de umidade dos dois papéis filtro. A norma sugere que o papel filtro seja seco em estufa no mínimo por 16 horas antes do seu uso e que, para a medição da sucção mátrica, sejam colocados em contato com o solo três papéis filtro entre duas amostras de solo, onde a sucção é medida em função do papel filtro do meio e os outros dois têm a finalidade de proteger o papel filtro central contra a aderência do solo no papel-filtro (RIOS, 2006).

Neste trabalho, optou-se por utilizar o método de secagem ou desidratação para determinar a curva característica.

O papel filtro usado foi o quantitativo Whatman nº 42. Segundo Marinho e Pereira (1998), a umidade inicial no estado seco ao ar deste tipo de papel filtro é de aproximadamente 6%, o que permite medições de sucção até 29 MPa.

Foram compactados dois corpos de prova na umidade ótima: um com a amostra 01 (jazida antiga) e outro com a amostra 02 (jazida antiga com adição de 5% de bentonita). Para o corpo de prova da amostra 01, foram cravados 2 anéis cilíndricos nomeados de anel 4 e 5. Para o corpo de prova da amostra 02, foram cravados 3 anéis cilíndricos nomeados de anel 1, 2 e 3 (figura 5.3). As características dos anéis estão apresentadas na tabela 5.1.



Figura 5.3: Sequência da cravação do anel e obtenção dos pesos do conjunto amostra e anel

Tabela 5.1: Características dos anéis usados no ensaio do método do papel filtro

| Anel | Peso dos anéis (g) | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Amostra |
|------|--------------------|---------------|-------------|--|
| 1 | 51,77 | 5,07 | 2,52 | Amostra 02 – Jazida antiga com adição de 5% de bentonita |
| 2 | 50,73 | 5,03 | 2,52 | |
| 3 | 51,64 | 5,06 | 2,52 | |
| 4 | 51,88 | 5,08 | 2,52 | Amostra 01 – Jazida antiga |
| 5 | 51,69 | 5,05 | 2,52 | |

Após a moldagem dos corpos de prova em anéis, os mesmos foram levados a uma umidade próxima a saturação com o auxílio de uma pipeta, conforme figura 5.4. A quantidade de água a ser acrescentada para alcançar a saturação foi calculada através de índices físicos, porém nem toda a água calculada para o alcance da saturação pôde ser acrescentada, pois as amostras se desintegravam e o solo da amostra 02, solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, se expandia.



Figura 5.4: Umedecimento do corpo de prova até a saturação.

Depois de levados a umidade próxima à umidade de saturação, foi colocado um papel filtro em cada lado da amostra com auxílio de uma pinça metálica e todo o conjunto, corpo de prova e papéis filtro, foi envolto por papel filme e papel alumínio. Após a realização deste procedimento, os anéis foram colocados, na posição vertical, dentro de duas caixas de isopor separadas, conforme a figura 5.5 que apresenta a seqüência de preparação dos cinco anéis.



Figura 5.5: Preparação dos corpos de prova

O período de equalização entre o papel filtro e a amostra foi de sete dias. Após esse período, as amostras foram retiradas das caixas de isopor e foram retirados o papel alumínio e o papel filme que envolviam o corpo de prova. Em seguida, foi retirado o papel filtro com uma pinça metálica, conforme figura 5.6, e colocado dentro de uma cápsula metálica com tampa. As cápsulas com os papéis filtro foram pesadas em uma balança e para a obtenção do peso do papel filtro, foi descontado o peso da cápsula vazia. Esta operação foi realizada rapidamente, de modo a não deixar o papel filtro ficar exposto para evitar a perda ou ganho de umidade.

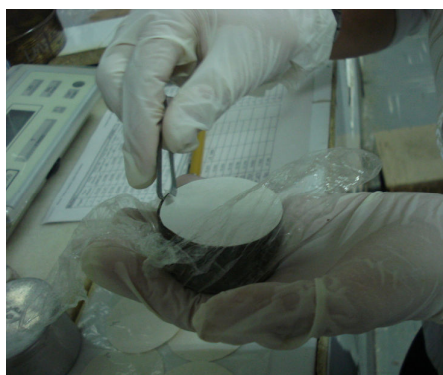


Figura 5.6: Retirada do papel filtro úmido para a pesagem

Após a pesagem, os papéis filtro foram colocados na estufa (figura 5.7) por um período de sete dias, respeitando o tempo mínimo de 24 horas exigido pela norma. Após este

período, os papéis filtro secos foram colocados rapidamente dentro das cápsulas e pesados novamente, a fim de se obter a umidade do papel filtro, conforme figura 5.8.



Figura 5.7: Papéis filtro na estufa

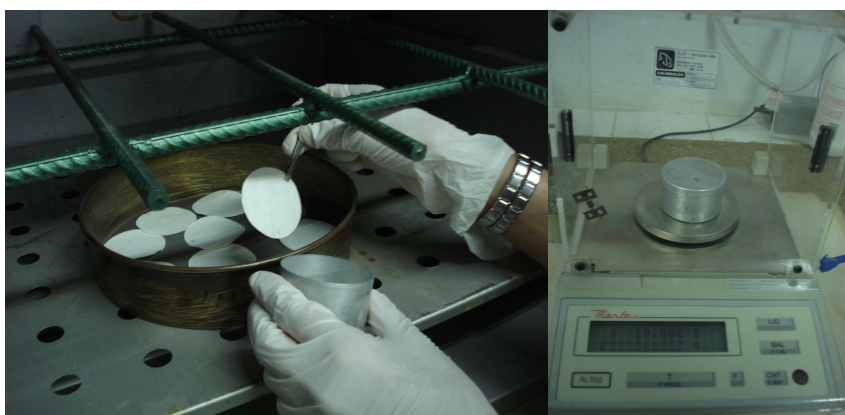


Figura 5.8: Seqüência de pesagem do papel filtro seco

Após a determinação da umidade do papel filtro, a sucção do solo foi calculada, de acordo com a curva de calibração do papel filtro proposta por Chandler et. al (1992), apresentada pelas equações 5.1 e 5.2.

$$\Psi = 10^{(6,05 - 2,48 \text{ Log}(w))} \quad \text{para } w > 47\% \quad (\text{eq. 5.1})$$

$$\Psi = 10^{(4,84 - 0,0622 w)} \quad \text{para } w \leq 47\% \quad (\text{eq. 5.2})$$

Onde:

Ψ : sucção (kPa)

w: umidade o papel filtro (%)

Para a determinação dos próximos pontos do ensaio, caso seja necessário, os corpos de prova são expostos ao ar e a variação do teor de umidade gravimétrica é controlada pelo peso do anel com a amostra, até atingirem a umidade desejada quando então o processo é repetido.

5.2.4.2 Placa de Sucção e Placa de Pressão

O solo da amostra 02, solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, foi compactado no cilindro do Proctor Normal, na umidade ótima. A partir daí, foram moldados três corpos de prova em tubo de PVC com as dimensões de 40 mm de altura e 40 mm de diâmetro interno (figura 5.9), que foram envoltos em papel filme e depois em parafina para que a umidade dos mesmos fosse mantida. Os corpos de prova foram chamados de C.P. 1, C.P. 2 e C.P. 3. Em seguida, foram enviados para o laboratório de Solos da USP para a determinação da curva característica através da Placa de Sucção e Placa de Pressão.

Foi utilizada a Placa de Sucção para a determinação da curva característica até a sucção de 20 e 30 kPa. Para valores de sucção acima destes, foi utilizada a Placa de Pressão.



Figura 5.9: Corpos de prova enviados para a USP

No ensaio Placa de Sucção, as amostras foram inicialmente saturadas e, em seguida, foi aplicado um desnível entre o disco cerâmico e o reservatório de água, de forma que a sucção resultasse no valor de 2 kPa na Placa de Sucção. Para a medição dos outros pontos da curva característica, procedeu-se da mesma maneira até valores de sucção de 20 kPa para o C.P. 2 e C.P. 3 e 30 kPa para o C.P.1.

A partir daí, foi usada, para dar continuidade à determinação da curva característica, a Placa de Pressão, que utiliza o princípio da translação de eixos para evitar a cavitação no sistema. A amostra foi colocada sobre o disco cerâmico de alta entrada de ar, a câmara foi fechada, foi aplicada uma pressão de ar e a pressão da água é mantida praticamente nula. Acompanha-se a saída de água até a estabilização do sistema.

5.3 Resultados dos Ensaio

5.3.1 Curva Granulométrica

5.3.1.1 Resultados da Amostra 01 – Solo da jazida antiga

A curva granulométrica do solo da jazida antiga é apresentada na figura 5.10 e na tabela 5.2 está apresentada a distribuição granulométrica.

A partir dos resultados, o solo pôde ser caracterizado como sendo uma areia silto-argilosa, visto que, em sua composição há 60,0% de areia.

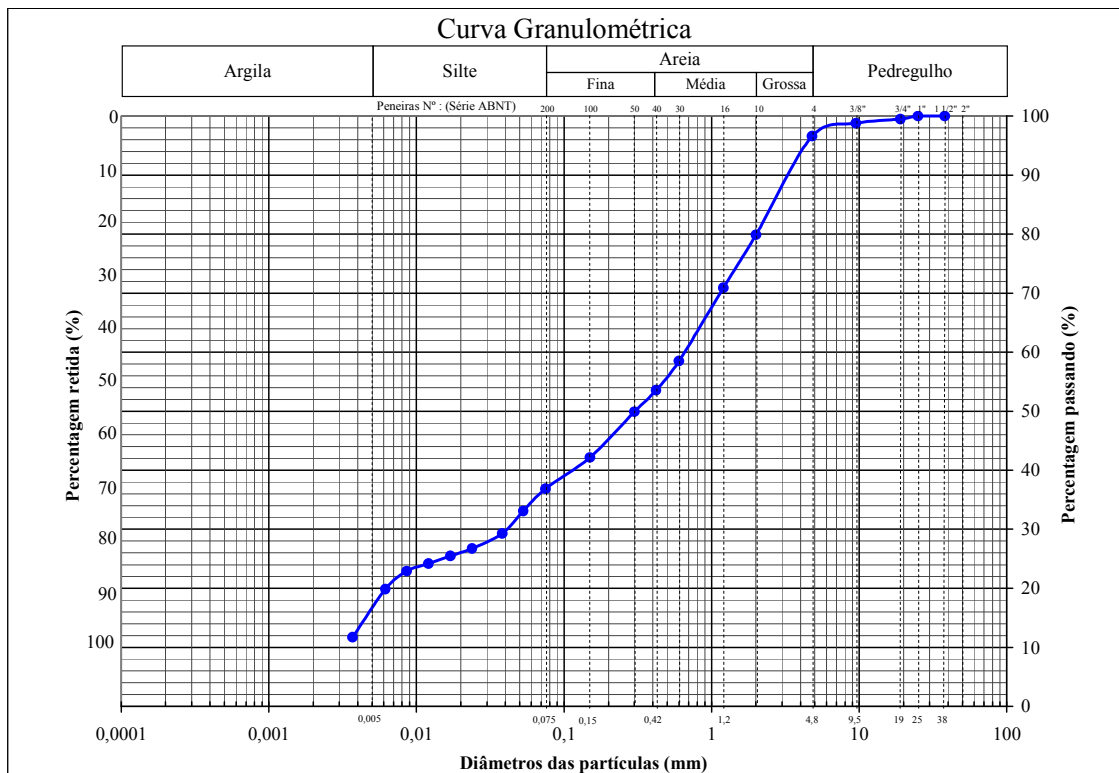


Figura 5.10: Curva granulométrica da amostra 01 – Solo da jazida antiga

Tabela 5.2: Composição granulométrica do solo da amostra 01 – Solo da jazida antiga

| Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) | | | | | |
|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| Argila | Silte | Areia | | | Pedregulho |
| | | Fina | Média | Grossa | |
| 16,0 | 21,0 | 17,0 | 26,0 | 17,0 | 3,0 |

5.3.1.2 Resultados da Amostra 02 – Solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita

A curva granulométrica do solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita é apresentada na figura 5.11 e na tabela 5.3 está apresentada a distribuição granulométrica.

A partir dos resultados, o solo pôde ser caracterizado como sendo uma areia argilo-siltosa, visto que, em sua composição há 54% de areia. Pode-se notar um aumento no percentual da fração de solos finos quando comparado ao ensaio da amostra 01 (item 5.3.1.1), devido à adição de bentonita.

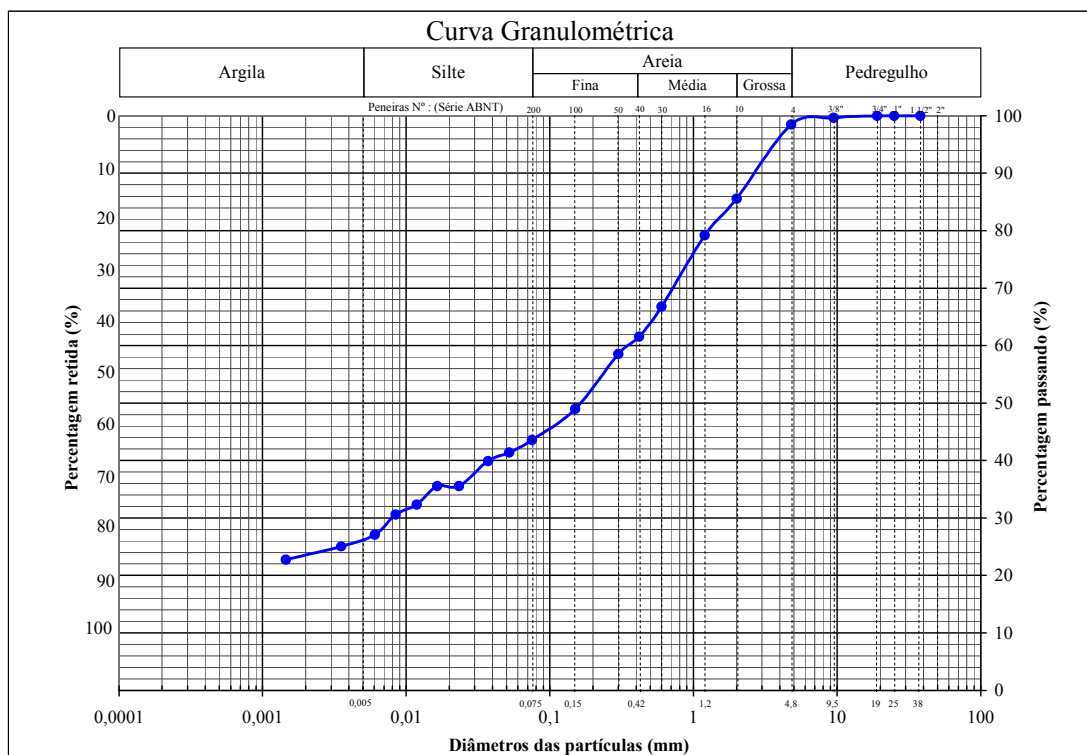


Figura 5.11: Curva do solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita

Tabela 5.3: Composição granulométrica do solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita

| Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) | | | | | |
|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| Argila | Silte | Areia | | | Pedregulho |
| | | Fina | Média | Grossa | |
| 26,0 | 18,0 | 17,0 | 25,0 | 12,0 | 2,0 |

5.3.1.3 Comparação dos Resultados

De acordo com os resultados obtidos e apresentados na tabela 5.4, pode-se notar uma semelhança entre a distribuição granulométrica da amostra 01 – jazida antiga e da amostra nº 2 estudada por Barroso (2008). É evidente o acréscimo no percentual da fração de solo fino, quando comparada a amostra pura (amostra 01) com a amostra com adição de bentonita (amostra 02).

Tabela 5.4: Tabela comparativa das distribuições granulométricas

| Ensaio | Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT) | | | | | Pedregulho |
|--|---|-------|-------|-------|--------|------------|
| | Argila | Silte | Areia | | | |
| | | | Fina | Média | Grossa | |
| Amostra 01 – jazida antiga | 16,0 | 21,0 | 17,0 | 26,0 | 17,0 | 3,0 |
| Amostra 02 – jazida antiga com adição de 5% de bentonita | 26,0 | 18,0 | 17,0 | 25,0 | 12,0 | 2,0 |
| Amostra nº 1 (BARROSO, 2008) | 13,0 | 11,0 | 53,0 | | | 23,0 |
| Amostra nº 2 (BARROSO, 2008) | 19,0 | 19,0 | 58,0 | | | 4,0 |

5.3.2 Limites de Atterberg - Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP)

Os resultados encontrados para a amostra 01 e 02 estão apresentados na tabela 5.5 junto com os resultados de Barroso (2008).

Nota-se que não existe uma semelhança entre os resultados encontrados neste trabalho e o resultado obtido por Barroso(2008). Vale ressaltar o aumento significativo no índice de plasticidade (IP) e, conseqüente, trabalhabilidade da amostra 02 devido à adição de 5% bentonita.

Tabela 5.5: Limites de Atterberg

| Limites | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|--|--------|--------|--------|
| Amostra 01 – Jazida antiga | 32 | 18 | 14 |
| Amostra 02 – Jazida antiga com adição de 5% de bentonita | 57 | 22 | 35 |
| Amostra nº 1 (BARROSO, 2008) | NP | NP | NP |
| Amostra nº 2 (BARROSO, 2008) | 28 | 21 | 7 |

5.3.3 Densidade Real dos Grãos

Os resultados encontrados para a amostra 01 e 02 estão apresentados na tabela 5.6, assim como os resultados obtidos por Barroso (2008).

Não existe uma semelhança entre os resultados obtidos por Barroso (2008) e a amostra 01. Pode-se notar um aumento na densidade real dos grãos da amostra 02 quando comparada com a amostra 01 devido ao aumento dos solos finos pelo acréscimo da bentonita.

Tabela 5.6: Densidade real dos grãos

| Limites | Densidade real dos grãos |
|--|--------------------------|
| Amostra 01 – Jazida antiga | 2,563 |
| Amostra 02 – Jazida antiga com adição de 5% de bentonita | 2,567 |
| Amostra nº 1 (BARROSO, 2008) | 2,631 |
| Amostra nº 2 (BARROSO, 2008) | 2,673 |

5.3.4 Compactação

Para o ensaio de compactação, foi ensaiada a amostra 02 do solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita.

Quanto à amostra 02, para efeito de análise do desempenho do solo com a adição de bentonita, podem ser utilizados os resultados do ensaio de compactação realizado por Barroso (2008) na amostra de solo pura.

5.3.4.1 Resultados da Amostra 02 – Solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita

A Figura 5.12 apresenta a curva de compactação para a amostra 02. O valor encontrado para a massa específica seca máxima foi de 1,760 g/cm³ e umidade ótima de 14,1%.

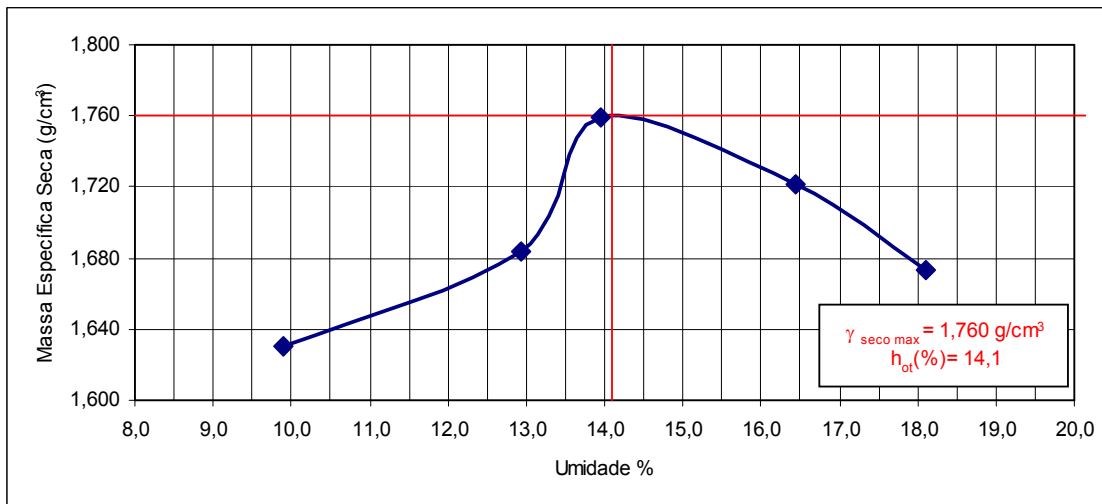


Figura 5.12: Curva de compactação para a amostra 04

5.3.4.2 Comparação dos Resultados

A tabela 5.7 apresenta um comparativo dos resultados do ensaio de compactação do solo estudado e os resultados apresentados por Barroso (2008).

Para efeito de comparação, o solo da amostra 02, jazida antiga com adição de 5% de bentonita, possui uma umidade ótima superior aos valores obtidos por Barroso (2008), porém apresenta um valor menor de massa específica aparente seca máxima, o que evidencia o comportamento da bentonita, pois solos argilosos apresentam massas específicas secas máximas menores e umidades ótimas maiores quando comparado com siltes, areias e pedregulhos (PINTO, 2000).

Tabela 5.7: Resultados dos ensaios de compactação

| Amostra | Umidade ótima (%) | Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³) |
|--|-------------------|--|
| Amostra 02 – Jazida antiga com adição de 5% de bentonita | 14,1 | 1,760 |
| Amostra nº 1 (BARROSO, 2008) | 11,5 | 1,879 |
| Amostra nº 2 (BARROSO, 2008) | 12,4 | 1,893 |

5.3.5 Permeabilidade Saturada

Para a determinação da permeabilidade foi realizado o ensaio de permeabilidade de carga variável. O solo ensaiado foi o solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, caracterizado como amostra 02, e o corpo de prova foi compactado nas condições de umidade ótima. O valor encontrado foi de $k = 5,10 \times 10^{-8}$ cm/s, o que caracteriza este solo como um solo adequado para ser usado como camada de cobertura, devido a sua baixa permeabilidade.

De acordo com Barroso (2008), o valor da permeabilidade saturada ensaiada através do permeâmetro de carga variável, compactado nas condições de umidade ótima, foi de $2,85 \times 10^{-7}$ cm/s. Esse valor pode ser considerado como referência para a amostra 01 – Jazida antiga, a fim de comparação com o resultado obtido neste trabalho para a amostra 02 – Jazida antiga com adição de 5% de bentonita.

Torna-se claro a influência da adição da bentonita na condutividade hidráulica do solo estudado, pois o resultado da permeabilidade saturada para a amostra com bentonita foi dez vezes menor que o valor encontrado para a amostra pura.

A altura inicial do corpo de prova foi de 10 cm, como pode ser verificado no ANEXO A, e altura final foi de 11,36 cm. Esta variação de altura também pode ser atribuída à presença de bentonita, que é um argilomineral expansivo em contato com a água.

5.3.6 Curva Característica

5.3.6.1 Método do Papel Filtro

A curva característica para a amostra 01, solo da jazida antiga, e amostra 02, solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, foi determinada através do Método do Papel Filtro.

5.3.6.1.1 Resultados da Amostra 01 – Solo da jazida antiga

Foram moldados a partir da amostra 01 compactada na umidade ótima dois anéis chamados de anel 4 e anel 5.

Na figura 5.13 estão apresentadas as curvas características para os anéis 4 e 5. Na tabela 5.8, estão demonstrados os valores de umidade e sucção do solo para estes anéis.

A umidade alcançada no processo de saturação inicial dos anéis foi de 15,18 e 15,91% para o anel 4 e anel 5, respectivamente, o que difere do valor de umidade gravimétrica calculada correspondente a saturação do anel 4 e anel 5, que foram 18,57 e 20,33%, respectivamente. Não foi possível a saturação das amostras, pois as mesmas se desintegravam por serem muito arenosas.

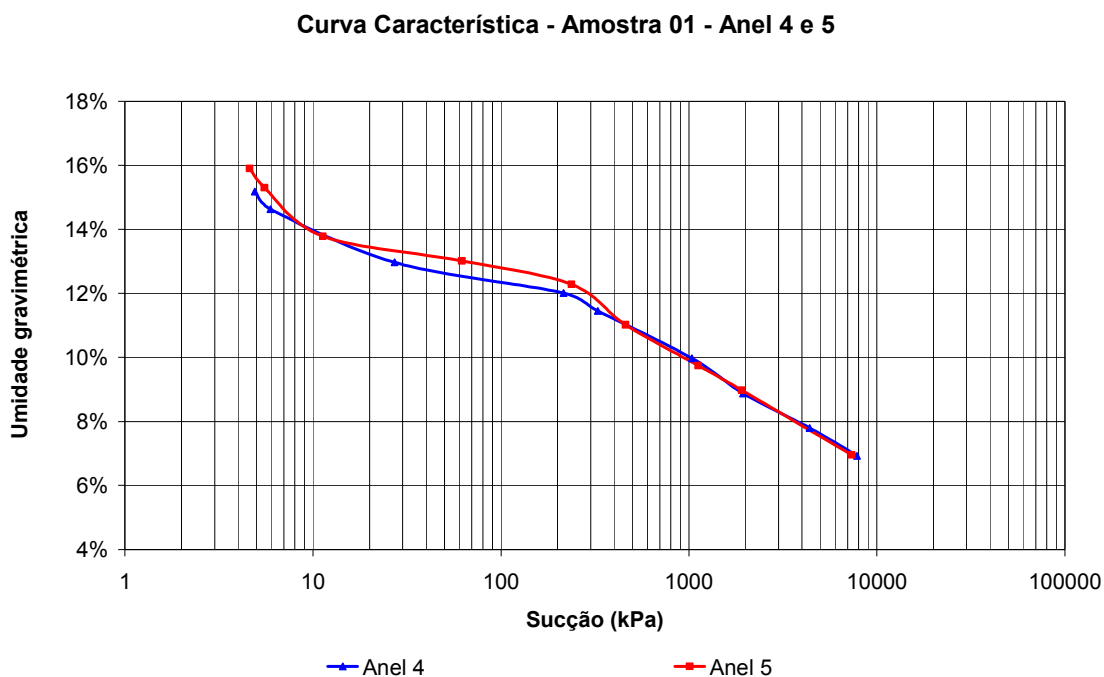


Figura 5.13: Curva Característica da amostra 01

Tabela 5.8: Valores de umidade de sucção do solo do anel 4 e anel 5

| Anel 4 | | Anel 5 | |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| Sucção (kPa) | Umidade Gravimétrica (%) | Sucção (kPa) | Umidade Gravimétrica (%) |
| 0 | 18,57 | 0 | 20,33 |
| 5 | 15,18 | 5 | 15,91 |
| 6 | 14,63 | 6 | 15,30 |
| 27 | 12,97 | 11 | 13,79 |
| 216 | 12,01 | 62 | 13,02 |
| 327 | 11,46 | 238 | 12,28 |
| 1036 | 9,98 | 460 | 11,02 |
| 1944 | 8,88 | 1121 | 9,74 |
| 4385 | 7,80 | 1908 | 8,98 |
| 7856 | 6,93 | 7334 | 6,96 |

Verifica-se uma tendência de comportamento similar para as duas curvas.

Um referencial para valores de sucção seria 1000 kPa como sucção alta, segundo Zornberg e McCartney (2006). Foram encontrados valores altos de sucção de 7.856 e 7.334 kPa para umidade de 6,93 e 6,96 %, respectivamente.

A fim de obter uma maior representatividade, a curva característica média (figura 5.14) pode ser considerada.

