



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente

Isabela Maria Barroso

**CAMADAS DE COBERTURA DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS:
ESTUDO PRELIMINAR DE CASOS**

Rio de Janeiro

2008

Isabela Maria Barroso

**CAMADAS DE COBERTURA DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS:
ESTUDO PRELIMINAR DE CASOS**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para 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

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a Laura de Simone Borma

Rio de Janeiro

2008

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC

Barroso, Isabela Maria
Camada de cobertura aterro de resíduos sólidos: estudo preliminar de casos – 2008.
128 f.

Orientadora: Elisabeth Ritter
Dissertação (Mestrado)- Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
Bibliografia: f. 100-104.

1. Centro de Tecnologia e Ciências – Dissertação. 2. Camadas de cobertura de aterro. I. Barroso, Isabela Maria. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. III. Título.

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

Assinatura

Data

Isabela Maria Barroso

**CAMADAS DE COBERTURA DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS:
ESTUDO PRELIMINAR DE CASOS**

Dissertação apresentada, como requisito para 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. Elisabeth Ritter, D.Sc. - Presidente
PEAMB/UERJ

Prof. Laura de Simone Borma, D.Sc.
USP

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

Prof. Rogério Luiz Feijó, D.Sc.
UERJ

Rio de Janeiro

2008

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, especialmente a minha mãe e a memória do meu pai e dos meus avós.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e oportunidade de aprendizado.

À minha mãe pelo exemplo, carinho, paciência e dedicação em todas as etapas da minha vida.

Ao meu irmão pela compreensão, enorme paciência e todos os momentos que dividimos juntos.

Ao meu noivo pelo grande incentivo, ajuda e paciência nos momentos de dificuldade, sempre me apoiou para a realização do curso de mestrado.

A minha orientadora Elisabeth Ritter pela orientação e importante contribuição de seus conhecimentos em todos os momentos da presente pesquisa.

À Professora e Co-orientadora Laura pela orientação, especialmente em relação a utilização do software SoilCover.

Ao Professor Rogério Luiz Feijó pela imensa disponibilidade e atenção dispensada durante a realização de todos os ensaios de laboratório, mostrou-se um amigo.

A toda a equipe do Laboratório de Geotecnia da UERJ, Adelino Ozório, Adriane Ramos e Daiana Tavares, pela realização de todos os ensaios, pela amizade demonstrada e disponibilidade em ajudar. Passamos juntos momentos de dificuldade para a realização de alguns ensaios, no entanto tudo deu certo, pois o carinho e a boa vontade sempre estiveram presentes.

Aos estagiários, Priscila, Oscar, Andressa e Daphne, pela organização dos dados climatológicos.

Aos amigos do curso de mestrado pela convivência e apoio.

Ao Marcelo Figueiredo da Clin, Companhia de Limpeza Urbana de Niterói, pelas visitas e coleta de material do Aterro Morro do Céu.

Ao meu chefe Lucio de Medeiros por acreditar na minha competência, pela grande ajuda durante todo o curso de mestrado, sem sua compreensão não teria sido possível.

À grande amiga Roberta Beltrão pelo carinho e disponibilidade na grande ajuda fornecida.

À Professora Maria Smith pelo incentivo e por acreditar no meu potencial para a realização do curso.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram a alcançar o meu objetivo, muito obrigada.

RESUMO

BARROSO, Isabela Maria. Avaliação da camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos com a utilização do modelo SoilCover. Brasil, 2008. 129 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2008.

Este trabalho apresenta uma revisão sobre os conceitos teóricos de solos não saturados e sobre camadas de cobertura para Aterro de Disposição de Resíduos. Ressalta a tecnologia de utilização de camadas evapotranspirativas e apresenta os tipos existentes dessas camadas. Apresenta a modelagem numérica SoilCover como ferramenta para aferição de camadas propostas em função de dados meteorológicos do local. Determina a curva característica (umidade x sucção) de dois solos de dois Aterros de Disposição de Resíduos no Estado do Rio de Janeiro.