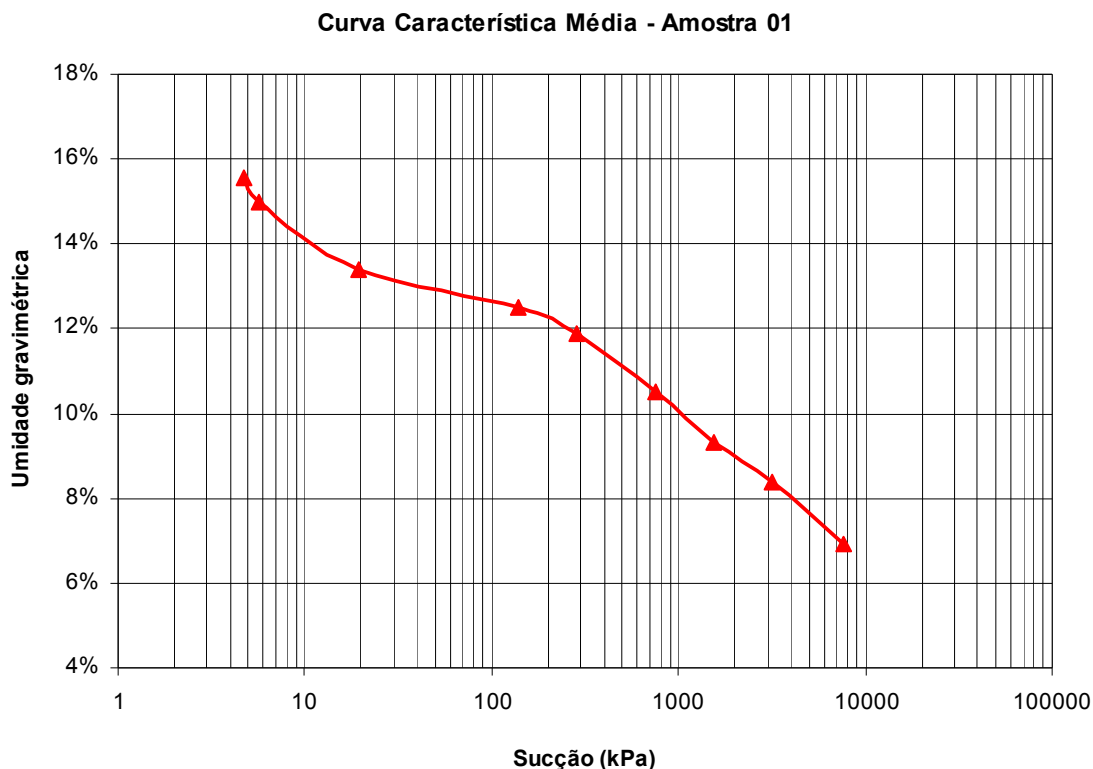


Figura 5.14: Curva Característica média da amostra 01

5.3.6.1.2 Resultados da Amostra 02 – Solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita

Para a amostra 02, foram moldados três corpos de prova compactados na umidade ótima, chamados de anel 1, anel 2 e anel 3.

Na figura 5.15 estão apresentadas as curvas características para o anel 1, 2 e 3. Na tabela 5.9, estão demonstrados os valores de umidade e sucção do solo para estes anéis.

A umidade alcançada no processo de saturação inicial dos anéis 1, 2 e 3 foi de 17,18, 16,52 e 17,74%, respectivamente, o que difere do valor de umidade gravimétrica calculada

correspondente a saturação do anel 1, 2 e 3, que foram 18,25, 17,44 e 19,62%, respectivamente.

Foi observada uma expansão da amostra 02, após a adição da água. Tal fato é explicado pela adição da bentonita.

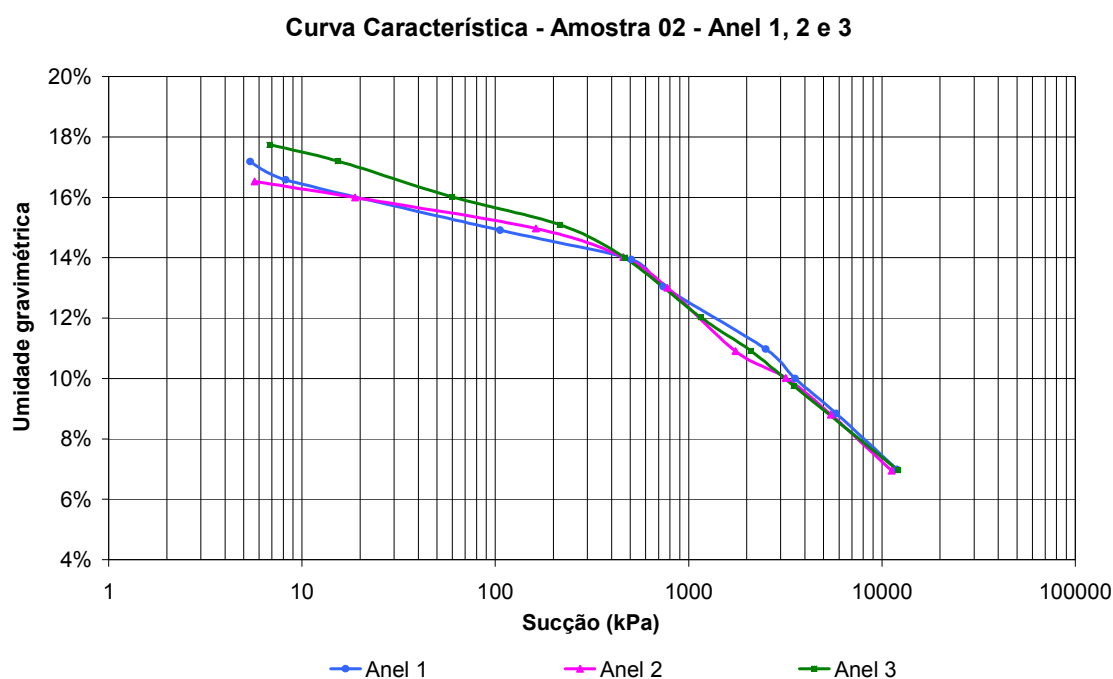


Figura 5.15: Curva Característica da amostra 02

Tabela 5.9: Valores de umidade de sucção do solo do anel 1, 2 e 3

| Anel 1 | | Anel 2 | | Anel 3 | |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| Sucção (kPa) | Umidade Gravimétrica (%) | Sucção (kPa) | Umidade Gravimétrica (%) | Sucção (kPa) | Umidade Gravimétrica (%) |
| 0 | 18,25 | 0 | 17,44 | 0 | 19,62 |
| 5 | 17,18 | 6 | 16,52 | 7 | 17,74 |
| 8 | 16,57 | 19 | 15,99 | 15 | 17,20 |
| 106 | 14,91 | 162 | 14,96 | 60 | 16,01 |
| 505 | 13,94 | 459 | 14,02 | 216 | 15,09 |
| 739 | 13,04 | 778 | 13,01 | 466 | 14,00 |
| 2506 | 10,98 | 1746 | 10,90 | 1156 | 12,03 |
| 3552 | 10,00 | 3184 | 10,02 | 2100 | 10,92 |
| 5796 | 8,85 | 5453 | 8,80 | 3497 | 9,76 |
| 11978 | 6,99 | 11203 | 6,95 | 12078 | 6,96 |

Verifica-se uma tendência de comportamento similar para as três curvas. Observa-se uma diferença inicial para os valores de umidade com a curva do anel 3 apresentando uma

sucção inicial maior que as outras. A curva do anel 3 se mantém com maior retenção de água no solo até a umidade de 14%, a partir daí as curvas seguem uma trajetória semelhante.

A fim de obter uma maior representatividade para a curva característica da amostra 02, a figura 5.16 pode ser considerada.

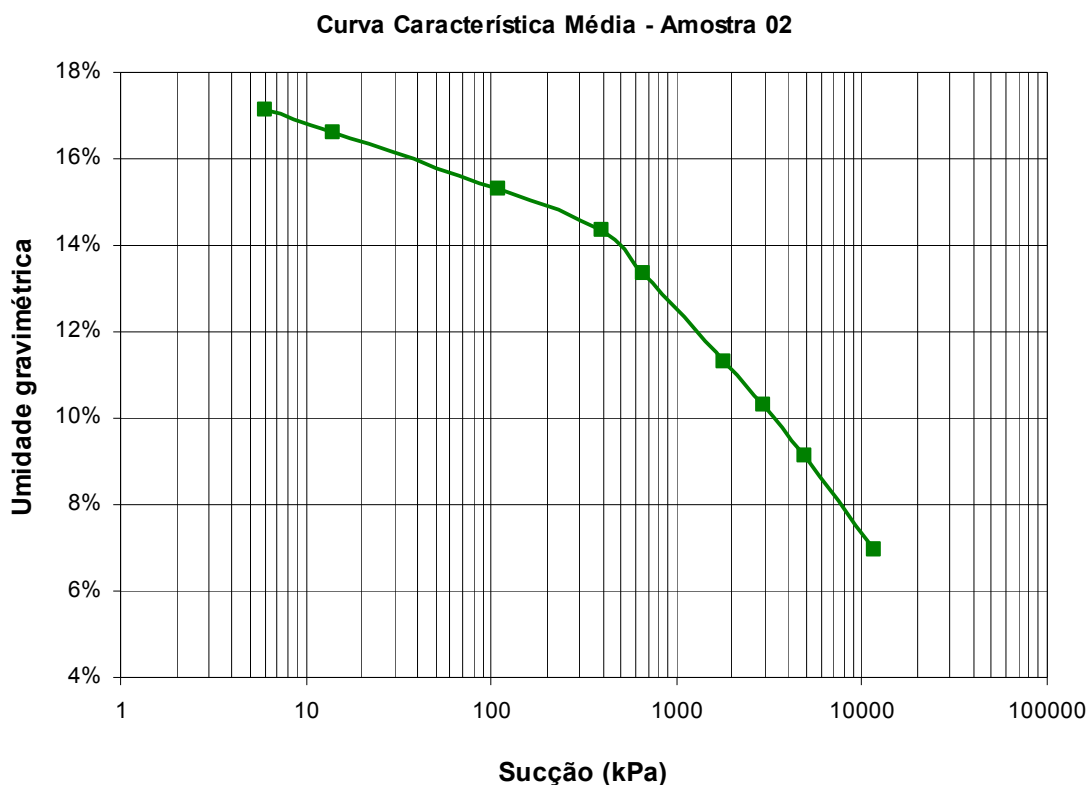


Figura 5.16: Curva Característica média da amostra 02

5.3.6.1.3 Comparação dos resultados das curvas características da amostra 01 e amostra 02

Na figura 5.17 estão apresentadas as curvas características para o anel 4 e 5, referente a amostra 01, e para o anel 1, 2 e 3, referente a amostra 02.

Pode-se notar uma maior capacidade de retenção de água pelos anéis da amostra 02, solo da jazida antiga com 5% de bentonita, devido à adição deste argilomineral, que possui uma grande superfície específica e, conseqüentemente, uma elevada força de adesão com a água. Tal fato explica a sua posição acima das curvas características da amostra 01, solo da jazida antiga puro. Como este solo é bastante arenoso, ele possui a maioria dos poros

relativamente grandes e a água é retida com pouca energia, sendo assim, a uma dada sucção matricial muitos poros se esvaziam e poucos ainda podem reter água, por isso a sua posição inferior na figura 5.17.

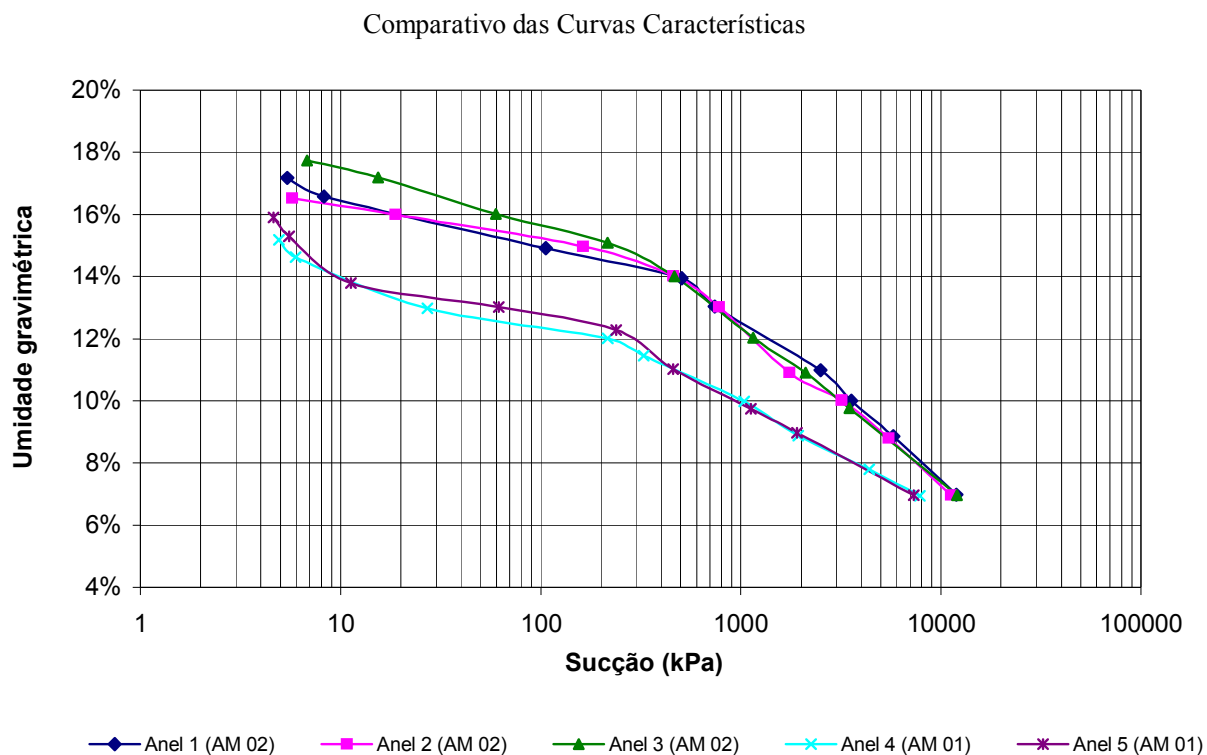


Figura 5.17: Comparativo das Curvas Características da amostra 01 (anel 4 e 5) e da amostra 02 (anel 1, 2 e 3)

Na figura 5.18, está apresentada a curva característica média da amostra 01 e da amostra 02 para melhor visualizar o comportamento diferenciado destes dois solos.

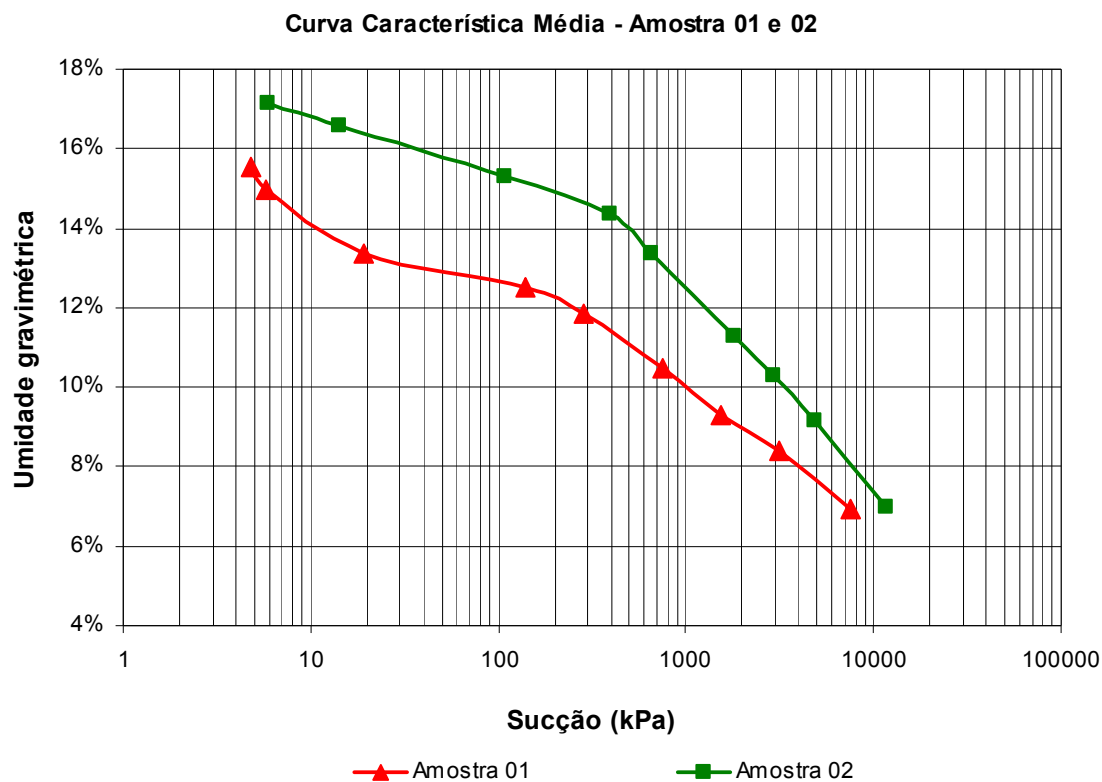


Figura 5.18: Comparativo das Curvas Características média da amostra 01 e da amostra 02

5.3.6.1.4 Variação do Grau de Saturação com a Umidade Gravimétrica da Amostra 01 e 02

Para se ter conhecimento dos valores de umidade que caracterizam a saturação e do grau de saturação dos pontos que estão representados na curva característica para os cinco anéis é apresentada a figura 5.19. Na tabela 5.10 estão explicitados os valores de saturação relacionados para cada umidade gravimétrica.

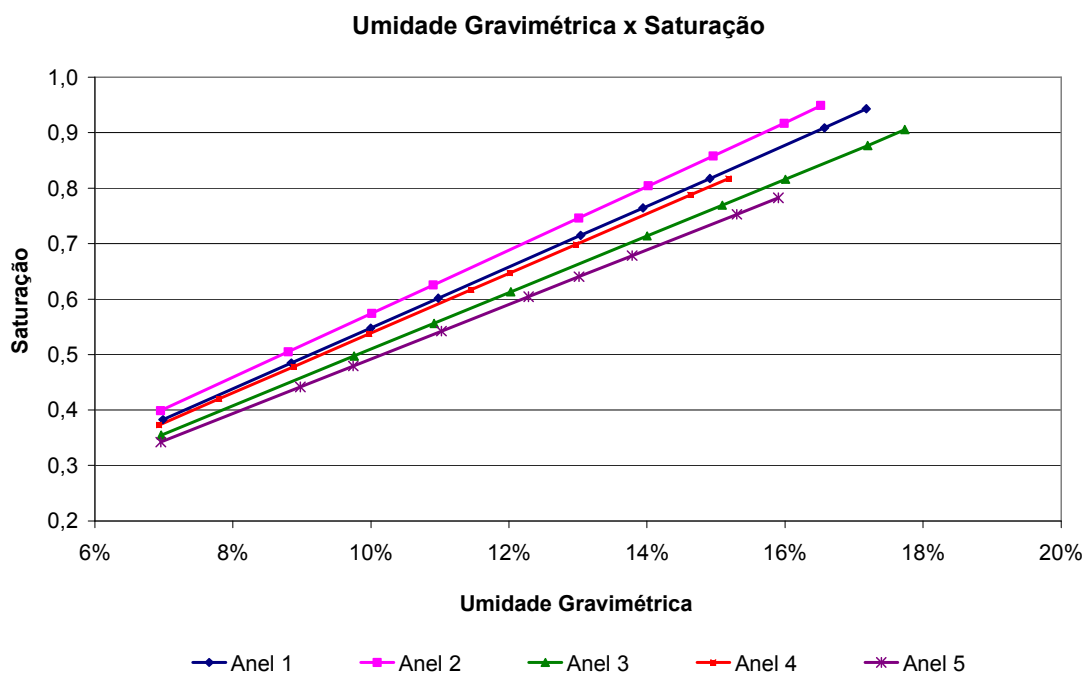


Figura 5.19: Umidade gravimétrica x Saturação para os anéis 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 5.10: Valores de saturação para cada umidade gravimétrica

| Anel 1 | | Anel 2 | | Anel 3 | | Anel 4 | | Anel 5 | |
|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| Umidade Gravimétrica (%) | Saturação | Umidade Gravimétrica (%) | Saturação | Umidade Gravimétrica (%) | Saturação | Umidade Gravimétrica (%) | Saturação | Umidade Gravimétrica (%) | Saturação |
| 18,25 | 1,00 | 17,44 | 1,00 | 19,62 | 1,00 | 18,57 | 1,00 | 20,33 | 1,00 |
| 17,18 | 0,94 | 16,52 | 0,95 | 17,74 | 0,91 | 15,18 | 0,82 | 15,91 | 0,78 |
| 16,57 | 0,91 | 15,99 | 0,92 | 17,20 | 0,88 | 14,63 | 0,79 | 15,30 | 0,75 |
| 14,91 | 0,82 | 14,96 | 0,86 | 16,01 | 0,82 | 12,97 | 0,70 | 13,79 | 0,68 |
| 13,94 | 0,76 | 14,02 | 0,80 | 15,09 | 0,77 | 12,01 | 0,65 | 13,02 | 0,64 |
| 13,04 | 0,71 | 13,01 | 0,75 | 14,00 | 0,71 | 11,46 | 0,62 | 12,28 | 0,60 |
| 10,98 | 0,60 | 10,90 | 0,63 | 12,03 | 0,61 | 9,98 | 0,54 | 11,02 | 0,54 |
| 10,00 | 0,55 | 10,02 | 0,57 | 10,92 | 0,56 | 8,88 | 0,48 | 9,74 | 0,48 |
| 8,85 | 0,48 | 8,80 | 0,50 | 9,76 | 0,50 | 7,80 | 0,42 | 8,98 | 0,44 |
| 6,99 | 0,38 | 6,95 | 0,40 | 6,96 | 0,35 | 6,93 | 0,37 | 6,96 | 0,34 |

5.3.6.1.5 Variação da Sucção com o Grau de Saturação da Amostra 01 e 02

A figura 5.20 demonstra a curva característica (sucção x grau de saturação) e na tabela 5.11 estão apresentados os valores da sucção para cada grau de saturação dos cinco anéis.

Pode-se evidenciar, conforme mencionado anteriormente, que as curvas referentes a amostra 02 (anel 1, 2 e 3) se mantêm na posição superior do gráfico, com maior capacidade de retenção de água que as curvas da amostra 01 (anel 4 e 5).

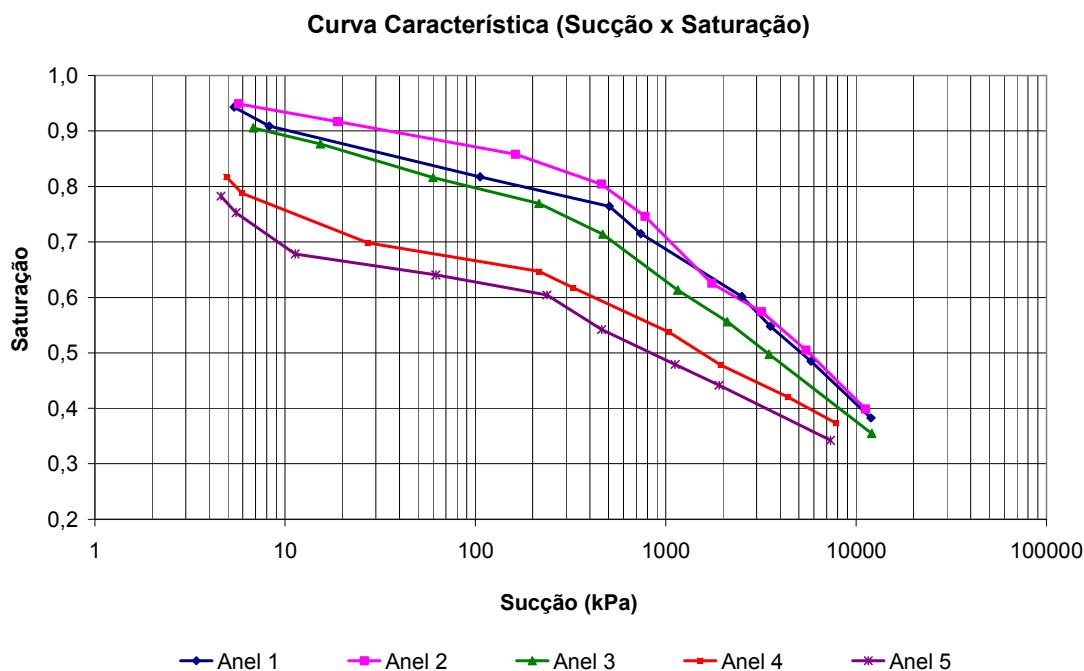


Figura 5.20: Curva Característica (sucção x grau de saturação) para os anéis 1, 2, 3, 4 e 5

Tabela 5.11: Valores de sucção para cada grau de saturação

| Anel 1 | | Anel 2 | | Anel 3 | | Anel 4 | | Anel 5 | |
|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| Sucção (kPa) | Saturação | Sucção (kPa) | Saturação | Sucção (kPa) | Saturação | Sucção (kPa) | Saturação | Sucção (kPa) | Saturação |
| 0 | 1,00 | 0 | 1,00 | 0 | 1,00 | 0 | 1,00 | 0 | 1,00 |
| 5 | 0,94 | 6 | 0,95 | 7 | 0,91 | 5 | 0,82 | 5 | 0,78 |
| 8 | 0,91 | 19 | 0,92 | 15 | 0,88 | 6 | 0,79 | 6 | 0,75 |
| 106 | 0,82 | 162 | 0,86 | 60 | 0,82 | 27 | 0,70 | 11 | 0,68 |
| 505 | 0,76 | 459 | 0,80 | 216 | 0,77 | 216 | 0,65 | 62 | 0,64 |
| 739 | 0,71 | 778 | 0,75 | 466 | 0,71 | 327 | 0,62 | 238 | 0,60 |
| 2506 | 0,60 | 1746 | 0,63 | 1156 | 0,61 | 1036 | 0,54 | 460 | 0,54 |
| 3552 | 0,55 | 3184 | 0,57 | 2100 | 0,56 | 1944 | 0,48 | 1121 | 0,48 |
| 5796 | 0,48 | 5453 | 0,50 | 3497 | 0,50 | 4385 | 0,42 | 1908 | 0,44 |
| 11978 | 0,38 | 11203 | 0,40 | 12078 | 0,35 | 7856 | 0,37 | 7334 | 0,34 |

5.3.6.1.6 Comparação com os Resultados obtidos por Barroso (2008)

Como a granulometria da amostra 01, jazida antiga, e da amostra nº 2 estudada por Barroso (2008) são similares, conforme tabela 5.4, é interessante realizar a comparação do comportamento das curvas características dessas amostras.

A figura 5.21 apresenta um comparativo das curvas características obtidas neste trabalho com a curva característica dos três corpos de prova da amostra nº 2 estudada por Barroso (2008), apresentada na figura 4.25.

Pode-se notar que as curvas possuem um comportamento diferenciado. Tal fato pode ser atribuído às diferenças de granulometria, índice de plasticidade e densidade dos grãos.

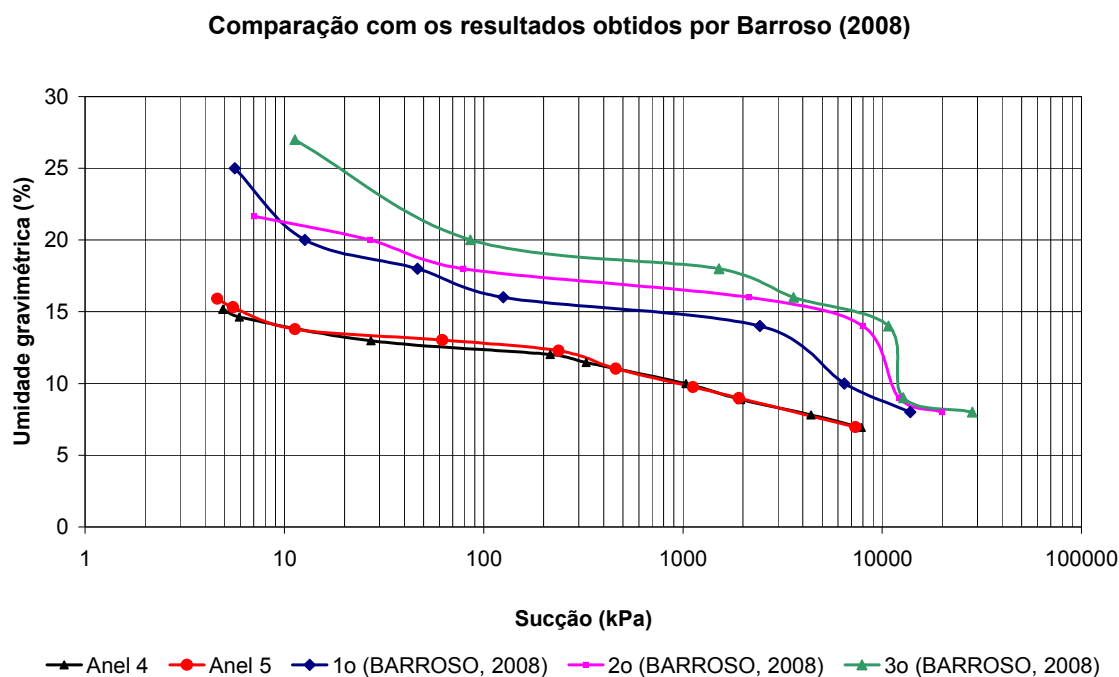


Figura 5.21: Comparativo das Curvas Características da amostra 01 com as curvas obtidas por Barroso (2008)

5.3.6.3 Placa de Sucção e Placa de Pressão

A curva característica para a amostra 02, solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, foi determinada pela Placa de Sucção e, em seguida, pela Placa de Pressão na USP.

5.3.6.2.1 Resultados da Amostra 02 – Solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita

Na figura 5.22, são apresentadas as curvas características obtidas na USP dos três corpos de prova da amostra 02.

O último ponto da curva é caracterizado como o valor de sucção dos corpos de prova secos ao ar.

È importante ressaltar a diferença no valor da umidade volumétrica para um mesmo valor de sucção entre os corpos de prova ensaiados. Tomando como referência as curvas do C.P. 2 e C.P. 3, a diferença no valor da umidade volumétrica é de 8% para o primeiro ponto de medição e 9% para a sucção de 500 kPa. Este fato pode ser atribuído a uma possível diferença de estrutura do solo. Vale ressaltar que as condições de compactação e moldagem dos três corpos de prova são iguais.

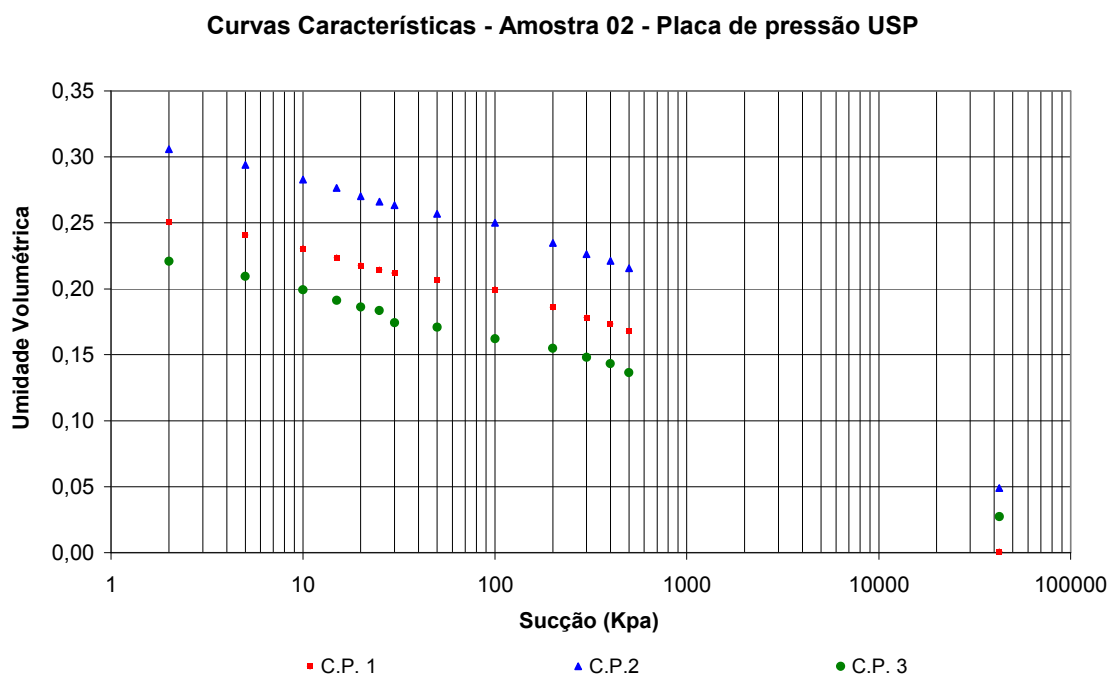


Figura 5.22: Curvas Características obtidas pela Placa de Pressão na USP

5.3.6.2.2 Variação do Grau de Saturação com a Umidade Volumétrica da Amostra 02

Na figura 5.23, são apresentadas as curvas com a variação da umidade volumétrica em função do grau de saturação para os três corpos de prova da amostra 02 que foram enviados

para USP. Na tabela 5.12 são discriminados os pontos do grau de saturação para cada valor de umidade volumétrica.

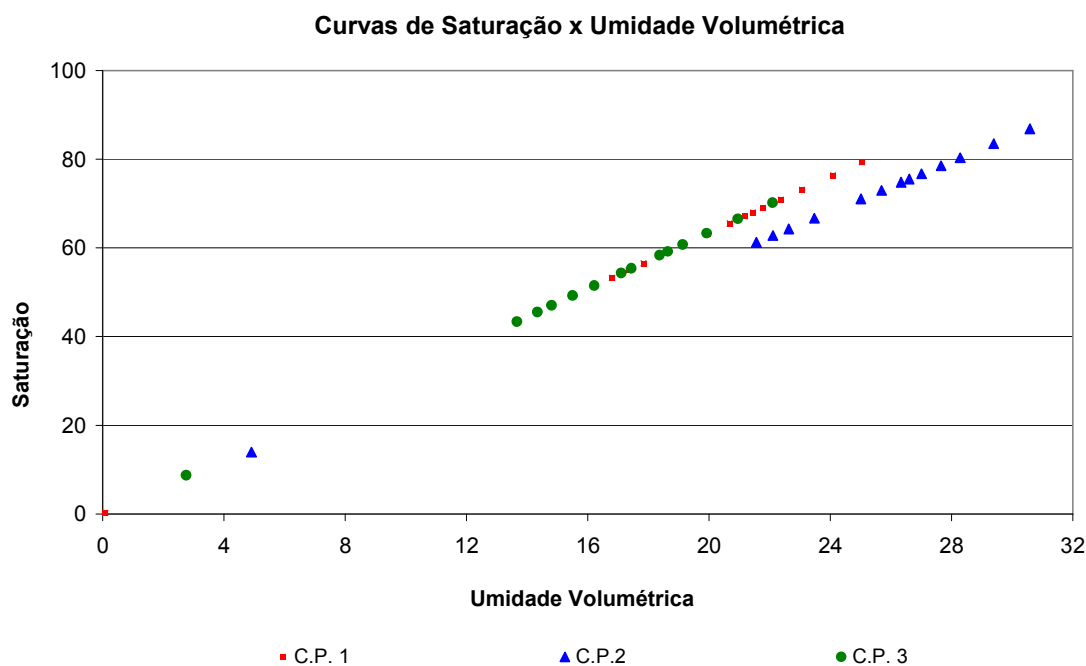


Figura 5.23: Umidade Volumétrica x Saturação para os C.P. 1, C.P. 2 e C.P. 3.

Tabela 5.12: Valores de saturação para cada umidade volumétrica

| C.P. 1 | | C.P. 2 | | C.P. 3 | |
|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| Saturação (%) | Umidade volumétrica (%) | Saturação (%) | Umidade volumétrica (%) | Saturação (%) | Umidade volumétrica (%) |
| 79,33 | 25,04 | 86,84 | 30,58 | 70,20 | 22,09 |
| 76,30 | 24,09 | 83,47 | 29,39 | 66,55 | 20,95 |
| 73,06 | 23,06 | 80,32 | 28,28 | 63,28 | 19,92 |
| 70,87 | 22,37 | 78,54 | 27,66 | 60,76 | 19,13 |
| 68,99 | 21,78 | 76,71 | 27,01 | 59,21 | 18,64 |
| 67,95 | 21,45 | 75,54 | 26,60 | 58,35 | 18,37 |
| 67,11 | 21,19 | 74,79 | 26,33 | 55,41 | 17,44 |
| 65,49 | 20,67 | 72,96 | 25,69 | 54,33 | 17,10 |
| 63,25 | 19,97 | 71,03 | 25,01 | 51,49 | 16,21 |
| 58,91 | 18,60 | 66,67 | 23,48 | 49,24 | 15,50 |
| 56,51 | 17,84 | 64,28 | 22,63 | 47,05 | 14,81 |
| 54,94 | 17,34 | 62,77 | 22,10 | 45,55 | 14,34 |
| 53,22 | 16,80 | 61,23 | 21,56 | 43,40 | 13,66 |
| 0,26 | 0,08 | 13,93 | 4,91 | 8,73 | 2,75 |

5.3.6.2.3 Variação da Sucção com o Grau de Saturação da Amostra 02

Na figura 5.24, são apresentadas as curvas características de sucção x grau de saturação para os C.P.1, C.P. 2 e C.P. 3 e na tabela 5.13 estão apresentados os valores da sucção para cada grau de saturação dos três corpos de prova. Nota-se que existe uma diferença no grau de saturação para o mesmo valor de sucção para os três corpos de prova.

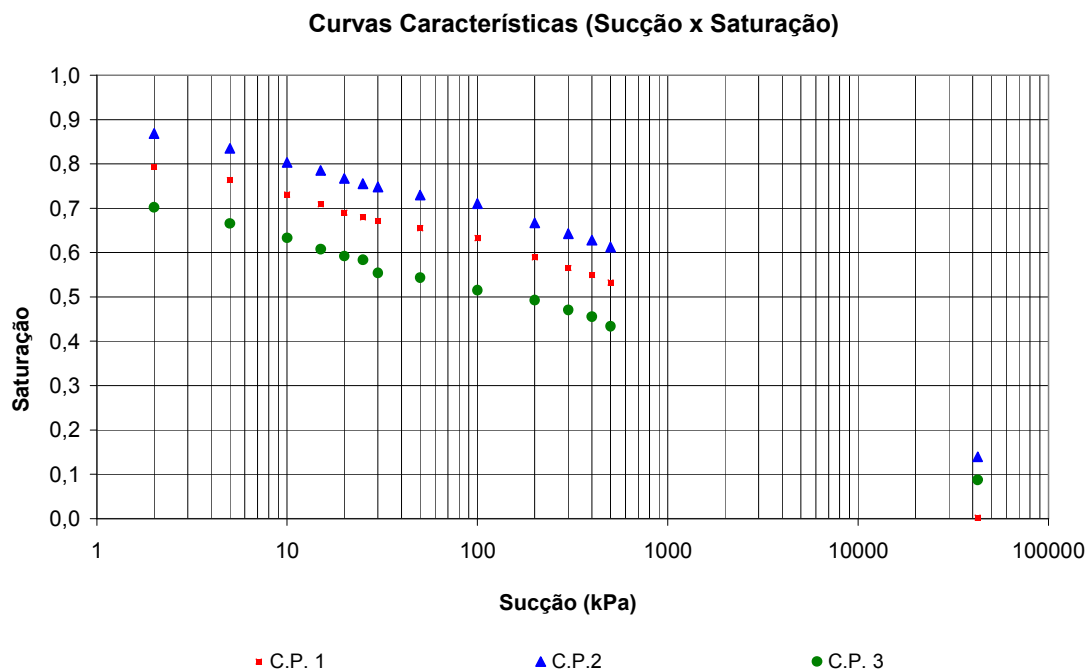


Figura 5.24: Curvas Características (Sucção x Saturação) para os C.P. 1, C.P. 2 e C.P. 3

Tabela 5.13: Valores de sucção para cada grau de saturação

| C.P. 1 | | C.P. 2 | | C.P. 3 | |
|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Sucção (kPa) | Saturação (%) | Sucção (kPa) | Saturação (%) | Sucção (kPa) | Saturação (%) |
| 2 | 79,33 | 2 | 86,84 | 2 | 70,20 |
| 5 | 76,30 | 5 | 83,47 | 5 | 66,55 |
| 10 | 73,06 | 10 | 80,32 | 10 | 63,28 |
| 15 | 70,87 | 15 | 78,54 | 15 | 60,76 |
| 20 | 68,99 | 20 | 76,71 | 20 | 59,21 |
| 25 | 67,95 | 25 | 75,54 | 25 | 58,35 |
| 30 | 67,11 | 30 | 74,79 | 30 | 55,41 |
| 50 | 65,49 | 50 | 72,96 | 50 | 54,33 |
| 100 | 63,25 | 100 | 71,03 | 100 | 51,49 |
| 200 | 58,91 | 200 | 66,67 | 200 | 49,24 |
| 300 | 56,51 | 300 | 64,28 | 300 | 47,05 |
| 400 | 54,94 | 400 | 62,77 | 400 | 45,55 |
| 500 | 53,22 | 500 | 61,23 | 500 | 43,40 |
| 42503 | 0,26 | 42503 | 13,93 | 42503 | 8,73 |

5.3.6.3 Comparação entre os Resultados obtidos pelo Método do Papel Filtro e Placa de Sucção e Placa de Pressão

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos pelo Método do Papel Filtro e pela Placa de Sucção e de Pressão, foram plotadas curvas características com o eixo das ordenadas representando a umidade volumétrica (figura 5.25) e umidade gravimétrica (figura 5.26).

As curvas referentes ao anel 1, anel 2 e anel 3 foram obtidas pelo Método do Papel Filtro. As curvas nomeadas de C.P. 1, C.P. 2 e C.P. 3 foram obtidas pelos aparelhos Placas de Sucção e de Pressão na USP. Todos os anéis e corpos de prova são formados pelo solo da amostra 02, solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita.

De acordo com a figura 5.25 é possível notar que as curvas obtidas pela Placa de Sucção e de Pressão possuem o mesmo formato as curvas obtidas pelo Método do Papel Filtro. A curva do C.P.2 apresenta valores mais próximos de umidade volumétrica quando comparada com as curvas determinadas pelo Método do Papel Filtro. Porém, nota-se uma diferença acentuada no valor da umidade volumétrica entre as curvas obtidas pelo papel filtro e as curvas do C.P.1 e C.P.3 obtidas pela Placa de Sucção e de Pressão.

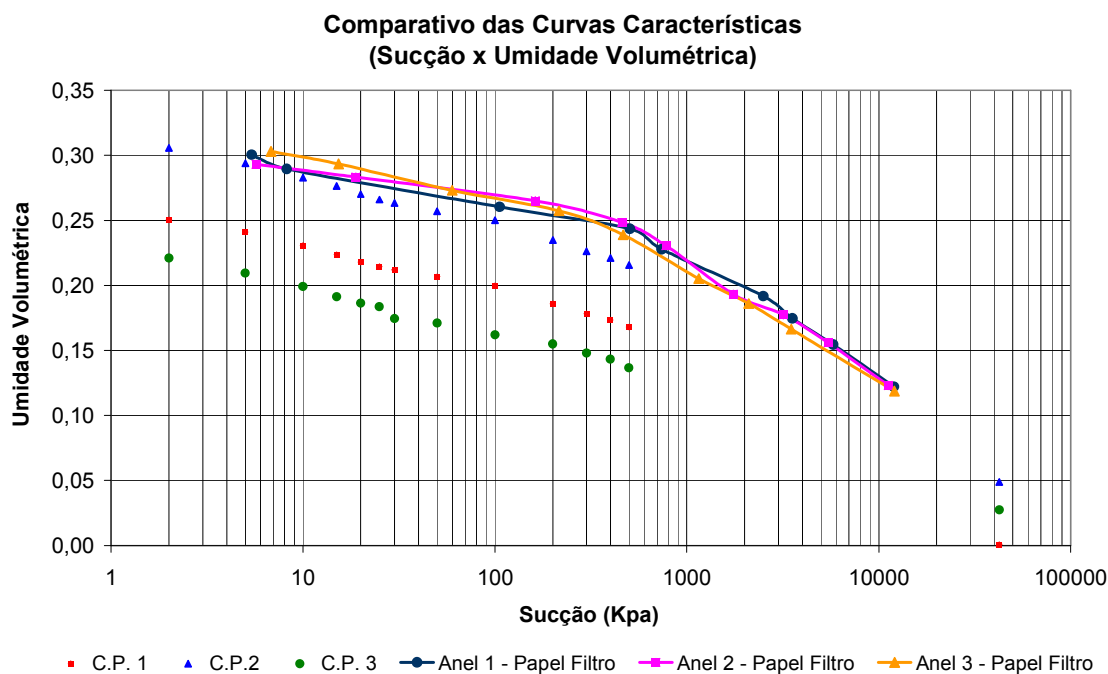


Figura 5.25: Comparativo da curva característica (sucção x umidade volumétrica) obtida pelo Papel Filtro e Placa de Sucção e de Pressão

Para as curvas características (sucção x umidade gravimétrica) apresentadas figura 5.26, a curva do C.P.2 obtida pela Placa de Sucção e de Pressão possui valores semelhantes às curvas determinadas pelo Método do Papel Filtro. A diferença de umidade das curvas do C.P.1 e C.P.3 obtidas pela Placa de Sucção e de Pressão e as curvas obtidas pelo Método do Papel Filtro persiste.

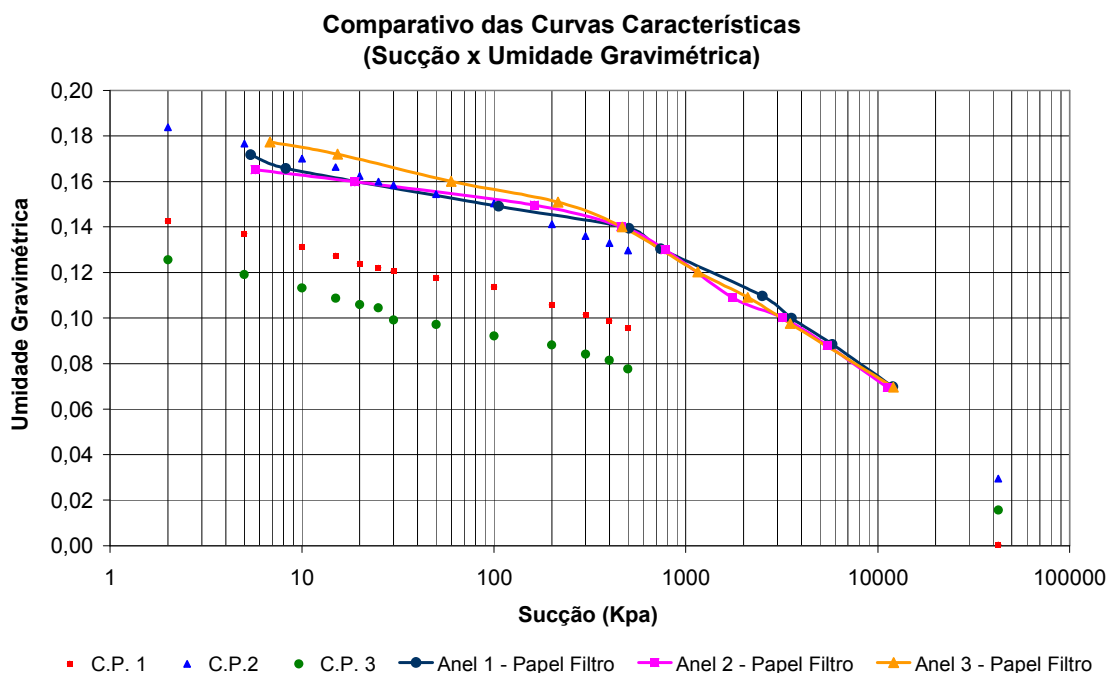


Figura 5.26: Comparativo da curva característica (sucção x umidade gravimétrica) obtida pelo Papel Filtro e Placa de Sucção e de Pressão

Na figura 5.27 é apresentado um comparativo das curvas características de sucção x saturação para os resultados obtidos pelo Método do Papel Filtro e Placa de Sucção e de Pressão. Nota-se que o grau de saturação dos C.P. 1, C.P. 2 e C.P. 3 é de 79,33%, 86,84% e 70,20%, respectivamente, o que difere do Método do Papel Filtro, onde o grau de saturação alcançado é maior, 94,28 %, 94,86% e 90,55% para o anel 1, 2 e 3, respectivamente.

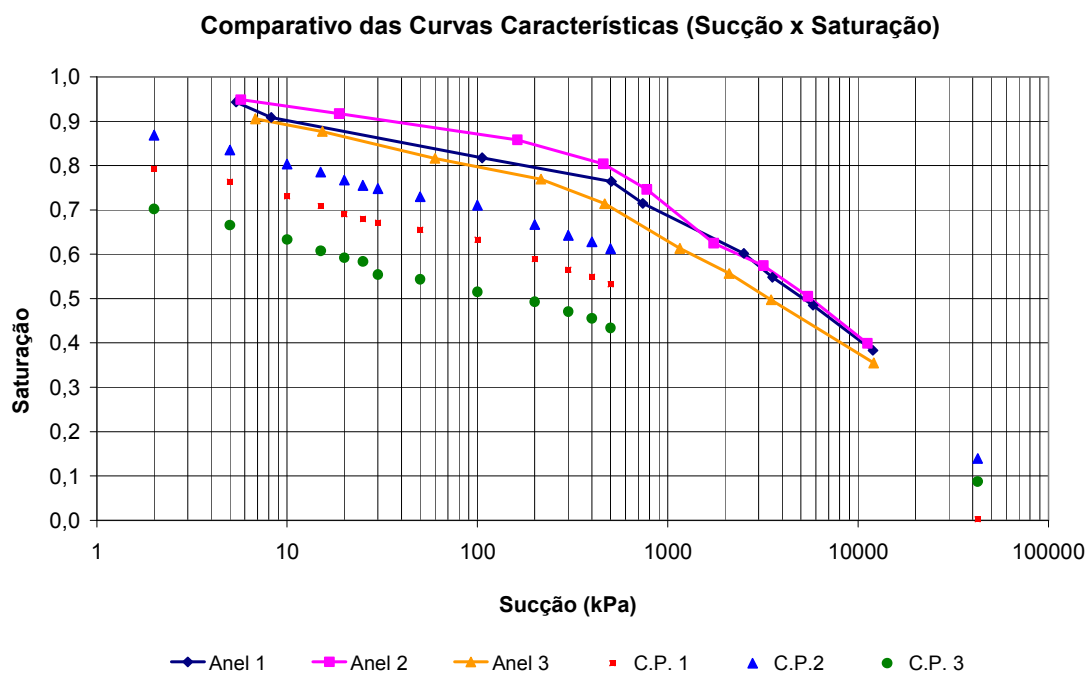


Figura: 5.27: Comparativo das curvas características (sucção x saturação) obtidas pelo Papel Filtro e Placa de Sucção e de Pressão

Na figura 5.28 é apresentado um comparativo da relação índice de vazios x sucção para as amostras ensaiadas pelo Método do Papel Filtro e pela Placa de Sucção e de Pressão.

Nota-se uma variação no valor do índice de vazios para os anéis ensaiados pelo Papel Filtro (anel 1, 2 e 3) e para os corpos de prova ensaiados pela Placa de Sucção e de Pressão (C.P.1, C.P.2 e C.P.3).

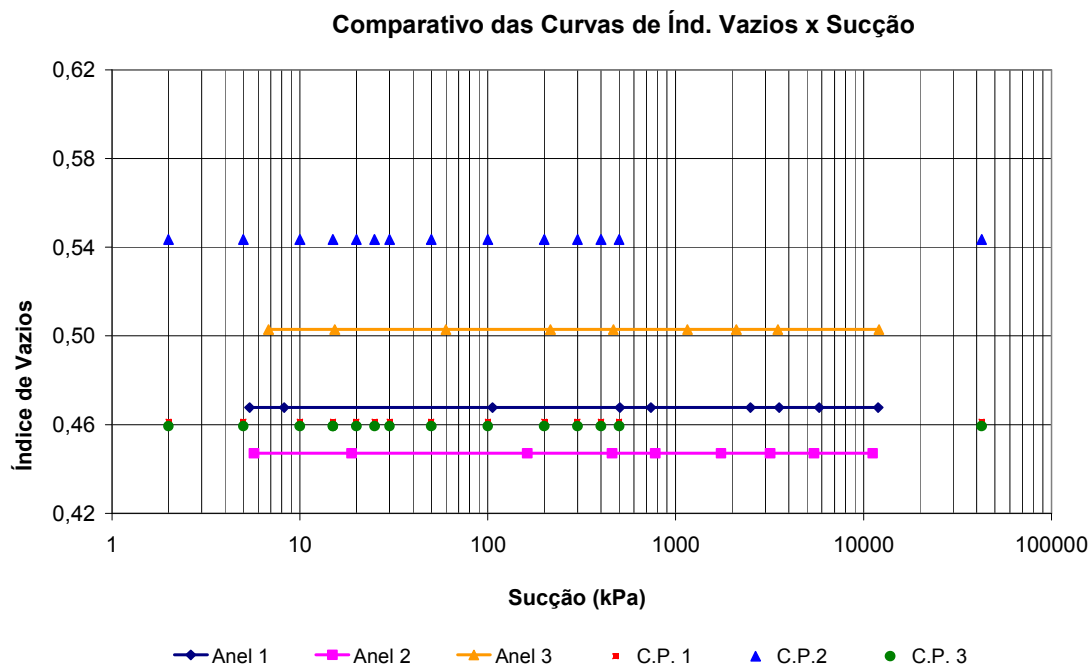


Figura: 5.28: Comparativo do gráfico de índice de vazios x sucção obtida pelo Papel Filtro e Placa de Sucção e de Pressão

5.4 Modelagem Numérica Através do Uso do VADOSE/W

5.4.1 Breve Resumo do VADOSE/W

VADOSE/W é um software de elementos finitos usado para analisar o fluxo de água que atravessa a superfície do solo para a zona não saturada e zona de fluxo subterrâneo. O software permite analisar problemas simples até os mais complexos, como:

- Projeto e monitoramento de um solo homogêneo ou heterogêneo usado como camada de cobertura de minas e aterros sanitários;
- Desenvolvimento da distribuição da poropressão para a análise da estabilidade de taludes naturais ou não;
- Determinação das taxas de infiltração, evaporação e transpiração de projetos de agricultura, irrigação ou sistemas naturais;
- Previsão da difusão e do decaimento de gases através da zona não saturada.

VADOSE/W é uma extensão do programa SoliCover e usa o método de Penman-Wilson para determinar a evaporação real como função da pressão da água no solo. Wilson (WILSON, 1990) modificou o método de Penman (1948) para fazer a evaporação real ser dependente da umidade relativa do solo e do ar.

O VADOSE/W gera uma malha de solo de cobertura baseada na espessura e tipo de solo, modela solos com diversas estratigrafias, usa períodos de tempo que não são fixos, estima propriedades do solo baseada no tamanho dos grãos ou outras funções do solo fornecidas pelo usuário, usa um banco de dados climático global ou informações climáticas fornecidas pelo usuário, especifica a radiação solar ou evaporação potencial de acordo com as informações climáticas ou estima este componente de energia, além de importar e exportar dados de outros programas computacionais, como bitmap, excell, etc. (GEO SLOPE, 2009).

Para utilizar o VADOSE/W, o usuário deve definir a geometria gráfica, gerar a sua malha de elemento finito e, em seguida, definir a camada superficial e adicionar uma malha na mesma; especificar as propriedades dos materiais e os dados climáticos por colagem, importação ou digitação de dados; aplicar as condições de contorno associadas ao clima ou valores específicos de temperatura, pressão total ou unidade de fluxo de água, ou um potencial de infiltração superficial; definir a escala de dados automaticamente; e definir as condições iniciais para a análise desenhando o lençol freático e temperaturas nodais.

Os resultados da superfície do solo incluem: precipitação, radiação, evaporação potencial e real, runoff, infiltração, transpiração real e profundidade do gelo. Os resultados do balanço hídrico incluem: precipitação, runoff, fluxo da superfície, evaporação, armazenamento, balanço hídrico e transpiração das plantas. Os resultados da camada de cobertura incluem: volume do fluxo de líquido e de vapor, volume total em toda a camada e massa total de gás em toda a camada.

5.4.2 Resultados Obtidos com o Uso do VADOSE/W

Neste item são apresentadas as modelagens de camadas monolíticas, camadas monolíticas evapotranspirativas, barreiras capilares, barreiras capilares evapotranspirativas com o solo da jazida antiga e o mesmo solo com adição de bentonita para camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos.

Foram realizadas oito simulações de tipos de camada de cobertura:

- Camada de cobertura monolítica com o solo da amostra 01 (solo da jazida antiga) com espessura de 60 cm;
- Camada de cobertura monolítica evapotranspirativa com o solo da amostra 01 (solo da jazida antiga) com espessura de 60 cm;
- Camada de cobertura monolítica com o solo da amostra 02 (solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita) com espessura de 60 cm;
- Camada de cobertura monolítica evapotranspirativa com o solo da amostra 02 (solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita) com espessura de 60 cm;
- Barreira capilar com o solo da amostra 01 sobreposto a um solo arenoso com espessuras de 60 cm e 30 cm, respectivamente; e
- Barreira capilar evapotranspirativa com o solo da amostra 01 sobreposto a um solo arenoso com espessuras de 60 cm e 30 cm, respectivamente
- Barreira capilar com o solo da amostra 02 sobreposto a um solo arenoso com espessuras de 60 cm e 30 cm, respectivamente; e
- Barreira capilar evapotranspirativa com o solo da amostra 02 sobreposto a um solo arenoso com espessuras de 60 cm e 30 cm, respectivamente.

A vegetação usada nas camadas evapotranspirativas foi uma gramínea, que é a utilizada nos exemplos do VADOSE/W.

Quanto a precipitação, foram adotados os dados da Estação Meteorológica do Maracanã obtidas do Sistema de Meteorologia do Estado do Rio de Janeiro (SIMERJ). Esta estação foi escolhida, pois é a estação que está localizada mais próxima de Niterói e que possui dados anuais mais completos. Na figura 5.29 é apresentado o gráfico de precipitação acumulada obtido pelo VADOSE/W.

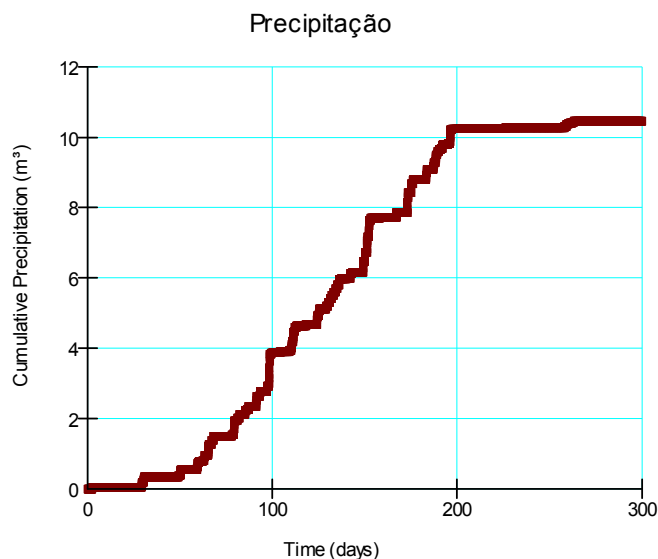


Figura 5.29: Precipitação acumulada ocorrida no local da camada de cobertura

No ANEXO B estão apresentados os valores de entrada usados para a modelagem no Programa VADOSE/W, inclusive as informações de precipitação.

São apresentados gráficos de armazenamento hídrico e de evaporação na superfície para cada camada de cobertura. Os gráficos de transpiração, escoamento e infiltração não são apresentados, porém são essenciais para a determinação do balanço hídrico do local da camada de cobertura.

5.4.2.1 Camada de cobertura monolítica com o solo da amostra 01 (solo da jazida antiga)

Nas figuras 5.30 e 5.31 são apresentados os gráficos de armazenamento hídrico e de evaporação, respectivamente, para a camada de cobertura monolítica de 0,60 m de espessura composta pelo solo da amostra 01.

A quantidade de água armazenada na camada de cobertura (figura 5.30) diminui cerca de 1 m^3 até 100 dias e com uma variação muito pequena no restante do tempo. Tal fato pode ser explicado pela evaporação, pois observando a figura 5.31, se verifica uma evaporação inicial de $0,001 \text{ mm}$ de água por m^2 , que mantém constante até o centésimo dia, e a partir daí, a evaporação cresce gradativamente. No ducentésimo dia, o solo passa perder $0,014 \text{ mm}$ de água por m^2 , ficando esse valor constante até o final. No entanto, o gráfico de precipitação

(figura 5.29) indica a maior precipitação acumulada de 10 m^3 de 100 a 200 dias, que não fica evidenciado nos gráficos de água armazenada e evaporação.

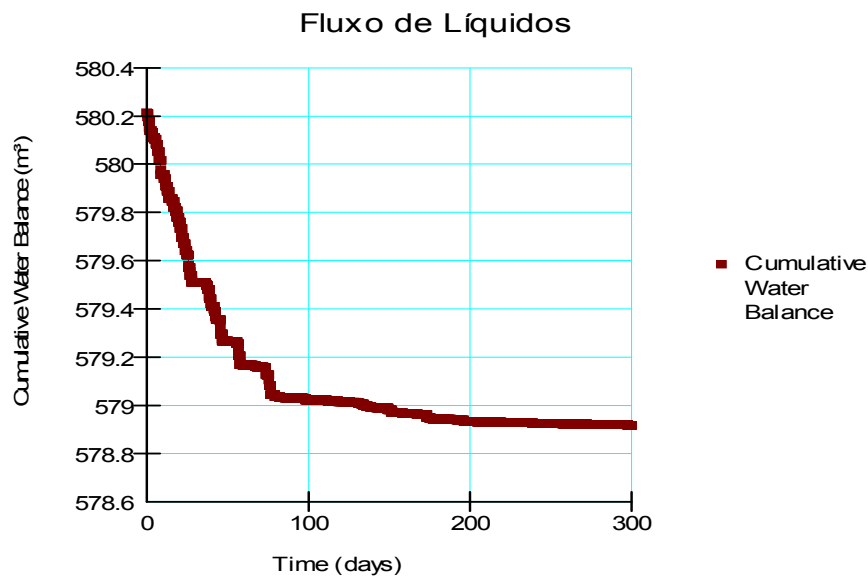


Figura 5.30: Armazenamento de água da camada monolítica composta pelo solo da amostra 01

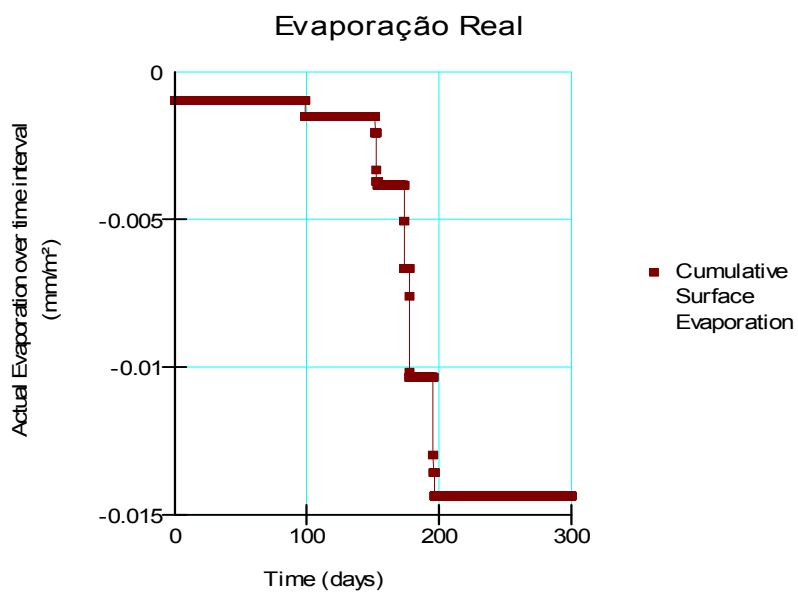


Figura 5.31: Evaporação da camada monolítica composta pelo solo da amostra 01

5.4.2.2 Camada de cobertura monolítica evapotranspirativa com o solo da amostra 01 (solo da jazida antiga)

Nas figuras 5.32 e 5.33 são apresentados os gráficos de armazenamento hídrico e evaporação, respectivamente, para a camada de cobertura monolítica evapotranspirativa. Essa camada tem uma espessura de 0,60 m, é composta com o solo da amostra 01 e apresenta a sua superfície coberta por vegetação gramínea.

A quantidade de água armazenada na camada de cobertura (figura 5.32) mantém o mesmo padrão exibido na simulação anterior, isto é, diminui cerca de 1 m^3 até 100 dias e com variação muito pequena no restante do tempo. No entanto, a evaporação (figura 5.33), mantém o mesmo comportamento inicial, onde se verifica uma evaporação de $0,001 \text{ mm}$ de água por m^2 , permanecendo constante até o centésimo dia. A partir daí, a evaporação cresce gradativamente de forma escalonada, chegando no ducentésimo dia com uma taxa de perda de $0,01 \text{ mm}$ de água por m^2 , ficando esse valor constante até o final. Este menor valor de evaporação pode ser atribuído à presença de vegetação no topo da camada de cobertura. Como o armazenamento manteve o mesmo valor, parte da água pode ter sido perdida pela transpiração das plantas.

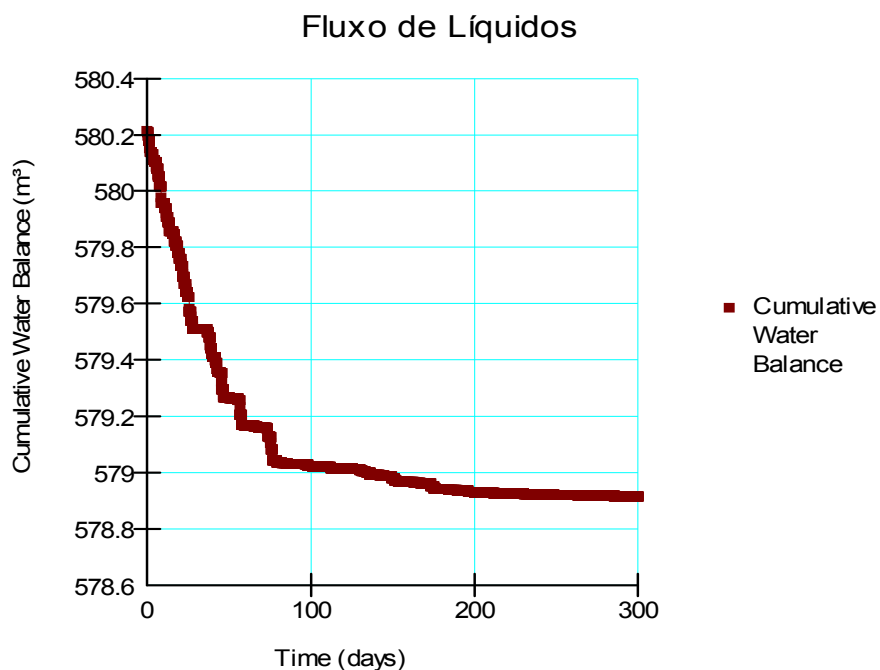


Figura 5.32: Armazenamento de água da camada monolítica evapotranspirativa composta pelo solo da amostra 01

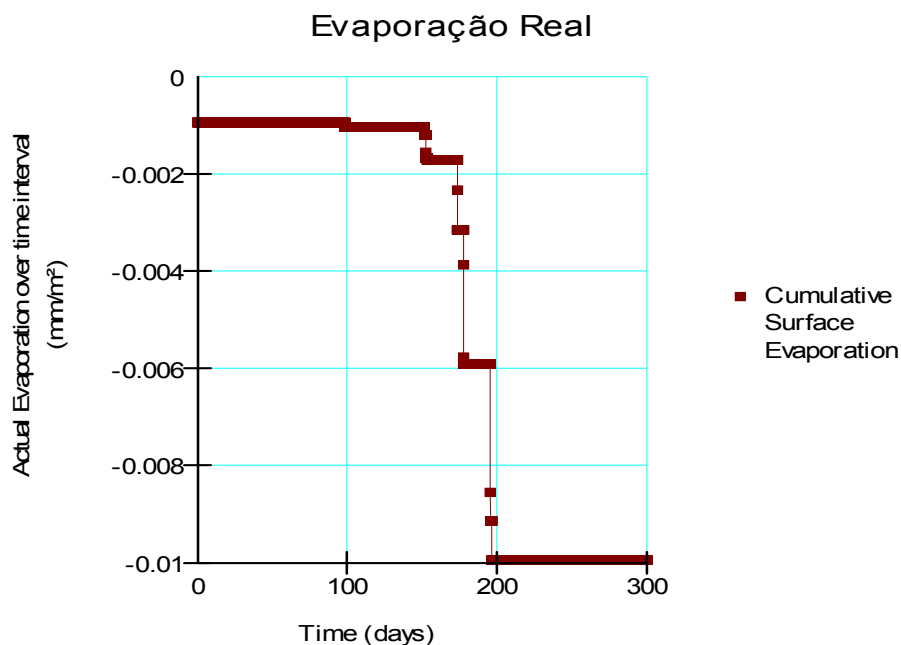


Figura 5.33: Evaporação da camada monolítica evapotranspirativa composta pelo solo da amostra 01

5.4.2.3 Camada de cobertura monolítica com o solo da amostra 02 (solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita)

Nas figuras 5.34 e 5.35 são apresentados os gráficos de armazenamento hídrico e evaporação, respectivamente, para a camada de cobertura monolítica formada pelo solo da amostra 02, solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita. A espessura dessa camada é de 0,60 m.

A quantidade de água armazenada na camada de cobertura de 550 m³ se mantém constante ao longo dos 300 dias, indicando o poder de absorção dessa mistura pela presença da bentonita. Por outro lado, a quantidade armazenada é menor do que no solo puro, pois a permeabilidade e a taxa de infiltração são menores. Isto permite um acúmulo de água na superfície e uma taxa de evaporação de 0,15 mm, dez vezes maior que a situação anterior, que permanece constante ao longo dos 300 dias.

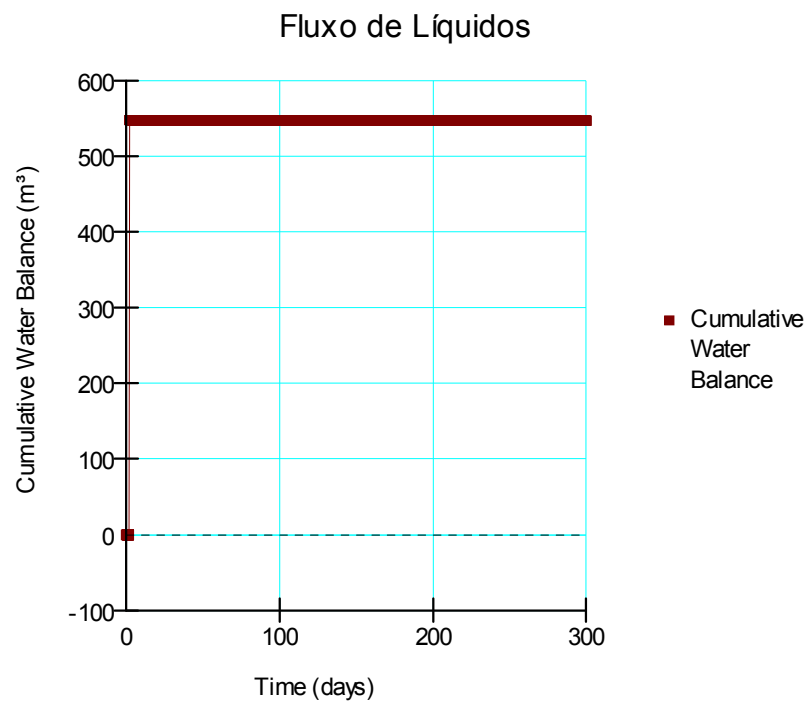


Figura 5.34: Armazenamento de água da camada monolítica composta pelo solo da amostra 02

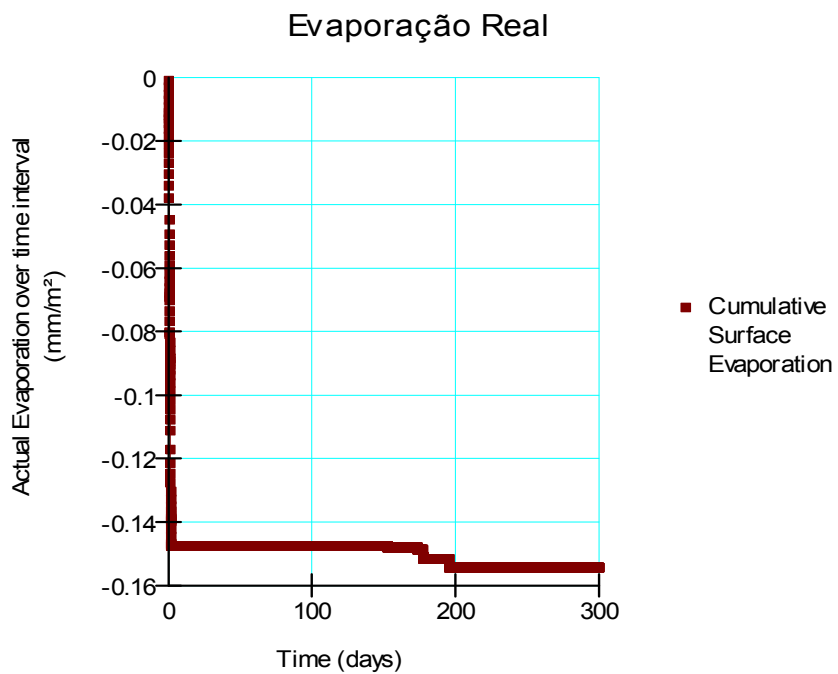


Figura 5.35: Evaporação da camada monolítica composta pelo solo da amostra 02

5.4.2.4 Camada de cobertura monolítica evapotranspirativa com o solo da amostra 02 (solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita)

Nas figuras 5.36 e 5.37 são apresentados os gráficos de armazenamento hídrico e evaporação, respectivamente, para a camada de cobertura monolítica evapotranspirativa formada pelo solo da amostra 02, solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita. Esta camada possui uma espessura de 0,60 m e é vegetada com gramíneas.

A quantidade de água armazenada na camada de cobertura é de 550 m³ valor que permanece constante e igual à simulação anterior, sem vegetação. Porém ocorre uma mudança no comportamento, ocorrendo uma evaporação inicial de 0,006 mm de água por m² e a partir do ducentésimo dia, a taxa de evaporação atinge valores de 0,012 mm de água por m² na superfície da camada de cobertura. Esses valores são muito inferiores ao encontrado com a simulação de solo com 5% de bentonita, relatado anteriormente, e relativamente próximos aos encontrados com o solo da amostra 01 com vegetação (item 5.4.2.2). Portanto, esse diferencial pode ser atribuído à presença de vegetação, que absorve grande quantidade de água e a devolve para a atmosfera pela transpiração.

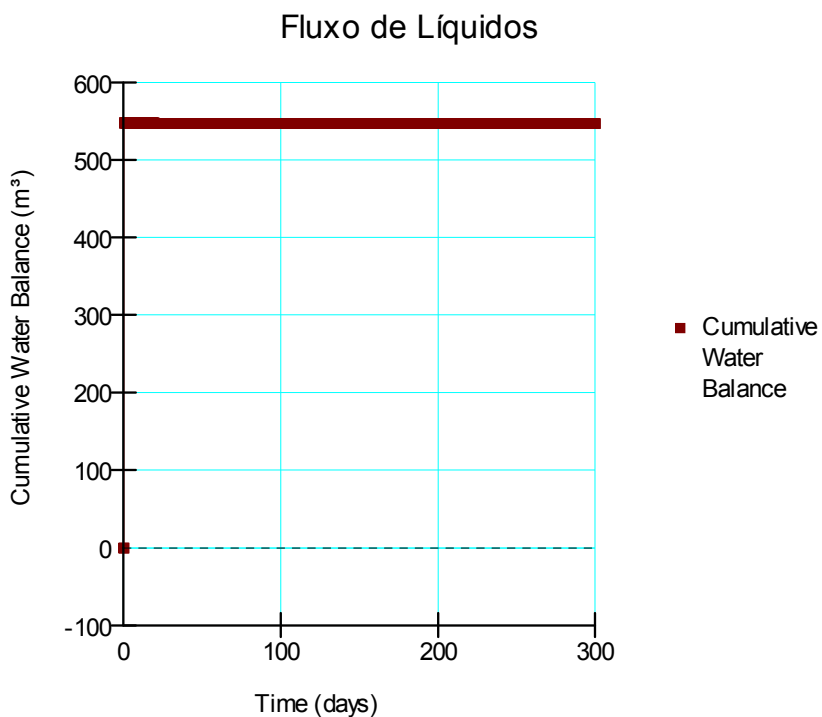


Figura 5.36: Armazenamento de água da camada monolítica evapotranspirativa composta pelo solo da amostra 02

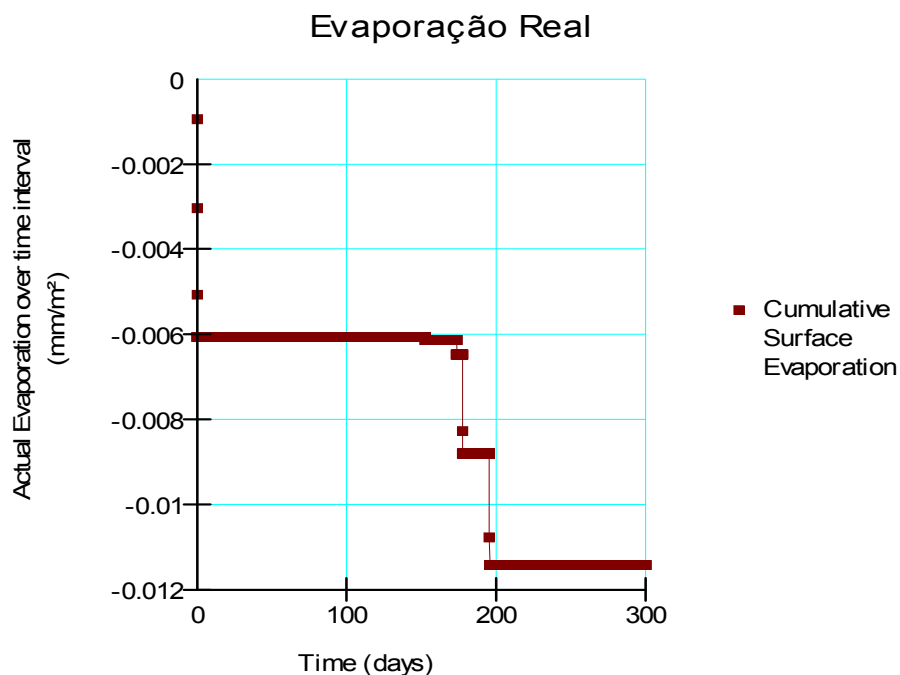


Figura: 5.37: Evaporação da camada monolítica evapotranspirativa composta pelo solo da amostra 02

5.2.4.5 Barreira capilar com o solo da amostra 01 sobreposto a um solo arenoso

Nas figuras 5.38 e 5.39 são apresentados os gráficos de armazenamento hídrico e evaporação, respectivamente, para a barreira capilar formada pelo solo da amostra 01, solo da jazida antiga, sobreposto a um solo arenoso com permeabilidade de 10^{-4} cm/s. A camada formada pelo solo da amostra 01 possui 0,60 m de espessura e a camada arenosa possui uma espessura de 0,30 m.

O solo armazena 820 m^3 de água, cerca de 40% mais que as camadas monolíticas e monolíticas evapotranspirativas formadas pelo solo da amostra 01, que pode ser explicado pela presença da camada arenosa, formando a barreira capilar, que retém mais água. O gráfico da evaporação (figura 5.39) apresenta valores positivos (cerca de 820 mm de água por m^2), isto é, o solo absorve a água. Sendo assim, o solo não se apresenta saturado, princípio essencial do funcionamento eficiente da barreira capilar.

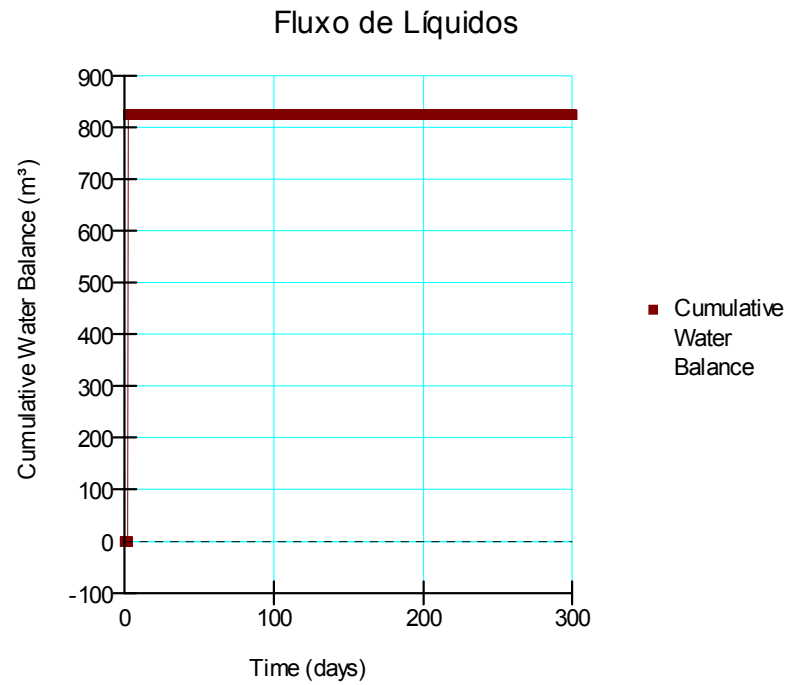


Figura 5.38: Armazenamento de água da barreira capilar formada pelo solo da amostra 01 e solo arenoso

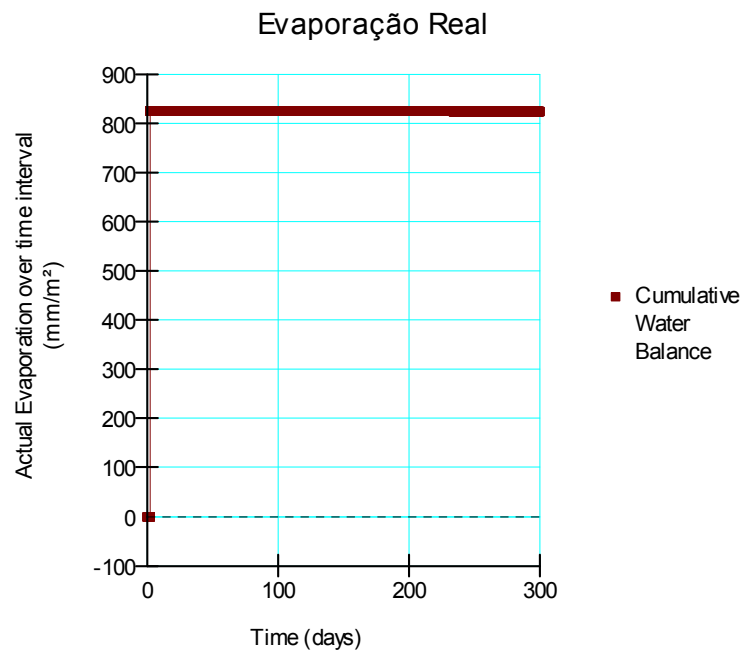


Figura 5.39: Evaporação da barreira capilar formada pelo solo da amostra 01 e solo arenoso

5.2.4.6 Barreira capilar evapotranspirativa com o solo da amostra 01 sobreposto a um solo arenoso

Nas figuras 5.40 e 5.41 são apresentados os gráficos de armazenamento hídrico e evaporação, respectivamente, para a barreira capilar evapotranspirativa formada pelo solo da amostra 01, solo da jazida antiga, com espessura de 0,60 m, sobreposto a um solo arenoso com permeabilidade de 10^{-4} cm/s e espessura de 0,30 m.

Os gráficos de armazenamento hídrico e evaporação são semelhantes aos gráficos apresentados para a barreira capilar formada pelo solo da amostra 01, não foi detectada mudança causada devido à presença da vegetação.

Como a taxa de evaporação é cerca de 820 mm de água por m^2 , ou seja, o solo está absorvendo água, presume-se que o mesmo apresente um valor de sucção.

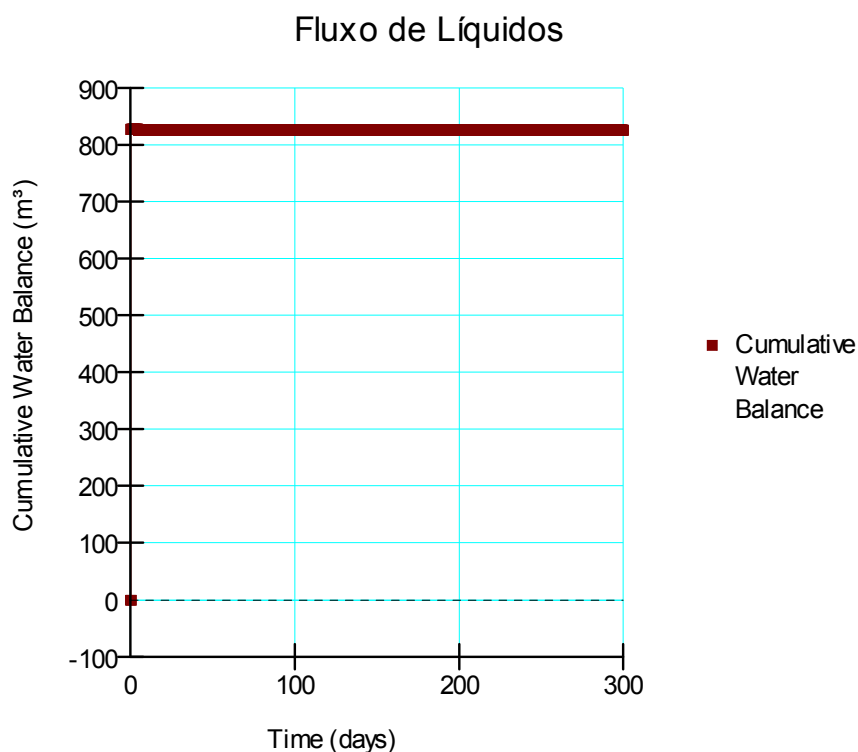


Figura 5.40: Armazenamento de água da barreira capilar evapotranspirativa formada pelo solo da amostra 01 e solo arenoso

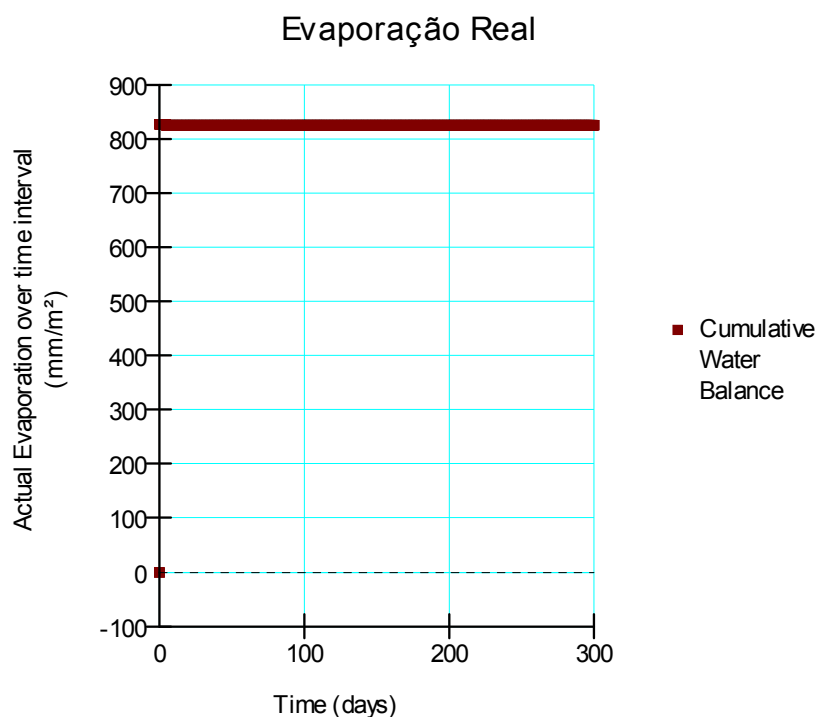


Figura 5.41: Evaporação da barreira capilar evapotranspirativa formada pelo solo da amostra 01 e solo arenoso

5.2.4.7 Barreira capilar com o solo da amostra 02 sobreposto a um solo arenoso

Nas figuras 5.42 e 5.43 são apresentados os gráficos de armazenamento hídrico e evaporação, respectivamente, para a barreira capilar formada pelo solo da amostra 02, solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, sobreposto a um solo arenoso com permeabilidade de 10^{-4} cm/s. A camada de solo da amostra 02 possui uma espessura de 0,60 m e a camada de solo arenoso tem 0,30 m de espessura.

O solo armazena 750 m^3 de água, cerca de 30% mais que as camadas monolíticas e monolíticas evapotranspirativas formadas pelo solo da amostra 02, que pode ser explicado pela presença da camada arenosa, formando a barreira capilar, que retém mais água. O gráfico da evaporação (figura 5.43) apresenta valores positivos (cerca de 750 mm de água por m^2), isto é, o solo absorve a água e não se apresenta saturado.

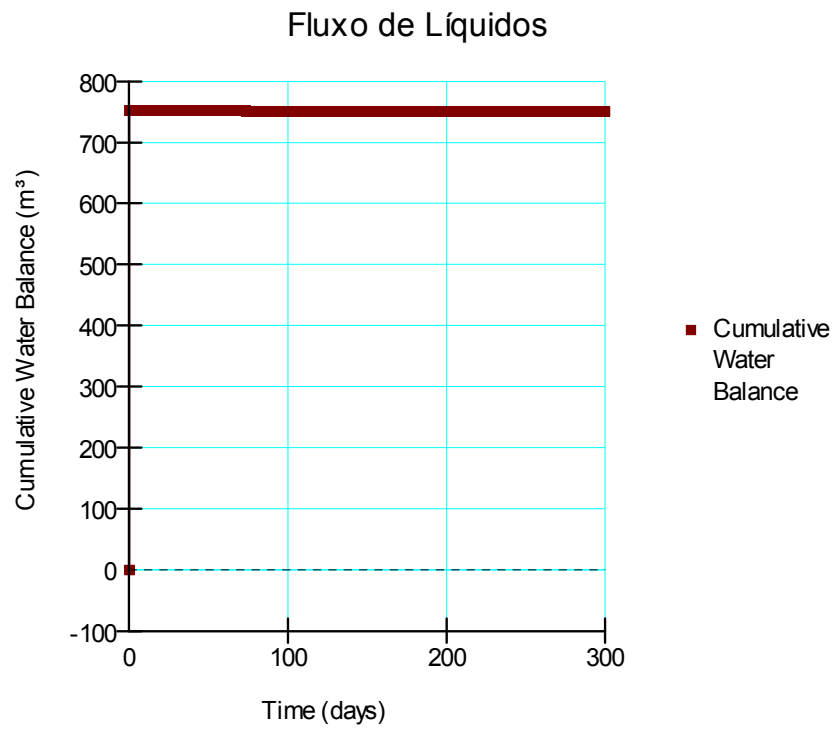


Figura 5.42: Armazenamento de água da barreira capilar formada pelo solo da amostra 02 e solo arenoso

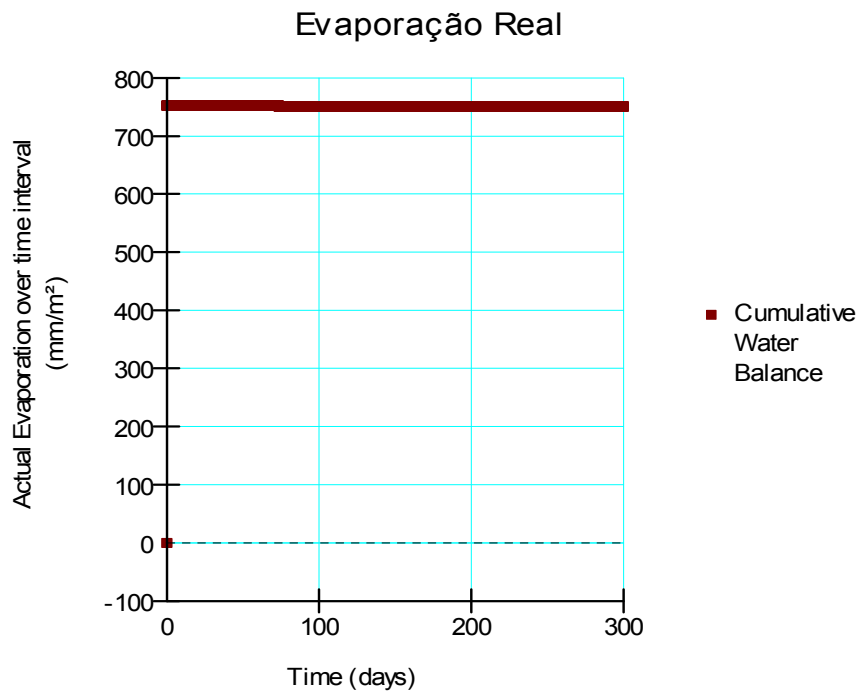


Figura 5.43: Evaporação da barreira capilar formada pelo solo da amostra 02 e solo arenoso

5.4.2.8 Barreira capilar evapotranspirativa com o solo da amostra 02 sobreposto a um solo arenoso

Nas figuras 5.44 e 5.45 são apresentados os gráficos de armazenamento hídrico e evaporação, respectivamente, para a barreira capilar evapotranspirativa formada por uma camada de solo da amostra 02 de 0,60 m de espessura sobreposta a uma camada de solo arenoso com permeabilidade de 10^{-4} cm/s e 0,30 m de espessura.

Tanto o gráfico de armazenamento de água, que apresenta um valor constante de 750 m^3 de água armazenada, e o de evaporação, que apresenta valores positivos e constantes a partir dos primeiros dias (cerca de 750 mm de água por m^2), apresentam os mesmos valores das figuras 5.43 e 5.42, respectivamente, não indicando influência da presença da vegetação na barreira capilar.

Não foi notada diferença nos gráficos apresentados nesse item e no item 5.4.2.7 quanto a evaporação e armazenamento de água. Como esta camada é uma barreira capilar evapotranspirativa, é esperado que ela apresente valores de transpiração devido à presença das plantas. Aparentemente o princípio da não saturação da barreira capilar é o fator preponderante.

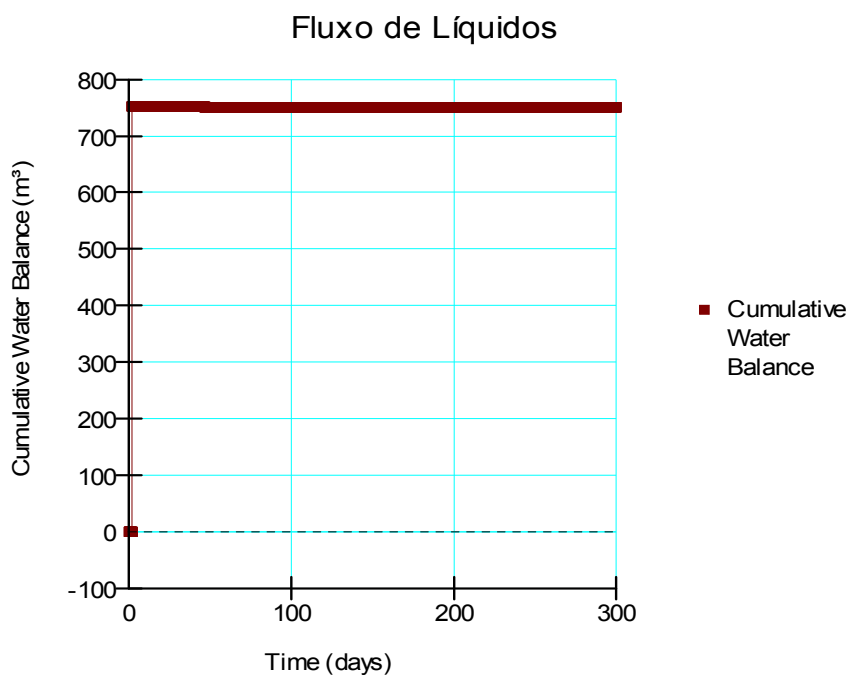


Figura 5.44: Armazenamento de água da barreira capilar evapotranspirativa formada pelo solo da amostra 02 e solo arenoso

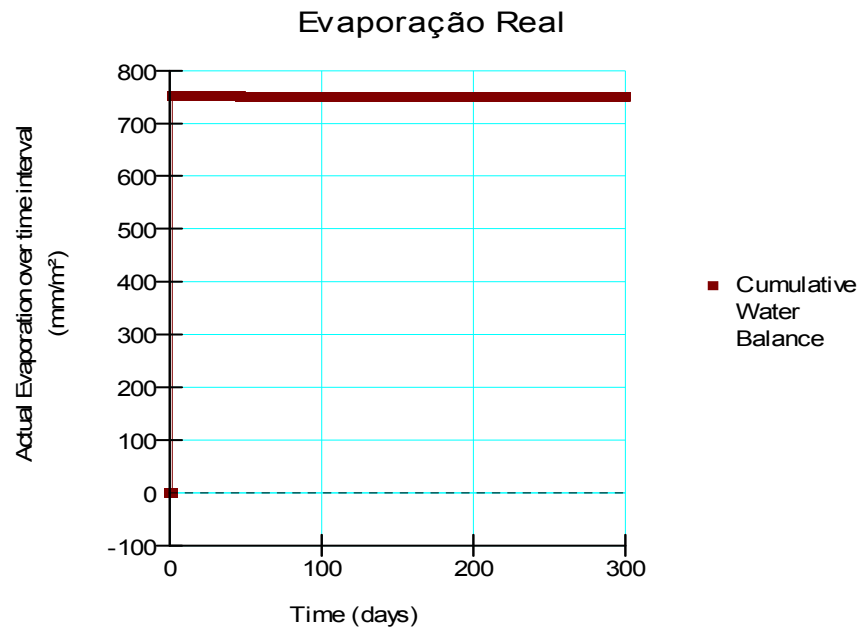


Figura 5.45: Evaporação da barreira capilar evapotranspirativa formada pelo solo da amostra 02 e solo arenoso

5.4.2.9 Considerações Finais

A tabela 5.14 apresenta um resumo das camadas de cobertura simuladas e os seus resultados.

Tabela 5.14: Resumo das simulações com o uso do Programa VADOSE/W

| Tipo de Camada | | Armazenamento Hídrico (m3) | | | | Evaporação (mm/m2) | | | |
|----------------|--|----------------------------|----------|----------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| | | 0 dia | 100 dias | 200 dias | 300 dias | 0 dia | 100 dias | 200 dias | 300 dias |
| 1 | Monolítica com o solo 01 | 580,2 | 579 | 578,9 | | -0,001 | -0,014 | | |
| 2 | Monolítica evapotranspirativa com o solo 01 | 580,2 | 579 | 578,9 | | -0,001 | -0,010 | | |
| 3 | Monolítica com o solo 02 | 550 | | | | -0,150 | -0,155 | | |
| 4 | Monolítica evapotranspirativa com o solo 02 | 550 | | | | -0,006 | -0,012 | | |
| 5 | Barreira capilar com o solo da amostra 01 | 820 | | | | 820 | | | |
| 6 | Barreira capilar evapotranspirativa com o solo da amostra 01 | 820 | | | | 820 | | | |
| 7 | Barreira capilar com o solo da amostra 02 | 750 | | | | 750 | | | |
| 8 | Barreira capilar evapotranspirativa com o solo da amostra 02 | 750 | | | | 750 | | | |

Para facilitar o entendimento dos resultados, foi realizada uma análise comparando as camadas sem vegetação com as camadas evapotranspirativas formadas pelo mesmo tipo de solo, comparando as diversas camadas sem vegetação entre si, comparando as camadas evapotranspirativas e comparando as camadas monolíticas com as barreiras capilares. Foi atribuída uma numeração para cada tipo de camada, conforme a tabela 5.14.

- Comparação das camadas sem vegetação com as camadas evapotranspirativas formadas pelo mesmo tipo de solo

Em relação ao armazenamento hídrico, os gráficos são semelhantes quando comparados os tipos de camada 1 com a camada 2, camada 3 com a camada 4, camada 5 com a camada 6 e camada 7 com a camada 8, de acordo com a tabela 5.14.

A camada 1 apresenta uma taxa de evaporação maior que a camada 2 a partir do ducentésimo dia, tal fato pode ser explicado pela presença da vegetação na camada 2, que absorve parte da água presente na superfície do solo, reduzindo evaporação, e a devolve para a atmosfera pela transpiração. O mesmo acontece para as camadas 3 e 4, porém em maiores valores. A camada 3, a partir do ducentésimo dia, apresenta um valor de evaporação 10 vezes maior que o valor da camada 4, camada evapotranspirativa.

Em relação à barreira capilar e barreira capilar evapotranspirativa formadas pelo mesmo tipo de solo (camadas 5 e 6 e camadas 7 e 8), elas apresentam o mesmo valor de evaporação. Como as camadas 6 e 8 são *evapotranspirativas*, é esperado que exista um valor de transpiração devido a presença da vegetação.

- Comparação das diversas camadas sem vegetação (camadas 1, 3, 5 e 7)

As camadas 3 e 7, formadas pelo solo com adição de bentonita, quando comparadas com as camadas 1 e 5, formadas pelo solo puro, possuem um menor valor de armazenamento hídrico. Esta redução é consequência da presença de bentonita, que diminui a permeabilidade do solo e, conseqüentemente, a infiltração de água, ocasionando um acúmulo de água na superfície da camada e maiores valores de evaporação.

- Comparação das diversas camadas evapotranspirativas (camadas 2, 4, 6 e 8)

As camadas evapotranspirativas formadas pelo solo com adição de bentonita possuem um valor de armazenamento hídrico menor que as camadas evapotranspirativas formadas pelo solo puro devido a presença da bentonita. Os valores de evaporação são maiores para as camadas formadas pelo solo com adição de bentonita, pois a água infiltra mais lentamente, favorecendo a evaporação na superfície da camada.

- Comparação das camadas monolíticas com as barreiras capilares formadas pelo mesmo tipo de solo

As barreiras capilares possuem maior capacidade de armazenamento hídrico devido à diferença de capilaridade dos materiais que a constituem. De acordo com os valores apresentados na tabela 5.14, elas não estão evaporando água, mas sim, absorvendo. Fato que comprova a não saturação da barreira capilar, princípio fundamental para o seu funcionamento, e a existência de um valor de sucção.

De acordo com as simulações apresentadas, as barreiras capilares foram as únicas barreiras que demonstraram uma absorção de água e apresentaram maior capacidade de armazenamento hídrico. Mostraram-se, conforme as simulações, como as melhores camadas de cobertura para serem usadas no local estudado.

Observa-se que o gráfico de precipitação (figura 5.29) não exerce influência significativa nos gráficos de armazenamento hídrico e evaporação.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

A caracterização e avaliação do desempenho dos dois solos usados como camadas de cobertura foram realizados por meio de ensaios de caracterização, limites de Atterberg, ensaio de compactação, determinação da densidade real dos grãos, além dos ensaios de permeabilidade de carga variável, ensaio do papel filtro e Placa de Sucção e de Pressão. Também foi feita uma comparação com os resultados obtidos por Barroso (2008) que também estudou o solo usado como camada de cobertura do Aterro Sanitário de Morro do Céu.

De acordo com os resultados obtidos na caracterização, pôde-se notar uma semelhança entre as curvas granulométricas da jazida antiga e da amostra nº 2 estudada por Barroso (2008). A atuação da bentonita ficou refletida no acréscimo do percentual da fração de solo fino, quando comparadas às amostras puras, além de aumentar o índice de plasticidade dos solos.

No ensaio de compactação, o solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, possui uma umidade ótima superior aos valores obtidos por Barroso (2008), porém apresenta um valor menor de massa específica aparente seca máxima, o que evidencia a influência da bentonita no comportamento do solo.

A permeabilidade foi determinada usando o permeâmetro de carga variável. O valor encontrado para o solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita é menor que o resultado obtido por Barroso (2008), que caracteriza o solo puro da jazida antiga.

Tornou-se claro o comportamento da bentonita nas curvas características obtidas pelo Método do Papel Filtro, pois o solo com a adição da mesma apresentou uma maior capacidade de retenção de água quando comparado com o solo puro.

As curvas características obtidas pela Placa de Sucção com Placa de Pressão apresentaram um formato semelhante, porém uma diferença significativa no valor da umidade volumétrica ou gravimétrica para uma mesma sucção. Tal fato deve ser investigado com precisão.

Quando comparados os resultados do Método do Papel Filtro com a Placa de Sucção e Placa de Pressão, somente uma curva obtida pela Placa de Sucção com Placa de Pressão apresentou resultados similares com as curvas obtidas pelo Método do Papel Filtro. Por outro

lado, o Método do Papel Filtro alcançou elevados valores de sucção, até 10.000 kPa, enquanto a Placa de Pressão chegou até 500 kPa, valor usual para esse método.

Em relação ao uso do Programa VADOSE/W, as camadas de cobertura evapotranspirativas apresentaram menores valores de evaporação e valores iguais de armazenamento de água quando comparadas com as camadas sem vegetação e formadas pelo mesmo tipo de solo. Esta diferença de evaporação está associada à presença da vegetação, que absorve água da superfície da camada e a devolve para a atmosfera pela transpiração. Os solos com adição de bentonita apresentaram menor armazenamento hídrico e maiores taxas de evaporação devido a menor permeabilidade do material, reduzindo a infiltração de água e favorecendo a evaporação na superfície. As barreiras capilares, quando comparadas com as outras camadas, apresentaram maior capacidade de armazenamento devido à diferença de capilaridade dos materiais e não apresentaram evaporação, mas sim, absorção de água. Tal fato demonstra a não saturação da barreira, que é o princípio fundamental para o seu funcionamento. Assim as barreiras capilares, pela presente simulação, são as mais indicadas para serem adotadas.

O Programa VADOSE/W não mostrou uma correlação direta da precipitação acumulada e armazenamento na camada, o que seria esperado. Ele também não permite a determinação do grau de saturação ao longo da camada, que seria importante para avaliar se houve ou não infiltração de água para a massa de resíduos e para a determinação do tipo de camada de cobertura mais eficiente para o local estudado.

6.2 Recomendações

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que o solo com a adição de bentonita apresenta um melhor comportamento que o solo puro da jazida antiga. Porém é recomendado que a utilização de bentonita junto ao solo também deva ser analisada do ponto de vista econômico, levando-se em conta a quantidade ideal de bentonita a ser adicionada ao solo.

Mais estudos devem ser realizados sobre as camadas de cobertura utilizadas atualmente no Aterro Sanitário Morro do Céu, principalmente em relação à determinação da curva de compactação, da permeabilidade saturada e da curva característica, a fim de avaliar se este solo apresenta um comportamento eficaz para ser usado como camada de cobertura.

Mais pesquisas contemplando dois ou mais métodos de determinação da curva característica devem ser desenvolvidas com objetivo de comparar valores ou de um método medir com precisão a faixa de medição de valores de sucção onde o outro método não se mostre muito preciso. Desta forma, poderá ser obtida uma curva característica que seja precisa para todos os valores de sucção ou avaliar se as curvas possuem valores semelhantes.

Seria interessante obter gráficos de transpiração, infiltração, grau de saturação e escoamento ao longo da camada de cobertura com uso do Programa VADOSE/W para a determinação precisa do balanço hídrico do local e avaliação do funcionamento das camadas de cobertura, isto é, se ela é capaz de armazenar a água proveniente da precipitação.

Um estudo de campo executando os vários tipos de camadas estudados com monitoramento ao longo de pelo menos um ano é recomendado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 6459: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7182: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

American Society for Testing and Materials. ASTM – D 5298 – 03: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. 2003.

BARBOUR, S.L., 1998. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, p. 873-894.

BARROS, M.C., 2005. Avaliação de um Resíduo de Construção Civil Beneficiado como Material Alternativo para Sistema de Cobertura. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

BARROSO, I. M., 2008. Camadas de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos: Estudo Preliminar de Casos. Dissertação de Mestrado. Programa de pos-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. UERJ. Rio de Janeiro, Brasil.

BORMA, L. S., MENDONÇA, R. M. G., SOUZA, V. P., 2002. Processo de mitigação da formação de drenagens ácidas utilizando coberturas secas. Relatório Técnico elaborado pelo CETEM.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T., 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. Journal of Irrigation and Drainage Division, v.92, p.61-88.

CALLE, J. A. C., 2000. Análise de Ruptura de Talude em Solo Não Saturado. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Paulo, Brasil.

CALLE, J. A. C., 2005. Investigação dos Parâmetros de Resistência no Laboratório e no Campo de Resíduos Sólidos. Relatório 2.2005, PROJETO PROBAL 178/04, CAPES – DAAD.

CAMPOS, I.C.O., GUIMARAES, E.M e CARVALHO, J.C. (2008). Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos. Universidade de Brasília. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg). Búzios, RJ, 2008 – CD ROM

- CHANDLER, R. J., GUTIERREZ, C. I., 1986. "The filter -paper method of suction measurement". *Geotechnique* 36, pp 265 -268.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M.S., MONTGOMERY-SMITH, G., 1992. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise-buildings. *Proceeding of the Institute of Civil Engineering*, N° 2, pp. 82-89,
- CHILDS, E.C. & COLLIS-GEORGE, N., 1950. The permeability of porous materials. *Proc. Roy. Soc., Ser. A* 201:392-405.
- DIENE, A. A., 2004. Desenvolvimento de tensiômetros para sucção elevada, ensaiados em lisímetros de laboratório. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.*
- DNER-ME 093/94 - Solos - Determinação da densidade real dos grãos
- EDIL, T. B.; MOTAN, S. E. & TOHA, F. X., 1981. *Mechanical Behavior and Testing Methods of Unsaturated Soils, Laboratory Shear Strength of Soil*, ASTM, STP 740, 114-129.
- FREDLUND, D. G., 1979. Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 16 (3), 521-531.
- FREDLUND, D. G. & MORGENSTERN, N. R., 1977. Stress State Variables for Unsaturated Soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, 103 GT5, 447-446.
- FREDLUND, D. G., & RAHARDJO., H., 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, USA.
- FREDLUND, D. G., XING, A., 1994. "Equations for the soil -water characteristic curve" *Can. Geotech. J.* 31 pp 521 -532.
- FUTAI, M. M., 2002. *Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-Saturados: Aplicação a um Caso de Voçorocamento*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- GEO SLOPE. Disponível em: <http://www.geo-slope.com/products/vadosew2007.aspx>. Acesso em: 02 fev. 2009
- GERSCOVICH, D. M. S., 2001. "Equações para modelagem da curva característica aplicadas a solos brasileiros". 4º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados – Porto Alegre – Brasil, 76-91.
- GOMES, J. E. S., 2007. *Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- HILLEL, D., 1971. *Soil and Water – Physical principles and processes*. Academic Press, 288p.

HUSE, K., 2007. Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros. Dissertação de mestrado em Ciências em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

IBAM, 2001. Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. 15ed. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. ISBN 85-09-00113-8.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE. Site. Acesso em 21/10/2008.
<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>

IPT, 2000. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 2ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. (Publicação IPT 2622).

KAVAZANJIAN JR., E and DOBROWOLSKI, J.G., 2003. Cost and Performance Evaluation of alternative Final Covers. Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste management and Landfill Symposium CD-ROM.

KOERNER, R. M. and DANIEL, D. E., 1997. Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps, 1 ed. New York, ASCE PRESS.

LEE, H.C. and WRAY, W.K., 1995. Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable. Unsaturated Soils, Vol. 2, 615 - 622.

LOPES, M.B.L., 2006. Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.

MARINHO, F. A. M., 1997. Medição de sucção em solos. 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não-Saturados. Rio de Janeiro, RJ. Vol. 2, pp. 373-397.

MARINHO, F. A. M. & CHANDLER, R. J., 1994. Discussão - A New Instrument for Measuring Soil Moisture Suction. Géotechnique, London, v. 44, n. 3, p. 551-552.

MARINHO, F. A. M. & PINTO, C.S., 1997. "Soil suction measurement using a tensiometer". Proc., Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, pp. 249-254.

MARINHO, F. A. M. e PEREIRA, J. H. F., 1998. "Mini -curso: Solos não saturados". XI Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica – Brasília – Brasil.

MEIRA, F.F.D.A., COUTINHO, R.Q. e CANTALICE, J.R.B., 2008. Caracterização Geológica-geotécnica e obtenção das curvas características de uma encosta ocupada pertencente a formação barreiras em Recife – Pernambuco. Universidade Federal de Pernambuco. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg). Búzios, RJ, 2008 – CD ROM

MILLER, C.J.; YESILLER, N.; YALDO, K. & MERAYYAN, S., 2002. Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.128, nº 9. p.733-742.

NETO, O.F. e VILAR, O.M., 2008. Evolução da sucção com a variação do grau de compactação de um solo não saturado. Universidade de São Paulo. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg). Búzios, RJ, 2008 – CD ROM

PIMENTEL, V.E., 2006. “Landfill Covers with Geosynthetics”. Simpósio Internacional de Tecnologia de Tratamento de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, Brasil, 24-27 Abril 2006.

PINTO, C. DE S., 2000. Curso Básico de Mecânica dos Solos. São Paulo: Oficina dos Textos.

PIRES, J.A.C., 2007. Estudo de barreira de proteção com solo compactado em célula experimental no Aterro Sanitário de Rio das Ostras (RJ). Dissertação de Mestrado. Programa de pos-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. UERJ. Rio de Janeiro, Brasil.

REICHARDT, K., 1985. Processos de Transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Fund. Cargill, Campinas, 466p.

REICHARDT, K., 1987. A água em sistemas agrícolas. Editora Manole.

RICHARDS, L.A., 1931. “Capillary conduction of liquids through porous mediums”, Physics, 1: 318-333.

RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B., 1993. A new instrument for measuring soil moisture suction. Geotechnique, 43:321-324.

SHACKELFORD, C. D., 1997. “Modeling and Analysis in environmental geotechnics: An overview of practical applications”. Second International Congress on Environmental Geotechnics, V.3, pp. 1375-1404, Osaka, Japan, 5-8, Nov.

SIMÕES, G.F., CATAPRETA, C.A.A. e CAMPOS, F.Q.V., 2008. Avaliação Qualitativa de Dois Sistemas de Cobertura Final de um Aterro Sanitário Experimental. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. CD ROM.

SISTEMA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO (SNIS), 2005. Pesquisa realizada pelo Ministério das Cidades.

SOUZA, V.P., BORMA, L. S., MENDONÇA, R. M.G., 2003. “Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez”. Seminário Brasil – Canadá de Recuperação Ambiental de áreas Mineradas, Florianópolis, SC.

SWARBRICK, G. E., 1995. “Measurement of soil suction the filter paper method”. Unsaturated Soils, Vol 2, 653 – 658.

TAYLOR, D., 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S., 1993. Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues. IRWIN/ McGRAWHILL, USA.

US EPA, US Environmental Protection Agency – Part V: Ensuring Long-Term Protection, Chapter 11 : Performing Closure and Post-Closure Care. Disponível em: <<http://www.epa.gov/industrialwaste/chapters/chap11.pdf>>. Acessado em 20-10-2006. 2003.

US EPA, US, 1994. Environmental Protection Agency – Seminar Publication – Design, Operation, and Closure of Municipal Solid Waste Landfill – EPA/625/R-94/008 September 1994

VAN GENUCHTEN, M. Th., 1980. “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”. *Soil Science and Society American Journal*, 44, pp.892-898.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G. & PUFHAL, D.E., 1999. The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till. *Géotechnique*, Vol. 49, n° 2, p. 143-159.

VIEIRA, A.M., 2005. Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. EPUSP. São Paulo, Brasil.

VILLAR, L. F. S., 2002. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro. 511p.

Wilson, G.W., 1990. Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada

WOODBURN J. A. and LUCAS B., 1995. “New approaches to laboratory and field measurement of soil suction”. In: *First International Conference on Unsaturated Soils/ Unsat’95*, vol.2, pp. 667 - 671, Paris.

ZORNBERG, M., LAFOUNTAIN, L., & CALDWELL, J.A., 2003. Analysis and Design of evapotranspirative Cover for hazardous Waste Landfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, no 6, pp. 427-438.

ZORNBERG, J.G. and MCCARTNEY, J.S., 2006. “Chapter 34: Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment.” In: *The Handbook of Groundwater Engineering*, 2nd Edition, Jacques W. Delleur (Editor-in-Chief), CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, in press

ANEXO A – ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA, LIMITES DE ATTERBERG, DENSIDADE, PERMEABILIDADE E COMPACTAÇÃO

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS 01 E 02

| | | | |
|------------|------------------|-----------------|------------|
| PROJETO: | Tese de Mestrado | AMOSTRA: | AM – 01 |
| LOCAL: | Morro do Céu | DATA DO ENSAIO: | 15/10/2008 |
| DESCRIÇÃO: | Jazida antiga | | |

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

| | | |
|-------------------|-------|-------|
| Cápsula Nº | 314 | 530 |
| Solo um.+tara(g) | 92,30 | 86,00 |
| Solo seco+tara(g) | 91,02 | 84,77 |
| Tara (g) | 17,62 | 14,05 |
| Água (g) | 1,28 | 1,23 |
| Solo seco (g) | 73,4 | 70,72 |
| Teor de umid.% | 1,74 | 1,74 |
| Média % | | 1,74 |

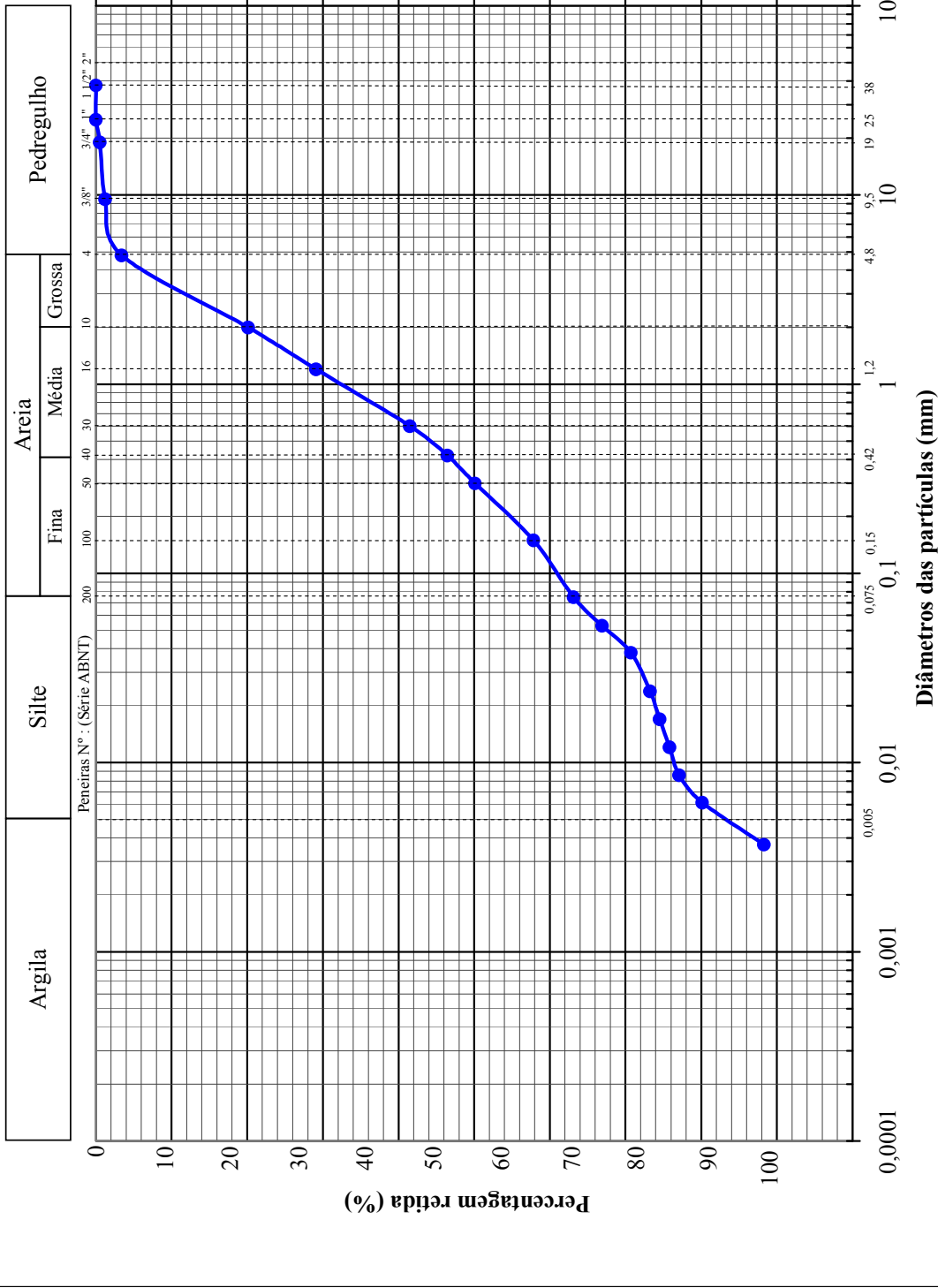
PENEIRAMENTO GROSSO

| Peneiras Nº(ASTM) | mm(ABNT) | Peso da am. seca (g) | | % pas. am. total |
|----------------------|----------|----------------------|----------|------------------|
| | | Retido | Passando | |
| 2" | 50 | 0,00 | | 100 |
| 1 1/2" | 38 | 0,00 | | 100 |
| 1" | 25 | 0,00 | | 100 |
| 3/4" | 19 | 11,44 | 2257,00 | 99 |
| 3/8" | 9,5 | 16,24 | 2240,76 | 99 |
| 4 | 4,8 | 49,11 | 2191,65 | 97 |
| 10 | 2 | 379,30 | 1812,35 | 80 |

PENEIRAMENTO GROSSO (g)

| | | | | | | |
|------------------------------|----------|--------|----------------------|----------|--------------------|------------------|
| Amostra total úmida | | 2300,0 | | | | |
| Solo seco retido #10 | | 456,1 | | | | |
| Solo úmido pas. #10=(A-B) | | 1843,9 | | | | |
| Solo seco pas.#10=C/(100+h) | | 1812,3 | | | | |
| Amostra total seca =B+D | | 2268,4 | | | | |
| PENEIRAMENTO FINO (g) | | | | | | |
| Peso da amostra úmida=PU | | 104,70 | | | | |
| Peso am.seca=PU/(100+h) | | 102,91 | | | | |
| | Peneiras | | Peso da am. seca (g) | | % pas. am. parcial | % pas. am. total |
| | Nº | mm | Retido | Passando | | |
| | 16 | 1,20 | 11,59 | 91,32 | 88,7 | 71 |
| | 30 | 0,60 | 15,98 | 75,34 | 73,2 | 58 |
| | 40 | 0,42 | 6,35 | 68,99 | 67,04 | 54 |
| | 50 | 0,30 | 4,71 | 64,28 | 62,46 | 50 |
| | 100 | 0,15 | 9,98 | 54,30 | 52,76 | 42 |
| | 200 | 0,075 | 6,81 | 47,49 | 46,15 | 37 |

Curva Granulométrica



| | | | |
|------------|-----------------------------------|----------|------------|
| PROJETO: | Tese de Mestrado | AMOSTRA: | AM - 02 |
| LOCAL: | Morro do Céu | DATA DO | 28/11/2008 |
| DESCRIÇÃO: | Jazida antiga com 5% de bentonita | ENSAIO: | |

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

| | | |
|-------------------|-------|-------|
| Cápsula N° | 580 | 366 |
| Solo um.+tara(g) | 87,34 | 99,29 |
| Solo seco+tara(g) | 85,13 | 96,80 |
| Tara (g) | 11,26 | 15,65 |
| Água (g) | 2,21 | 2,49 |
| Solo seco (g) | 73,87 | 81,15 |
| Teor de umid.% | 2,99 | 3,07 |
| Média % | 3,03 | |

PENEIRAMENTO GROSSO

| N°(ASTM) | Peneiras mm(ABNT) | Peso da am. seca (g) | | % pas. am. total |
|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------|
| | | Retido | Passando | |
| 2" | 50 | 0,00 | | 100 |
| 1 1/2" | 38 | 0,00 | | 100 |
| 1" | 25 | 0,00 | | 100 |
| 3/4" | 19 | 0,00 | | 100 |
| 3/8" | 9,5 | 5,36 | 1593,19 | 100 |
| 4 | 4,8 | 19,13 | 1574,06 | 98 |
| 10 | 2 | 206,11 | 1367,95 | 86 |

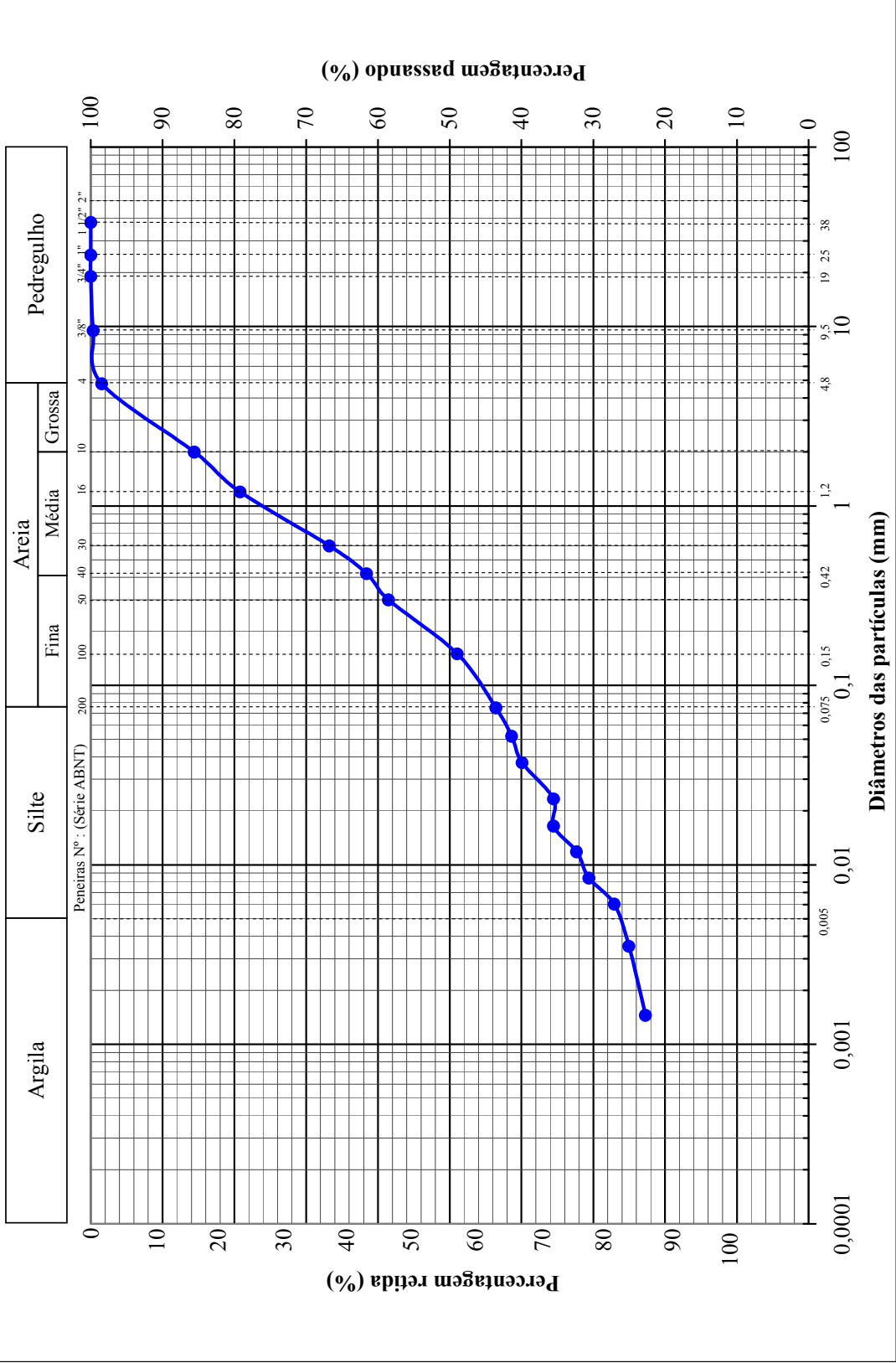
PENEIRAMENTO GROSSO (g)

| Amostra | Peneiras | N° | mm | Peso da am. seca (g) | | % pas. am. total |
|------------------------------|----------|-----|-------|----------------------|----------|------------------|
| | | | | Retido | Passando | |
| Amostra total úmida | | | | | 1640,0 | |
| Solo seco retido #10 | | | | | 230,6 | |
| Solo úmido pas. #10=(A-B) | | 16 | 1,20 | 7,17 | 89,07 | 79 |
| Solo seco pas.#10=C/(100+h) | | 30 | 0,60 | 13,96 | 75,11 | 67 |
| Amostra total seca =B+D | | 40 | 0,42 | 5,86 | 69,25 | 62 |
| PENEIRAMENTO FINO (g) | | | | | | |
| Peso da amostra úmida=PU | | 100 | 0,30 | 3,43 | 65,82 | 59 |
| Peso am.seca=PU/(100+h) | | 200 | 0,15 | 10,76 | 55,06 | 49 |
| | | | 0,075 | 6,06 | 49,00 | 44 |

SEDIMENTAÇÃO

| Data | Hora | Tempo (seg) | Temperatura (oC) | Leitura (L) | Correção devido à temper. | Leitura corrigida (LC) | Altura de queda (LQ) | Diâmetro dos grãos (mm) | % Passando am. total |
|-------------|-------|-------------|------------------|-------------|---------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| 22/10/08 | 10:16 | 30 | 27 | 1033,0 | -1,6 | 31,40 | 13,22 | 0,072 | 46 |
| 22/10/08 | 10:17 | 60 | 27 | 1030,0 | -1,6 | 28,40 | 13,77 | 0,052 | 41 |
| 22/10/08 | 10:18 | 120 | 27 | 1029,0 | -1,6 | 27,40 | 13,95 | 0,037 | 40 |
| 22/10/08 | 10:21 | 300 | 27 | 1026,0 | -1,6 | 24,40 | 13,79 | 0,023 | 36 |
| 22/10/08 | 10:26 | 600 | 27 | 1026,0 | -1,6 | 24,40 | 13,79 | 0,016 | 36 |
| 22/10/08 | 10:36 | 1200 | 26 | 1024,0 | -1,8 | 22,20 | 14,20 | 0,012 | 32 |
| 22/10/08 | 10:56 | 2400 | 25 | 1023,0 | -2,0 | 21,00 | 14,42 | 0,008 | 31 |
| 22/10/08 | 11:36 | 4800 | 24 | 1021,0 | -2,4 | 18,60 | 14,86 | 0,006 | 27 |
| 22/10/08 | 14:16 | 14400 | 23,5 | 1020,0 | -2,8 | 17,20 | 15,12 | 0,004 | 25 |
| 23/10/08 | 10:40 | 86280 | 24 | 1018,0 | -2,4 | 15,60 | 15,41 | 0,001 | 23 |
| Densímetro: | | 150,980 | | Gs = 2,567 | Proveta N° 19 | | Área = | 29,609 | cm ² |
| Volume: | | 42,040 | | | | | | | |

Curva Granulométrica



LIMITES DE ATTERBERG DAS AMOSTRAS 01 E 02

| | | | |
|------------|------------------|-----------------|------------|
| PROJETO: | Tese de Mestrado | AMOSTRA: | AM - 01 |
| LOCAL: | Morro do Céu | DATA DO ENSAIO: | 15/10/2008 |
| DESCRIÇÃO: | Jazida antiga | | |

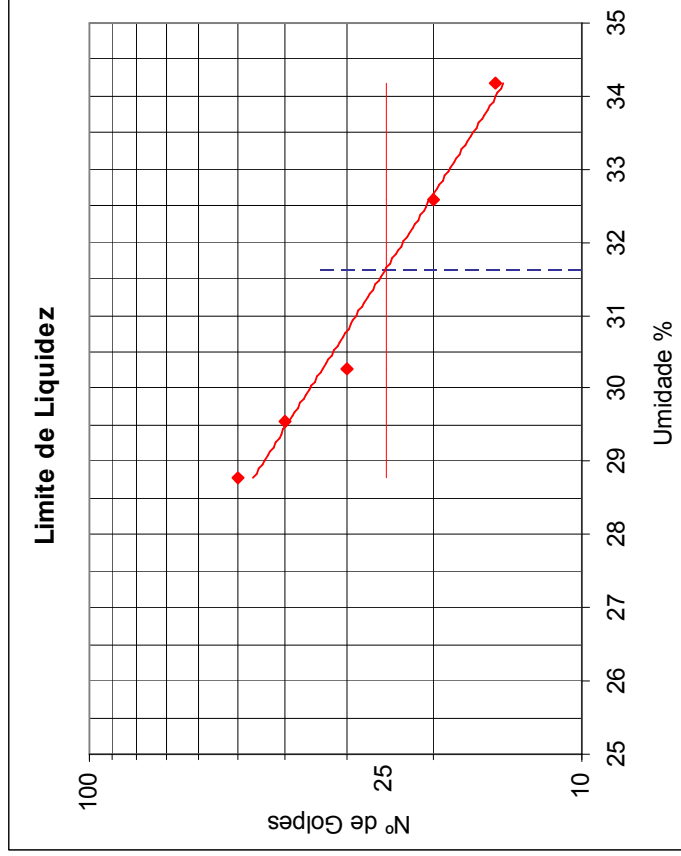
LIMITE DE LIQUIDEZ

| Cápsula N° | Cáp.e Solo Úmido (g) | Cáp. e Solo Seco (g) | Cápsula (g) | Água (g) | Solo Seco (g) | Teor de Umidade (%) | N° de Golpes |
|------------|----------------------|----------------------|-------------|----------|---------------|---------------------|--------------|
| 492 | 20,38 | 17,66 | 8,21 | 2,72 | 9,45 | 28,78 | 50 |
| 406 | 19,09 | 16,43 | 7,43 | 2,66 | 9,00 | 29,56 | 40 |
| 453 | 20,38 | 17,59 | 8,37 | 2,79 | 9,22 | 30,26 | 30 |
| 422 | 18,70 | 15,78 | 6,82 | 2,92 | 8,96 | 32,59 | 20 |
| 413 | 20,37 | 17,09 | 7,49 | 3,28 | 9,60 | 34,17 | 15 |

LIMITE DE PLASTICIDADE

| Cápsula N° | Cáp.e Solo Úmido (g) | Cáp. e Solo Seco (g) | Cápsula (g) | Água (g) | Solo Seco (g) | Teor de Umidade (%) | Limite de Plastic.(%) |
|------------|----------------------|----------------------|-------------|----------|---------------|---------------------|-----------------------|
| 457 | 8,65 | 8,45 | 7,36 | 0,20 | 1,09 | 18,35 | 17,64 |
| 437 | 9,67 | 9,47 | 8,32 | 0,20 | 1,15 | 17,39 | |
| 405 | 8,66 | 8,45 | 7,31 | 0,21 | 1,14 | 18,42 | |
| 445 | 9,74 | 9,54 | 8,37 | 0,20 | 1,17 | 17,09 | |
| 478 | 9,64 | 9,44 | 8,26 | 0,20 | 1,18 | 16,95 | |

| | |
|--------|-------|
| LL (%) | 31,62 |
| LP (%) | 17,64 |
| IP (%) | 13,98 |



| | | | |
|------------|-----------------------------------|-----------------|------------|
| PROJETO: | Tese de Mestrado | AMOSTRA: | AM - 02 |
| LOCAL: | Morro do Céu | DATA DO ENSAIO: | 28/11/2008 |
| DESCRIÇÃO: | Jazida antiga com 5% de bentonita | | |

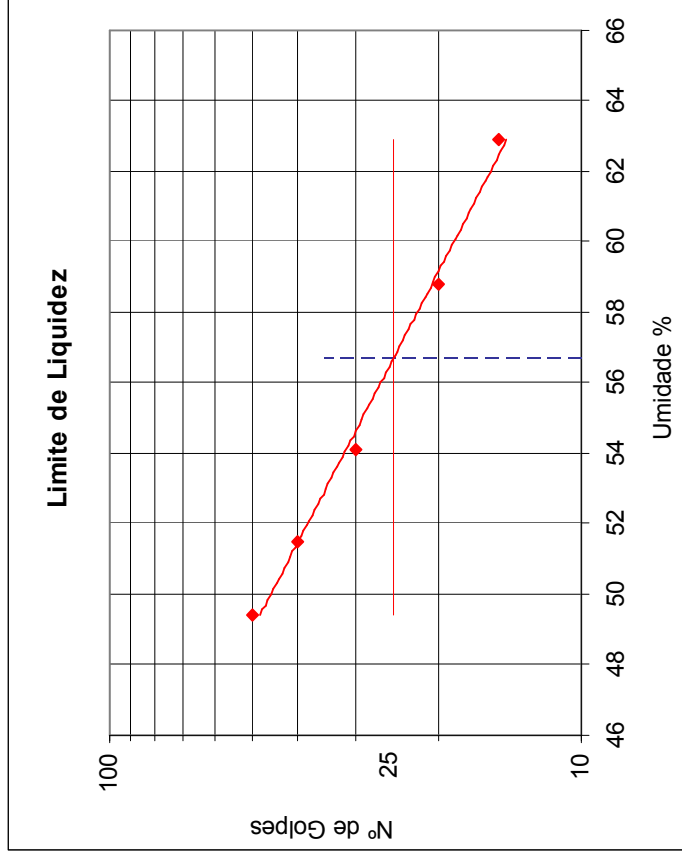
LIMITE DE LIQUIDEZ

| Cápsula N° | Cáp.e Solo Úmido (g) | Cáp. e Solo Seco (g) | Cápsula (g) | Água (g) | Solo Seco (g) | Teor de Umidade (%) | N° de Golpes |
|------------|----------------------|----------------------|-------------|----------|---------------|---------------------|--------------|
| 449 | 19,97 | 15,85 | 7,51 | 4,12 | 8,34 | 49,40 | 50 |
| 455 | 20,18 | 15,87 | 7,5 | 4,31 | 8,37 | 51,49 | 40 |
| 479 | 19,08 | 14,61 | 6,35 | 4,47 | 8,26 | 54,12 | 30 |
| 491 | 21,43 | 16,62 | 8,44 | 4,81 | 8,18 | 58,80 | 20 |
| 447 | 22,33 | 16,97 | 8,45 | 5,36 | 8,52 | 62,91 | 15 |

LIMITE DE PLASTICIDADE

| Cápsula N° | Cáp.e Solo Úmido (g) | Cáp. e Solo Seco (g) | Cápsula (g) | Água (g) | Solo Seco (g) | Teor de Umidade (%) | Limite de Plastic. (%) |
|------------|----------------------|----------------------|-------------|----------|---------------|---------------------|------------------------|
| 465 | 9,11 | 8,81 | 7,41 | 0,30 | 1,40 | 21,43 | 22,0 |
| 413 | 9,05 | 8,76 | 7,49 | 0,29 | 1,27 | 22,83 | |
| 495 | 8,58 | 8,32 | 7,11 | 0,26 | 1,21 | 21,49 | |
| 429 | 8,47 | 8,22 | 7,07 | 0,25 | 1,15 | 21,74 | |
| 445 | 9,85 | 9,58 | 8,37 | 0,27 | 1,21 | 22,31 | |

| | |
|---------------|--------------|
| LL (%) | 56,70 |
| LP (%) | 21,96 |
| IP (%) | 34,74 |



DENSIDADE REAL DOS GRÃOS DAS AMOSTRAS 01E 02

| | | | |
|------------|------------------|-----------------|------------|
| PROJETO: | Tese de Mestrado | AMOSTRA: | AM - 01 |
| LOCAL: | Morro do Céu | DATA DO ENSAIO: | 15/10/2008 |
| DESCRIÇÃO: | Jazida antiga | | |

| Ensaio N° | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|
| Temperatura da água e solo °C | 25 | 25 | 25 |
| Picnômetro No | 21 | 25 | 22 |
| Picnômetro + solo seco (g) | 49,13 | 56,59 | 59,51 |
| Picnômetro (g) | 23,62 | 32,99 | 34,31 |
| Picnômetro + água (g) | 73,55 | 82,33 | 83,23 |
| Picnômetro + solo + água (g) | 89,11 | 96,75 | 98,60 |
| Solo seco (g) | 25,51 | 23,60 | 25,20 |
| Água deslocada Ps + Pw - Pws (g) | 9,95 | 9,18 | 9,83 |
| Fator de correção | 0,9989 | 0,9989 | 0,9989 |
| Densidade real dos grãos | 2,561 | 2,568 | 2,561 |
| PsK / (Ps + Pw - Pws) | | 2,563 | |
| | | Média | |

| | | | |
|------------|-----------------------------------|-----------------|------------|
| PROJETO: | Tese de Mestrado | AMOSTRA: | AM - 02 |
| LOCAL: | Morro do Céu | DATA DO ENSAIO: | 28/11/2008 |
| DESCRIÇÃO: | Jazida antiga com 5% de bentonita | | |

| Ensaio N° | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------------|-------------|--------|--------|
| Temperatura da água e solo °C | 23 | 23 | 23 |
| Picnômetro No | 12 | 28 | 22 |
| Picnômetro + solo seco (g) | 52,9 | 49,84 | 55,13 |
| Picnômetro (g) | 33,26 | 29,76 | 34,33 |
| Picnômetro + água (g) | 93,79 | 80,50 | 84,33 |
| Picnômetro + solo + água (g) | 105,78 | 92,76 | 97,04 |
| Solo seco (g) | 19,64 | 20,08 | 20,80 |
| Água deslocada Ps + Pw - Pws (g) | 7,65 | 7,82 | 8,09 |
| Fator de correção | 0,9993 | 0,9993 | 0,9993 |
| Densidade real dos grãos | 2,566 | 2,566 | 2,569 |
| PsK / (Ps + Pw - Pws) | Média 2,567 | | |

ENSAIO DE PERMEABILIDADE DA AMOSTRA 02

| | | | |
|------------|-----------------------------------|-----------------|------------|
| PROJETO: | Tese de Mestrado | AMOSTRA: | AM - 02 |
| LOCAL: | Morro do Céu | DATA DO ENSAIO: | 02/03/2009 |
| DESCRIÇÃO: | Jazida antiga com 5% de bentonita | | |

| CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA | | | | Molde N° | 0 |
|-----------------------------------|---------|--------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------|
| Umidade | Inicial | Final | Diâmetro do Molde (cm) | D | 10,21 |
| | | | Altura do Molde (cm) | L | 10,00 |
| Cápsula N° | 344 | 578 | Peso do Molde (g) | P | 1371,00 |
| | | | Área do Molde (cm ²) | A | 81,71 |
| Peso Úmido + Tara (g) | 76,79 | 76,59 | Volume do Molde (cm ³) | A x L | 817,1 |
| Peso Seco + Tara (g) | 69,85 | 68,89 | Área da Bureta (cm ²) | a | 0,25 |
| Água (g) | 6,94 | 7,7 | Peso Úmido + Molde (g) | PM | 3041,60 |
| Tara(g) | 17,82 | 11,88 | Peso Úmido (g) | PU | 1670,60 |
| Peso Seco (g) | 52,03 | 57,01 | Peso Seco (g) | PS | 1472,90 |
| Umidade (%) | 13,34 | 13,51 | Peso Esp. Úmido | γ_h | 2,045 |
| | | | Peso Esp. Seco | γ_s | 1,803 |
| Umidade Média (%) | 13,42 | 45,73 | Peso Esp. dos Grãos | Gs | 2,625 |
| | | | Volume de Sólidos (cm ³) | Vs | 561,06 |
| Grau de Saturação (%) | 77,21 | 263,08 | Índice de Vazios | e | 0,46 |
| | | | Porosidade (%) | n | 31,34% |
| | | | Grau de Compactação (%) | Gc | - |
| BURETA N°: A | | | | ÁREA (a) (cm ²): 0,25 | |

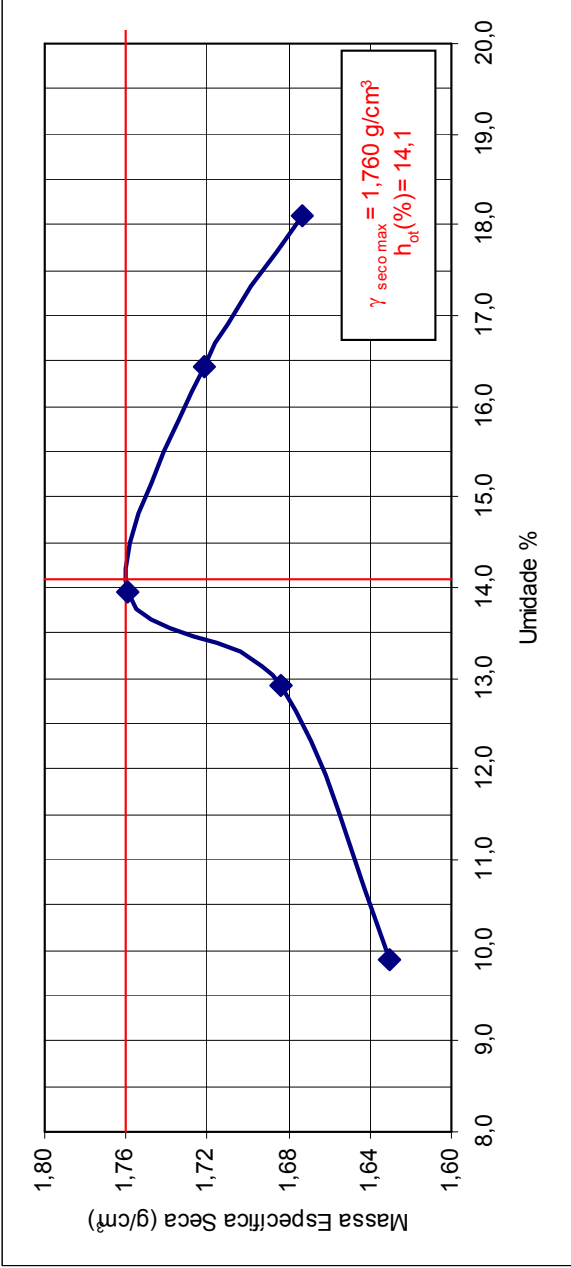
| Carga Inicial h_i (cm) | Carga Final h_f (cm) | Δh | Tempo T (seg.) | Temp. água T (oC) | Fator Cor. RT | Permeabilidade K (cm/seg) | Permeabilidade Média K20 (cm/seg.) |
|--------------------------|------------------------|------------|------------------|---------------------|---------------|---------------------------|------------------------------------|
| 70,0 | 66,0 | 4,0 | 28800 | 29 | 0,811 | 5,06E-08 | 5,10E-08 |
| 70,0 | 66,0 | 4,0 | 28800 | 29 | 0,811 | 5,06E-08 | |
| 75,0 | 71,0 | 4,0 | 28800 | 29 | 0,811 | 4,72E-08 | |
| 70,0 | 66,0 | 4,0 | 28800 | 29 | 0,811 | 5,06E-08 | |
| 71,0 | 63,0 | 8,0 | 57600 | 29 | 0,811 | 5,14E-08 | |
| 66,0 | 58,0 | 8,0 | 57600 | 29 | 0,811 | 5,56E-08 | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA 02

| | | | |
|------------|-----------------------------------|-----------------|------------|
| PROJETO: | Tese de Mestrado | AMOSTRA: | AM - 02 |
| LOCAL: | Morro do Céu | DATA DO ENSAIO: | 28/11/2008 |
| DESCRIÇÃO: | Jazida antiga com 5% de bentonita | | |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Molde N° | 64 | 46 | 48 | 58 | 42 | | | | | |
| Água adicionada (g) | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | | | | | |
| Am. úmida+molde (g) | 8863 | 9106 | 9300 | 9519 | 9521 | | | | | |
| Peso do molde (g) | 5075 | 5177 | 5193 | 5315 | 5380 | | | | | |
| Peso am. úmida (g) | 3788 | 3929 | 4107 | 4204 | 4141 | | | | | |
| Vol. molde (cm ³) | 2114 | 2067 | 2049 | 2097 | 2096 | | | | | |
| Mas. esp. úm. (g/cm ³) | 1,792 | 1,901 | 2,004 | 2,005 | 1,976 | | | | | |
| Cápsula N° | 5 | 341 | 509 | 301 | 521 | 356 | 306 | 338 | 361 | 327 |
| Am úmida+tara (g) | 66,68 | 57,09 | 59,69 | 64,27 | 50,76 | 52,33 | 78,90 | 75,55 | 59,95 | 61,28 |
| Am. seca+tara (g) | 62,22 | 53,39 | 54,38 | 58,88 | 46,13 | 48,00 | 70,81 | 67,15 | 53,26 | 54,43 |
| Tara (g) | 16,91 | 16,14 | 13,19 | 17,28 | 13,39 | 16,50 | 21,16 | 16,56 | 15,66 | 17,19 |
| Peso da água (g) | 4,46 | 3,70 | 5,31 | 5,39 | 4,63 | 4,33 | 8,09 | 8,40 | 6,69 | 6,85 |
| Peso da am. seca (g) | 45,31 | 37,25 | 41,19 | 41,60 | 32,74 | 31,50 | 49,65 | 50,59 | 37,60 | 37,24 |
| Umidade (%) | 9,84 | 9,93 | 12,89 | 12,96 | 14,14 | 13,75 | 16,29 | 16,60 | 17,79 | 18,39 |
| Umidade média (%) | 9,9 | | 12,9 | | 13,9 | | 16,4 | | 18,1 | |
| Mas. esp. sec. (g/cm ³) | 1,631 | | 1,683 | | 1,759 | | 1,722 | | 1,673 | |

| | |
|--|-------|
| Golpes por camada (5 camadas) | 12 |
| Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³) | 1,760 |
| Umidade ótima (%) | 14,1 |



ANEXO B - Dados de Entrada para o Programa VADOSE/W

GEOMETRIA DA SEÇÃO:

1. Especificação da Geometria da Seção:

- A camada monolítica terá espessura de 0,60 m e será formada pelo solo da amostra 01, jazida antiga, com $k_{sat} = 2,85 \times 10^{-7}$ cm/s. Será modelada também uma camada monolítica evapotranspirativa com as mesmas características.
- A camada monolítica terá espessura de 0,60 m e será formada pelo solo da amostra 02, jazida antiga com adição de 5% de bentonita, e permeabilidade de $5,10 \times 10^{-8}$ cm/s. Será modelada também uma camada monolítica evapotranspirativa com características semelhantes.
- A barreira capilar será formada pela camada de solo da amostra 01 e 02 com 0,60 m de espessura sobreposta sobre uma camada de solo arenoso com permeabilidade de 10^{-4} cm/s e 0,30 m de espessura. Será modelada também uma barreira capilar evapotranspirativa com características semelhantes.

2. Espessura da Camada Vegetal: 0,15m (vegetação rasteira).

PERÍODO DE ANÁLISE: 1 ano.

TIPO DE MATERIAL: Solo da amostra 01, amostra 02 e solo arenoso.

DETERMINAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA: 3 metros

DADOS METEOROLÓGICOS:

Como o período de análise foi de um ano, a estação meteorológica considerada neste trabalho foi a estação meteorológica do Maracanã, pois foi a estação mais próxima de Niterói e que continha dados mais completos. O período considerado foi de 01/07/2006 a 30/06/2007.

Apesar de ser a estação com dados mais completos no período de um ano consecutivo, foi necessário adotar alguns valores médios para os dias em que não houve medição, conforme legenda no final da tabela.

Sistema de Meteorologia do Estado do Rio de Janeiro - SIMERJ**Estação: Maracanã Período: 01/07/2006 a 30/06/2007****Lat.: 22° 54' 38" S Long.: 43° 13' 36" W Alt.: m**

| Data | Temperatura máxima °C | Temperatura mínima °C | Umidade mínima (%) | Umidade máxima (%) | Vento Velocidade (m/s) | Precipitação mm/dia | Período da chuva (h) |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| 01/07/2006 | 24,7 | 22,8 | 42 | 72 | 1,9 | 0 | 0 |
| 02/07/2006 | 25,2 | 23,3 | 25 | 78 | 0,6 | 0,2 | 1 |
| 03/07/2006 | 22,5 | 21,5 | 48 | 76 | 0,6 | 0,6 | 4 |
| 04/07/2006 | 24 | 23,2 | 39 | 79 | 0,8 | 0 | 0 |
| 05/07/2006 | 25,2 | 23,1 | 21 | 80 | 2 | 0 | 0 |
| 06/07/2006 | 23,8 | 22,5 | 35 | 78 | 1,1 | 0 | 0 |
| 07/07/2006 | 26,2 | 24,2 | 29 | 79 | 0,8 | 0 | 0 |
| 08/07/2006 | 28,3 | 26,7 | 30 | 80 | 1,2 | 0 | 0 |
| 09/07/2006 | 32,8 | 30 | 13 | 79 | 0,7 | 0 | 0 |
| 10/07/2006 | 23,4 | 21,8 | 34 | 73 | 0,3 | 0 | 0 |
| 11/07/2006 | 24,7 | 23,7 | 37 | 75 | 1,4 | 0 | 0 |
| 12/07/2006 | 27,7 | 26,4 | 30 | 79 | 0,6 | 0 | 0 |
| 13/07/2006 | 27 | 24,8 | 27 | 77 | 1,2 | 0 | 0 |
| 14/07/2006 | 28,9 | 26,2 | 18 | 78 | 0,9 | 0 | 0 |
| 15/07/2006 | 24,3 | 23,1 | 40 | 80 | 2,4 | 0 | 0 |
| 16/07/2006 | 23,9 | 22,1 | 34 | 76 | 1,3 | 0 | 0 |
| 17/07/2006 | 25,7 | 23,3 | 31 | 76 | 1,2 | 0 | 0 |
| 18/07/2006 | 24,5 | 22,4 | 32 | 75 | 1,4 | 0 | 0 |
| 19/07/2006 | 27,7 | 26,7 | 28 | 78 | 1,1 | 0 | 0 |
| 20/07/2006 | 26,7 | 25,4 | 22 | 73 | 0,6 | 0 | 0 |
| 21/07/2006 | 28,5 | 27,6 | 18 | 79 | 1,1 | 0 | 0 |
| 22/07/2006 | 30,8 | 28,4 | 9 | 78 | 0,8 | 0 | 0 |
| 23/07/2006 | 30,4 | 29,4 | 19 | 74 | 0,6 | 0 | 0 |
| 24/07/2006 | 31,8 | 31,1 | 6 | 73 | 0,9 | 0 | 0 |
| 25/07/2006 | 27,8 | 26 | 15 | 55 | 1,1 | 0 | 0 |
| 26/07/2006 | 31,5 | 29,2 | 24 | 79 | 0,6 | 0 | 0 |
| 27/07/2006 | 33,5 | 32,4 | 5 | 78 | 1,4 | 0 | 0 |
| 28/07/2006 | 31,5 | 30,2 | 16 | 64 | 1,1 | 0 | 0 |
| 29/07/2006 | 24,3 | 22,4 | 35 | 72 | 2,1 | 0,8 | 4 |
| 30/07/2006 | 17,2 | 16,6 | 61 | 78 | 0,5 | 7,4 | 14 |
| 31/07/2006 | 19,5 | 18,9 | 56 | 79 | 0,5 | 8,2 | 15 |
| 01/08/2006 | 21,3 | 21 | 53 | 75 | 1,4 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|----|----|-----|------|----|
| 02/08/2006 | 18,8 | 18,2 | 61 | 73 | 1,2 | 0,2 | 1 |
| 03/08/2006 | 20,1 | 19,8 | 56 | 73 | 1,6 | 0 | 0 |
| 04/08/2006 | 24,7 | 23 | 46 | 70 | 1,2 | 0 | 0 |
| 05/08/2006 | 25,6 | 24,3 | 45 | 79 | 1,1 | 0 | 0 |
| 06/08/2006 | 29,4 | 28,1 | 32 | 79 | 1 | 0 | 0 |
| 07/08/2006 | 29,9 | 29 | 18 | 78 | 1,2 | 0 | 0 |
| 08/08/2006 | 31,5 | 29,5 | 17 | 79 | 0,9 | 0 | 0 |
| 09/08/2006 | 32,9 | 30 | 3 | 76 | 0,8 | 0 | 0 |
| 10/08/2006 | 33,9 | 33 | 11 | 56 | 1,5 | 0 | 0 |
| 11/08/2006 | 29 | 27,4 | 27 | 67 | 1,4 | 0 | 0 |
| 12/08/2006 | 30,8 | 28,7 | 18 | 76 | 0,8 | 0 | 0 |
| 13/08/2006 | 32,8 | 30,7 | 14 | 67 | 1,7 | 0 | 0 |
| 14/08/2006 | 32,6 | 32 | 15 | 70 | 1,5 | 0 | 0 |
| 15/08/2006 | 34,1 | 33,1 | 12 | 67 | 1,4 | 0 | 0 |
| 16/08/2006 | 30,3 | 28,8 | 18 | 60 | 1,3 | 0 | 0 |
| 17/08/2006 | 25,1 | 24,1 | 46 | 75 | 2,9 | 0 | 0 |
| 18/08/2006 | 26 | 23,8 | 44 | 70 | 1,5 | 0 | 0 |
| 19/08/2006 | 25,9 | 25 | 36 | 72 | 1 | 1 | 2 |
| 20/08/2006 | 24,1 | 21,1 | 51 | 73 | 2,9 | 8 | 7 |
| 21/08/2006 | 21,1 | 19,7 | 37 | 60 | 1,8 | 0,2 | 1 |
| 22/08/2006 | 20 | 19,5 | 39 | 60 | 0,9 | 0 | 0 |
| 23/08/2006 | 26 | 24,2 | 29 | 76 | 1,3 | 0 | 0 |
| 24/08/2006 | 23,5 | 22,7 | 46 | 73 | 0,7 | 0 | 0 |
| 25/08/2006 | 25,5 | 24,4 | 30 | 70 | 1,2 | 0 | 0 |
| 26/08/2006 | 31,8 | 30,8 | 13 | 78 | 1 | 0 | 0 |
| 27/08/2006 | 32,4 | 29,9 | 15 | 49 | 1,1 | 0,2 | 1 |
| 28/08/2006 | 22,7 | 21,8 | 48 | 64 | 0,8 | 0 | 0 |
| 29/08/2006 | 17,3 | 17 | 60 | 77 | 1,2 | 11,4 | 15 |
| 30/08/2006 | 22,1 | 20,8 | 31 | 78 | 1,6 | 0,8 | 4 |
| 31/08/2006 | 26,7 | 25,4 | 32 | 71 | 1,3 | 0,2 | 1 |
| 01/09/2006 | 17,2 | 16,7 | 39 | 69 | 0,1 | 0,6 | 2 |
| 02/09/2006 | 23,5 | 22,8 | 48 | 79 | 0,6 | 8 | 7 |
| 03/09/2006 | 24,1 | 22,5 | 38 | 74 | 2 | 0 | 0 |
| 04/09/2006 | 17,8 | 17,4 | 57 | 79 | 0,5 | 14,6 | 12 |
| 05/09/2006 | 17,4 | 16,4 | 42 | 68 | 0,9 | 0,2 | 0 |
| 06/09/2006 | 19,6 | 19 | 36 | 76 | 1,8 | 5,8 | 3 |
| 07/09/2006 | 20,8 | 20,4 | 46 | 79 | 1,2 | 3,6 | 2 |
| 08/09/2006 | 25,5 | 24,5 | 26 | 72 | 1,4 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|----|----|-----|------|----|
| 09/09/2006 | 29,7 | 27,6 | 15 | 73 | 0,8 | 0 | 0 |
| 10/09/2006 | 28 | 26,9 | 28 | 61 | 0,3 | 0 | 0 |
| 11/09/2006 | 30,8 | 29,6 | 22 | 76 | 1 | 0 | 0 |
| 12/09/2006 | 35 | 32,2 | 12 | 77 | 0,9 | 0 | 0 |
| 13/09/2006 | 31,8 | 30,8 | 16 | 75 | 1,4 | 0 | 0 |
| 14/09/2006 | 35,5 | 34,7 | 9 | 77 | 1,2 | 0 | 0 |
| 15/09/2006 | 36,4 | 35,1 | 9 | 63 | 1,3 | 0 | 0 |
| 16/09/2006 | 27,5 | 26,5 | 38 | 57 | 1,7 | 0 | 0 |
| 17/09/2006 | 26,5 | 24,8 | 45 | 75 | 1,2 | 1,4 | 2 |
| 18/09/2006 | 26 | 24,5 | 48 | 78 | 2,5 | 20,2 | 9 |
| 19/09/2006 | 24,7 | 22,8 | 46 | 73 | 1,4 | 1 | 4 |
| 20/09/2006 | 30 | 28,6 | 32 | 76 | 2,4 | 4,2 | 3 |
| 21/09/2006 | 25,6 | 24,4 | 35 | 73 | 1,3 | 2,9 | 2 |
| 22/09/2006 | 23,6 | 22,5 | 49 | 69 | 1,3 | 0 | 0 |
| 23/09/2006 | 29,4 | 28,5 | 38 | 71 | 0,9 | 0 | 0 |
| 24/09/2006 | 20,4 | 19,9 | 50 | 77 | 1 | 5,8 | 5 |
| 25/09/2006 | 19,3 | 18,7 | 54 | 78 | 0,8 | 1,4 | 4 |
| 26/09/2006 | 21,2 | 20,2 | 45 | 78 | 0,9 | 4,2 | 5 |
| 27/09/2006 | 24 | 22,9 | 38 | 69 | 1,8 | 0,2 | 1 |
| 28/09/2006 | 29,7 | 27,3 | 18 | 67 | 1,2 | 0 | 0 |
| 29/09/2006 | 25,2 | 23,3 | 30 | 76 | 3 | 0 | 0 |
| 30/09/2006 | 20,6 | 20,4 | 58 | 77 | 0,8 | 14,6 | 11 |
| 01/10/2006 | 21,6 | 21,4 | 51 | 67 | 1,1 | 0 | 0 |
| 02/10/2006 | 21,7 | 21,2 | 50 | 76 | 0,3 | 5,8 | 6 |
| 03/10/2006 | 27,4 | 25,9 | 43 | 79 | 1,1 | 0 | 0 |
| 04/10/2006 | 26,7 | 25 | 47 | 72 | 1,8 | 0 | 0 |
| 05/10/2006 | 33,8 | 30,8 | 26 | 76 | 0,8 | 0,2 | 1 |
| 06/10/2006 | 26,2 | 25,3 | 27 | 76 | 4 | 5,4 | 2 |
| 07/10/2006 | 25,4 | 24,4 | 64 | 80 | 0,6 | 44,6 | 14 |
| 08/10/2006 | 24,3 | 23,5 | 59 | 79 | 0,6 | 2,4 | 8 |
| 09/10/2006 | 24,1 | 23,7 | 51 | 77 | 1,2 | 1,2 | 2 |
| 10/10/2006 | 28 | 26,3 | 47 | 71 | 1,4 | 0 | 0 |
| 11/10/2006 | 33,3 | 32,4 | 22 | 74 | 1,7 | 0 | 0 |
| 12/10/2006 | 30,3 | 27,7 | 23 | 66 | 2,7 | 0 | 0 |
| 13/10/2006 | 25,8 | 25,5 | 53 | 75 | 0,6 | 1,2 | 6 |
| 14/10/2006 | 28,4 | 27,5 | 47 | 70 | 0,7 | 0 | 0 |
| 15/10/2006 | 31,2 | 29,2 | 39 | 72 | 1,7 | 0 | 0 |
| 16/10/2006 | 33,2 | 32,2 | 32 | 74 | 1,3 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|----|----|-----|------|-----|
| 17/10/2006 | 28,4 | 26,9 | 47 | 72 | 1,8 | 0,2 | 1 |
| 18/10/2006 | 23,6 | 22,9 | 57 | 76 | 0,9 | 2 | 4 |
| 19/10/2006 | 21,3 | 21,1 | 65 | 77 | 0,9 | 13,4 | 17 |
| 20/10/2006 | 23,8 | 21,1 | 43 | 79 | 0,9 | 14,4 | 13 |
| 21/10/2006 | 23 | 22,7 | 34 | 79 | 0,7 | 1,8 | 1 |
| 22/10/2006 | 21,3 | 20,7 | 39 | 69 | 1,5 | 1 | 2 |
| 23/10/2006 | 25 | 23,4 | 40 | 74 | 1,7 | 0 | 0 |
| 24/10/2006 | 27,2 | 26,2 | 32 | 74 | 1,6 | 0 | 0 |
| 25/10/2006 | 30 | 28,8 | 27 | 69 | 1,2 | 0 | 0 |
| 26/10/2006 | 36,9 | 35,3 | 16 | 72 | 1,3 | 0 | 0 |
| 27/10/2006 | 25,4 | 23,1 | 41 | 68 | 2,4 | 1,8 | 4 |
| 28/10/2006 | 26,1 | 23,9 | 26 | 63 | 2,2 | 0 | 0 |
| 29/10/2006 | 27,6 | 25,9 | 35 | 66 | 1,6 | 0 | 0 |
| 30/10/2006 | 27,3 | 25,7 | 33 | 70 | 1,6 | 0 | 0 |
| 31/10/2006 | 30,7 | 29,4 | 32 | 74 | 1,3 | 0 | 0 |
| 01/11/2006 | 33,5 | 31,4 | 25 | 69 | 1,5 | 0,2 | 1 |
| 02/11/2006 | 26,3 | 24,9 | 37 | 79 | 0,7 | 12,8 | 8 |
| 03/11/2006 | 28,2 | 27,5 | 53 | 78 | 1,4 | 9 | 8 |
| 04/11/2006 | 28,6 | 26,9 | 47 | 70 | 1,4 | 0 | 0 |
| 05/11/2006 | 24,5 | 23,7 | 39 | 69 | 1,6 | 0 | 0 |
| 06/11/2006 | 29,7 | 28,1 | 63 | 67 | 1,3 | 0,0 | 0 |
| 07/11/2006 | 29,7 | 28,1 | 42 | 73 | 1,3 | 4,9 | 3,0 |
| 08/11/2006 | 29,7 | 28,1 | 42 | 73 | 1,3 | 4,9 | 3,0 |
| 09/11/2006 | 29,7 | 28,1 | 42 | 73 | 1,3 | 4,9 | 3,0 |
| 10/11/2006 | 29,7 | 28,1 | 42 | 73 | 1,3 | 4,9 | 3,0 |
| 11/11/2006 | 29,7 | 28,1 | 42 | 73 | 1,3 | 4,9 | 3,0 |
| 12/11/2006 | 29,7 | 28,1 | 42 | 73 | 1,3 | 4,9 | 3,0 |
| 13/11/2006 | 29,7 | 28,1 | 42 | 73 | 1,3 | 4,9 | 3,0 |
| 14/11/2006 | 23,8 | 22,2 | 68 | 79 | 0,7 | 9,6 | 4 |
| 15/11/2006 | 30,2 | 29 | 43 | 79 | 1,4 | 0,8 | 4 |
| 16/11/2006 | 34,3 | 32,5 | 23 | 75 | 0,5 | 0,2 | 1 |
| 17/11/2006 | 34,6 | 33,5 | 25 | 75 | 1 | 0 | 0 |
| 18/11/2006 | 30,7 | 28,4 | 26 | 73 | 2,3 | 1,2 | 3 |
| 19/11/2006 | 30,6 | 29,4 | 41 | 69 | 1,5 | 0 | 0 |
| 20/11/2006 | 31,6 | 29,2 | 40 | 76 | 1,9 | 6,4 | 5 |
| 21/11/2006 | 26,7 | 25,9 | 50 | 73 | 1,3 | 1,8 | 4 |
| 22/11/2006 | 26,5 | 25 | 37 | 69 | 1,8 | 0,2 | 1 |
| 23/11/2006 | 27,4 | 26,2 | 50 | 66 | 1,4 | 0,8 | 1 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|----|----|-----|------|----|
| 24/11/2006 | 30,6 | 29 | 47 | 68 | 1,8 | 0 | 0 |
| 25/11/2006 | 36,6 | 34 | 17 | 73 | 1,4 | 0 | 0 |
| 26/11/2006 | 32 | 30,6 | 38 | 63 | 1 | 0 | 0 |
| 27/11/2006 | 28,2 | 26,8 | 48 | 78 | 0,9 | 16,2 | 7 |
| 28/11/2006 | 31,6 | 30,2 | 34 | 77 | 0,9 | 7,6 | 2 |
| 29/11/2006 | 31,4 | 28,1 | 48 | 78 | 0,9 | 21,6 | 8 |
| 30/11/2006 | 24,4 | 23,5 | 66 | 75 | 1,3 | 24,2 | 13 |
| 01/12/2006 | 24,6 | 24 | 54 | 75 | 1,2 | 3,4 | 7 |
| 02/12/2006 | 27,2 | 26,1 | 42 | 70 | 1,9 | 0,2 | 1 |
| 03/12/2006 | 29,9 | 29 | 31 | 62 | 1,5 | 0 | 0 |
| 04/12/2006 | 32,3 | 30,8 | 24 | 70 | 1,9 | 0 | 0 |
| 05/12/2006 | 29,5 | 28,5 | 46 | 66 | 0,8 | 0 | 0 |
| 06/12/2006 | 32,4 | 28,7 | 39 | 75 | 1 | 1,2 | 5 |
| 07/12/2006 | 27,8 | 26,4 | 46 | 76 | 1 | 0,4 | 2 |
| 08/12/2006 | 28,3 | 26,1 | 39 | 73 | 1,2 | 0 | 0 |
| 09/12/2006 | 26,2 | 24,9 | 44 | 69 | 1,2 | 0 | 0 |
| 10/12/2006 | 24,9 | 24,5 | 51 | 67 | 1,6 | 0 | 0 |
| 11/12/2006 | 24,3 | 23,9 | 57 | 69 | 1,2 | 0,2 | 1 |
| 12/12/2006 | 26,2 | 25,2 | 48 | 70 | 1,5 | 0 | 0 |
| 13/12/2006 | 28,8 | 27,1 | 48 | 79 | 1,9 | 0,4 | 2 |
| 14/12/2006 | 35,4 | 33,1 | 33 | 73 | 1,6 | 0 | 0 |
| 15/12/2006 | 35,6 | 32,1 | 23 | 77 | 1,4 | 7 | 4 |
| 16/12/2006 | 32,3 | 31,5 | 29 | 68 | 1,6 | 0,2 | 1 |
| 17/12/2006 | 33,4 | 31,9 | 26 | 71 | 1,8 | 0 | 0 |
| 18/12/2006 | 34,4 | 33,1 | 23 | 66 | 1,7 | 0 | 0 |
| 19/12/2006 | 35,6 | 33,9 | 18 | 67 | 1,4 | 0 | 0 |
| 20/12/2006 | 38,4 | 35,9 | 17 | 56 | 2,2 | 0,2 | 1 |
| 21/12/2006 | 37,9 | 27,8 | 16 | 78 | 1,2 | 28 | 8 |
| 22/12/2006 | 31,3 | 29 | 47 | 78 | 1 | 0,2 | 1 |
| 23/12/2006 | 28,8 | 27,5 | 56 | 79 | 1,5 | 12 | 5 |
| 24/12/2006 | 33,3 | 31,6 | 39 | 78 | 0,9 | 5,8 | 4 |
| 25/12/2006 | 38,3 | 36,3 | 17 | 77 | 1,3 | 0,4 | 1 |
| 26/12/2006 | 36,3 | 32,3 | 19 | 64 | 0,9 | 0 | 0 |
| 27/12/2006 | 31,8 | 29,6 | 40 | 67 | 1,8 | 0 | 0 |
| 28/12/2006 | 27,3 | 26,8 | 52 | 67 | 1 | 0,4 | 1 |
| 29/12/2006 | 28,1 | 27,1 | 38 | 67 | 1,5 | 0 | 0 |
| 30/12/2006 | 32,9 | 30 | 35 | 64 | 1,5 | 0 | 0 |
| 31/12/2006 | 24,4 | 23,9 | 56 | 77 | 0,5 | 15,4 | 16 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|----|----|-----|------|----|
| 01/01/2007 | 25,3 | 24,9 | 60 | 77 | 0,8 | 0,4 | 2 |
| 02/01/2007 | 24,6 | 24,1 | 65 | 77 | 1 | 0,2 | 1 |
| 03/01/2007 | 24,1 | 23,4 | 66 | 77 | 0,5 | 0 | 0 |
| 04/01/2007 | 30,9 | 29,1 | 43 | 76 | 1,6 | 8,8 | 12 |
| 05/01/2007 | 31,3 | 30,7 | 30 | 78 | 1,2 | 11 | 16 |
| 06/01/2007 | 33,4 | 32 | 33 | 62 | 0,8 | 5,2 | 9 |
| 07/01/2007 | 27,4 | 25 | 27 | 69 | 1,1 | 3,2 | 6 |
| 08/01/2007 | 29,7 | 27,9 | 49 | 74 | 1 | 1,8 | 8 |
| 09/01/2007 | 30,8 | 28,1 | 46 | 76 | 0,8 | 2,8 | 2 |
| 10/01/2007 | 27,5 | 26,3 | 50 | 76 | 1,8 | 0,2 | 1 |
| 11/01/2007 | 31,6 | 29,5 | 38 | 72 | 1,3 | 0 | 0 |
| 12/01/2007 | 39,3 | 38,4 | 13 | 75 | 2 | 1 | 2 |
| 13/01/2007 | 27,4 | 26,4 | 54 | 78 | 0,7 | 20,4 | 10 |
| 14/01/2007 | 27,7 | 26,9 | 57 | 78 | 1,4 | 0,8 | 4 |
| 15/01/2007 | 26,9 | 26,3 | 45 | 77 | 0,8 | 0,2 | 1 |
| 16/01/2007 | 23,4 | 22,6 | 65 | 77 | 1,5 | 0 | 0 |
| 17/01/2007 | 27,3 | 26,7 | 57 | 76 | 0,6 | 0 | 0 |
| 18/01/2007 | 31,5 | 30,7 | 39 | 79 | 0,9 | 0 | 0 |
| 19/01/2007 | 34,8 | 34,1 | 28 | 65 | 1,2 | 0 | 0 |
| 20/01/2007 | 36,9 | 34,7 | 26 | 69 | 0,6 | 0 | 0 |
| 21/01/2007 | 31,3 | 28,7 | 30 | 73 | 2 | 0 | 0 |
| 22/01/2007 | 24,6 | 23,8 | 60 | 78 | 0,5 | 0 | 0 |
| 23/01/2007 | 26,5 | 26 | 46 | 78 | 0,9 | 0 | 0 |
| 24/01/2007 | 30,2 | 29 | 47 | 68 | 1,2 | 0 | 0 |
| 25/01/2007 | 33,1 | 31,3 | 33 | 75 | 1,3 | 0 | 0 |
| 26/01/2007 | 35,1 | 33,9 | 33 | 73 | 1,1 | 0 | 0 |
| 27/01/2007 | 34 | 32,8 | 30 | 69 | 2,6 | 0 | 0 |
| 28/01/2007 | 35,6 | 33,1 | 28 | 63 | 1 | 0 | 0 |
| 29/01/2007 | 35,3 | 34,3 | 32 | 77 | 1 | 0 | 0 |
| 30/01/2007 | 28,2 | 27,3 | 41 | 67 | 1,3 | 0 | 0 |
| 31/01/2007 | 30,4 | 28,4 | 49 | 78 | 0,9 | 0 | 0 |
| 01/02/2007 | 30,9 | 29,8 | 38 | 71 | 1,6 | 0 | 0 |
| 02/02/2007 | 30,1 | 28,6 | 45 | 79 | 0,9 | 0 | 0 |
| 03/02/2007 | 31,7 | 30,3 | 38 | 79 | 1,1 | 0 | 0 |
| 04/02/2007 | 29,6 | 28,7 | 43 | 76 | 2 | 0 | 0 |
| 05/02/2007 | 31,9 | 30,6 | 34 | 70 | 1,6 | 0 | 0 |
| 06/02/2007 | 29,6 | 28 | 37 | 69 | 0,4 | 0 | 0 |
| 07/02/2007 | 37,3 | 36 | 24 | 70 | 1,5 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|----|----|-----|-----|---|
| 08/02/2007 | 35 | 32,3 | 31 | 62 | 0,8 | 0 | 0 |
| 09/02/2007 | 36 | 34,5 | 19 | 66 | 1,3 | 0 | 0 |
| 10/02/2007 | 36 | 34,9 | 20 | 62 | 1,2 | 0 | 0 |
| 11/02/2007 | 24,2 | 23,6 | 43 | 79 | 0,7 | 0,2 | 1 |
| 12/02/2007 | 27,3 | 26,6 | 36 | 79 | 0,7 | 2,2 | 3 |
| 13/02/2007 | 30,1 | 28,6 | 36 | 79 | 0,9 | 0,2 | 1 |
| 14/02/2007 | 28,8 | 27,9 | 39 | 75 | 1,5 | 0 | 0 |
| 15/02/2007 | 29,8 | 28,4 | 44 | 72 | 1,7 | 0 | 0 |
| 16/02/2007 | 29,9 | 28,7 | 42 | 70 | 1,6 | 0 | 0 |
| 17/02/2007 | 31,1 | 29,8 | 41 | 73 | 1,9 | 0 | 0 |
| 18/02/2007 | 34,5 | 33,5 | 20 | 76 | 1,7 | 0 | 0 |
| 19/02/2007 | 34 | 31,6 | 33 | 65 | 1,3 | 0 | 0 |
| 20/02/2007 | 34,7 | 32,7 | 29 | 66 | 1,3 | 0 | 0 |
| 21/02/2007 | 32,9 | 32,3 | 29 | 64 | 1,6 | 0 | 0 |
| 22/02/2007 | 34,2 | 33,2 | 22 | 74 | 1,6 | 0 | 0 |
| 23/02/2007 | 34,6 | 32,4 | 36 | 82 | 1,5 | 0 | 0 |
| 24/02/2007 | 37 | 35,7 | 35 | 87 | 1,4 | 0 | 0 |
| 25/02/2007 | 37,3 | 35,3 | 33 | 82 | 1 | 0 | 0 |
| 26/02/2007 | 29,9 | 29,5 | 47 | 93 | 1,2 | 3,6 | 1 |
| 27/02/2007 | 36,4 | 35 | 43 | 88 | 1,1 | 0 | 0 |
| 28/02/2007 | 35,4 | 33,8 | 33 | 83 | 1,5 | 0 | 0 |
| 01/03/2007 | 33,4 | 32 | 34 | 83 | 1,1 | 0 | 0 |
| 02/03/2007 | 35,1 | 33,9 | 36 | 85 | 1,5 | 0 | 0 |
| 03/03/2007 | 34,2 | 32,9 | 37 | 88 | 1,5 | 0 | 0 |
| 04/03/2007 | 32,2 | 30,4 | 44 | 79 | 1,9 | 0 | 0 |
| 05/03/2007 | 36,7 | 35 | 34 | 86 | 1,5 | 0 | 0 |
| 06/03/2007 | 34,8 | 33,6 | 36 | 83 | 1,1 | 0 | 0 |
| 07/03/2007 | 33,4 | 32,6 | 42 | 82 | 1,7 | 0 | 0 |
| 08/03/2007 | 33,9 | 32,8 | 34 | 81 | 1,4 | 0 | 0 |
| 09/03/2007 | 36,8 | 34,8 | 32 | 90 | 1,3 | 0 | 0 |
| 10/03/2007 | 38,4 | 35,3 | 19 | 88 | 1,2 | 0 | 0 |
| 11/03/2007 | 34,9 | 33,1 | 28 | 84 | 1,9 | 0 | 0 |
| 12/03/2007 | 33,7 | 32,5 | 31 | 85 | 1,9 | 0 | 0 |
| 13/03/2007 | 33,8 | 32,4 | 40 | 80 | 1,6 | 0 | 0 |
| 14/03/2007 | 33,4 | 32,2 | 40 | 78 | 1,5 | 0 | 0 |
| 15/03/2007 | 35,8 | 34,1 | 29 | 88 | 1,4 | 0 | 0 |
| 16/03/2007 | 37 | 33,5 | 32 | 89 | 2,8 | 0,6 | 2 |
| 17/03/2007 | 30,3 | 28,6 | 64 | 94 | 0,9 | 2,8 | 7 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|----|----|-----|-----|---|
| 18/03/2007 | 35,8 | 31,5 | 45 | 93 | 1,1 | 1 | 4 |
| 19/03/2007 | 35 | 28,8 | 41 | 88 | 1,1 | 0,8 | 1 |
| 20/03/2007 | 27,7 | 26,9 | 57 | 86 | 0,7 | 1,4 | 4 |
| 21/03/2007 | 33,1 | 30,2 | 34 | 96 | 2,2 | 1 | 2 |
| 22/03/2007 | 30,9 | 28,7 | 42 | 87 | 1,5 | 0,4 | 1 |
| 23/03/2007 | 31,3 | 28,3 | 58 | 91 | 1 | 0 | 0 |
| 24/03/2007 | 32,1 | 30 | 52 | 91 | 1,7 | 0 | 0 |
| 25/03/2007 | 31,6 | 29 | 55 | 88 | 1,1 | 0 | 0 |
| 26/03/2007 | 30,5 | 28,9 | 54 | 92 | 1,5 | 0 | 0 |
| 27/03/2007 | 31,7 | 30,6 | 49 | 90 | 1,2 | 0 | 0 |
| 28/03/2007 | 32,3 | 31,3 | 51 | 90 | 1,3 | 0 | 0 |
| 29/03/2007 | 32,2 | 29,8 | 48 | 86 | 1,6 | 0 | 0 |
| 30/03/2007 | 30,6 | 29,4 | 36 | 90 | 1,4 | 0 | 0 |
| 31/03/2007 | 35,9 | 33,9 | 39 | 86 | 1,4 | 0 | 0 |
| 01/04/2007 | 31,3 | 29,5 | 49 | 92 | 1,3 | 0 | 0 |
| 02/04/2007 | 29 | 27,4 | 48 | 92 | 1,6 | 0 | 0 |
| 03/04/2007 | 31,1 | 30,1 | 45 | 88 | 1,4 | 0 | 0 |
| 04/04/2007 | 31 | 28,6 | 41 | 92 | 2,4 | 0 | 0 |
| 05/04/2007 | 29,8 | 27,3 | 57 | 90 | 0,9 | 0 | 0 |
| 06/04/2007 | 27,7 | 26,9 | 50 | 82 | 1,9 | 0 | 0 |
| 07/04/2007 | 27,1 | 26,2 | 59 | 86 | 1,3 | 0 | 0 |
| 08/04/2007 | 33,2 | 31,7 | 45 | 92 | 1,7 | 0 | 0 |
| 09/04/2007 | 28,3 | 25,4 | 49 | 96 | 3,1 | 0 | 0 |
| 10/04/2007 | 28,4 | 26 | 57 | 96 | 1,9 | 0 | 0 |
| 11/04/2007 | 27,2 | 26,3 | 58 | 93 | 1,8 | 0 | 0 |
| 12/04/2007 | 33,1 | 32,2 | 37 | 96 | 1,7 | 0 | 0 |
| 13/04/2007 | 29,5 | 27,6 | 52 | 93 | 1,7 | 0 | 0 |
| 14/04/2007 | 26 | 25,4 | 49 | 92 | 1,1 | 0 | 0 |
| 15/04/2007 | 29 | 27,4 | 47 | 94 | 1,4 | 0 | 0 |
| 16/04/2007 | 27,5 | 25,9 | 54 | 89 | 0,8 | 0 | 0 |
| 17/04/2007 | 25,9 | 24,8 | 53 | 87 | 1 | 0 | 0 |
| 18/04/2007 | 29,1 | 27,3 | 46 | 94 | 1,3 | 0 | 0 |
| 19/04/2007 | 27,7 | 26,7 | 53 | 92 | 1,1 | 0 | 0 |
| 20/04/2007 | 28,5 | 26,7 | 54 | 85 | 1,5 | 0 | 0 |
| 21/04/2007 | 27,2 | 25,6 | 58 | 87 | 1,5 | 0 | 0 |
| 22/04/2007 | 26,4 | 24,5 | 59 | 91 | 1 | 0 | 0 |
| 23/04/2007 | 29,8 | 27,9 | 49 | 90 | 1,4 | 0 | 0 |
| 24/04/2007 | 33 | 32,1 | 40 | 93 | 1,3 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|-----|------|----|
| 25/04/2007 | 34,2 | 33 | 38 | 85 | 1,6 | 0 | 11 |
| 26/04/2007 | 36,2 | 33,9 | 32 | 86 | 0,9 | 0 | 0 |
| 27/04/2007 | 23,1 | 21 | 55 | 93 | 4,3 | 24,6 | 11 |
| 28/04/2007 | 23,4 | 22,5 | 59 | 93 | 1,4 | 7,8 | 17 |
| 29/04/2007 | 24,8 | 23 | 58 | 92 | 1,1 | 1 | 5 |
| 30/04/2007 | 25,8 | 23,5 | 58 | 92 | 1,2 | 0,6 | 3 |
| 01/05/2007 | 25,9 | 25,2 | 50,0 | 94,0 | 0,8 | 0,4 | 2 |
| 02/05/2007 | 26,4 | 24,6 | 42,0 | 96,0 | 1,0 | 0,4 | 2 |
| 03/05/2007 | 27,6 | 25,2 | 49,0 | 95,0 | 2,2 | 0,4 | 2 |
| 04/05/2007 | 24,6 | 23,0 | 45,0 | 93,0 | 1,5 | 7,6 | 1 |
| 05/05/2007 | 27,0 | 25,8 | 45,0 | 93,0 | 0,7 | 0,0 | 0 |
| 06/05/2007 | 29,4 | 28,5 | 42,0 | 97,0 | 1,4 | 0,0 | 0 |
| 07/05/2007 | 30,8 | 30,0 | 33,0 | 94,0 | 1,2 | 0,0 | 0 |
| 08/05/2007 | 28,6 | 26,6 | 47,0 | 88,0 | 2,1 | 0,0 | 0 |
| 09/05/2007 | 16,9 | 16,6 | 66,0 | 90,0 | 1,4 | 19,6 | 14 |
| 10/05/2007 | 22,0 | 20,5 | 56,0 | 96,0 | 1,3 | 3,4 | 16 |
| 11/05/2007 | 23,8 | 22,6 | 47,0 | 90,0 | 1,3 | 1,8 | 9 |
| 12/05/2007 | 27,4 | 25,0 | 46,0 | 92,0 | 0,6 | 1,2 | 6 |
| 13/05/2007 | 24,1 | 22,9 | 55,0 | 92,0 | 0,8 | 0,6 | 3 |
| 14/05/2007 | 26,6 | 25,6 | 45,0 | 95,0 | 0,4 | 0,6 | 3 |
| 15/05/2007 | 23,4 | 22,1 | 70,0 | 93,0 | 0,7 | 0,4 | 2 |
| 16/05/2007 | 21,1 | 20,1 | 59,0 | 88,0 | 1,3 | 0,4 | 2 |
| 17/05/2007 | 24,1 | 22,8 | 53,8 | 93,1 | 1,3 | 1,4 | 3 |
| 18/05/2007 | 27,3 | 24,3 | 58,0 | 97,0 | 1,4 | 0,0 | 0 |
| 19/05/2007 | 23,3 | 22,9 | 61,0 | 97,0 | 1,4 | 0,2 | 1 |
| 20/05/2007 | 22,2 | 21,3 | 73,0 | 96,0 | 0,7 | 0,8 | 4 |
| 21/05/2007 | 26,1 | 25,1 | 64,0 | 91,0 | 2,4 | 0,4 | 2 |
| 22/05/2007 | 23,8 | 22,9 | 47,0 | 96,0 | 1,9 | 0,4 | 2 |
| 23/05/2007 | 20,8 | 20,4 | 78,0 | 95,0 | 0,3 | 0,4 | 2 |
| 24/05/2007 | 18,3 | 17,3 | 63,0 | 95,0 | 1,6 | 0,2 | 1 |
| 25/05/2007 | 21,3 | 19,6 | 54,0 | 87,0 | 1,8 | 0,2 | 1 |
| 26/05/2007 | 22,4 | 20,7 | 46,0 | 97,0 | 1,5 | 0,2 | 1 |
| 27/05/2007 | 23,4 | 21,5 | 46,0 | 93,0 | 0,4 | 0,2 | 1 |
| 28/05/2007 | 23,8 | 21,7 | 59,0 | 96,0 | 1,3 | 0,2 | 1 |
| 29/05/2007 | 23,2 | 20,9 | 51,0 | 94,0 | 2,3 | 0,2 | 1 |
| 30/05/2007 | 17,6 | 17,1 | 63,0 | 79,0 | 0,7 | 0,0 | 0 |
| 01/06/2007 | 22,0 | 20,8 | 50,0 | 94,0 | 0,6 | 0,4 | 2 |
| 02/06/2007 | 21,9 | 20,7 | 42,0 | 96,0 | 0,6 | 0,4 | 2 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|-----|------|----|
| 03/06/2007 | 22,6 | 21,4 | 49,0 | 95,0 | 0,7 | 0,4 | 2 |
| 04/06/2007 | 22,4 | 21,6 | 45,0 | 93,0 | 1,0 | 7,6 | 1 |
| 05/06/2007 | 22,1 | 20,9 | 45,0 | 93,0 | 0,6 | 0 | 0 |
| 06/06/2007 | 23,4 | 22,1 | 42,0 | 97,0 | 0,6 | 0 | 0 |
| 07/06/2007 | 24,7 | 23,4 | 33,0 | 94,0 | 0,6 | 0 | 0 |
| 08/06/2007 | 25,2 | 24,1 | 47,0 | 88,0 | 0,9 | 0 | 0 |
| 09/06/2007 | 19,8 | 18,9 | 66,0 | 90,0 | 1,2 | 19,6 | 14 |
| 10/06/2007 | 18,7 | 17,6 | 56,0 | 96,0 | 0,8 | 3,4 | 16 |
| 11/06/2007 | 20,1 | 18,9 | 47,0 | 90,0 | 0,8 | 1,8 | 9 |
| 12/06/2007 | 21,4 | 20,0 | 46,0 | 92,0 | 0,5 | 1,2 | 6 |
| 13/06/2007 | 21,7 | 20,6 | 55,0 | 92,0 | 0,6 | 0,6 | 3 |
| 14/06/2007 | 22,6 | 21,2 | 45,0 | 95,0 | 0,7 | 0,6 | 3 |
| 15/06/2007 | 21,5 | 20,8 | 70,0 | 93,0 | 0,5 | 0,4 | 2 |
| 16/06/2007 | 21,1 | 20,1 | 59,0 | 88,0 | 0,6 | 0,4 | 2 |
| 17/05/2007 | 24,1 | 22,8 | 53,8 | 93,1 | 1,3 | 1,4 | 3 |
| 18/06/2007 | 22,9 | 22,0 | 58,0 | 97,0 | 1,0 | 0,0 | 0 |
| 19/06/2007 | 22,3 | 21,6 | 61,0 | 97,0 | 0,9 | 0,2 | 1 |
| 20/06/2007 | 20,7 | 20,1 | 73,0 | 96,0 | 0,7 | 0,8 | 4 |
| 21/06/2007 | 22,9 | 22,0 | 64,0 | 91,0 | 0,9 | 0,4 | 2 |
| 22/06/2007 | 23,3 | 22,3 | 47,0 | 96,0 | 0,7 | 0,4 | 2 |
| 23/06/2007 | 20,9 | 20,2 | 78,0 | 95,0 | 0,3 | 0,4 | 2 |
| 24/06/2007 | 18,4 | 17,6 | 63,0 | 95,0 | 1,1 | 0,2 | 1 |
| 25/06/2007 | 18,1 | 16,8 | 54,0 | 87,0 | 0,8 | 0,2 | 1 |
| 26/06/2007 | 18,6 | 17,4 | 46,0 | 97,0 | 0,5 | 0,2 | 1 |
| 27/06/2007 | 19,7 | 18,4 | 46,0 | 93,0 | 0,5 | 0,2 | 1 |
| 28/06/2007 | 20,3 | 18,9 | 59,0 | 96,0 | 0,7 | 0,2 | 1 |
| 29/06/2007 | 20,0 | 18,9 | 51,0 | 94,0 | 0,9 | 0,2 | 1 |
| 30/06/2007 | 16,4 | 15,8 | 63,0 | 79,0 | 0,9 | 0,0 | 0 |

(Fonte: Sistema de Meteorologia do Estado do Rio de Janeiro – SIMERJ)

LEGENDA

| | |
|--|-----------------------------------|
| | Adotada a média do mês referente |
| | Adotada a média do mês de Maio/07 |