Palavras-Chave: Aterro Sanitário, Camada de Cobertura de Aterro, Camada Evapotranspirativa, Solo Não-Saturado, Aterro Morro do Céu, Aterro Sanitário de Rio das Ostras, SoilCover.

ABSTRACT

This study is a review about non saturated soils concepts and waste disposal landfill cover systems. It points out the technology of using evapotranspirative cover systems and presents the existing kinds of this cover. The SoilCover software is presented as a tool to evaluate proposed covers considering weather data from the local. Determines the soil water characteristics curve (moisture x suction) of two soils from two waste disposal landfills situated in Rio de Janeiro State..

Key words: landfill, landfill cover system, evapotranspirative cover, non saturated soil, Morro do Céu landfill, Rio das Ostras sanitary landfill, Soil Cover.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de fases de um solo não saturado, (A) diagrama simplificado de três fases; (B) diagrama completo de quatro fases (FREDLUND e RAHARDJO,1993).....	18
Figura 2.2 – Esquema ilustrativo da definição de potencial total da água no solo	21
Figura 2.3 – Água de um solo não saturado sujeita a capilaridade e adsorção que combinadas produzem um potencial matricial (HILLEL, 1971)	23
Figura 2.4 – Esquema ilustrativo da definição de sucção: corresponde a $u_a - u_w$, de sorte a não haver fluxo através da membrana semi-permeável. Comumente $u_a = P_{atm}$ (CALLE, 2005)	25
Figura 2.5 – Esquema de um Psicrômetro (CALLE, 2005)	30
Figura 2.6 – Funil de Placa Porosa (REICHARDT, 1985)	32
Figura 2.7 – Câmara de Pressão (REICHARDT, 1985)	33
Figura 2.8 – Tipos de fluxo de água do solo para o papel filtro (MARINHO, 1994)	34
Figura 2.9 – Curvas características de solos argilosos e arenosos (HILLEL, 1971)	36
Figura 2.10 – Curvas características por umedecimento e secagem (HILLEL, 1971)	37
Figura 2.11 – Efeito da estrutura do solo na curva de retenção (HILLEL, 1971)	39
Figura 2.12 – Curvas características obtidas para diferentes tipos de solos (KOOREVAR et al, 1983)	40
Figura 2.13 – Controle do volume para o fluxo vertical por uma camada evapotranspirativa (ZORNBERG, 2006)	49

Figura 3.1 – Tipos de cobertura – controle da infiltração (KOERNER e DANIEL, 1997)	52
Figura 3.2 – Tipos de cobertura – controle da liberação de gases (KOERNER e DANIEL, 1997)	52
Figura 3.3 – Tipos de cobertura – separação física resíduo / meio ambiente (KOERNER e DANIEL,1997)	52
Figura 3.4 – Camadas de um sistema de cobertura final (KOERNER e DANIEL, 1997)	53
Figura 3.5 – Tipos de configurações de cobertura final (KOERNER e DANIEL, 1997)	54
Figura 3.6 – efeito “quebra” de capilaridade (ZORNBERG, 2007)	61
Figura 3.7 – função k do efeito quebra de capilaridade (ZORNBERG, 2007)	62
Figura 3.8- flutuação do teor de umidade (ZORNBERG, 2007)	63
Figura 3.9 – Curva sucção x umidade – Aterro de Palmas (VIDAL E BORMA, 2006)	72
Figura 3.10 - Perfil de saturação ano de 2002 (VIDAL E BORMA, 2006)	72
Figura 3.11 - Perfil de saturação ano de 2003 (VIDAL E BORMA, 2006)	73
Figura 3.12 - Perfil de saturação ano de 2004 (VIDAL E BORMA, 2006)	73
Figura 3.13 – Curva característica dos materiais e condutividade hidráulica, ambas fornecidas ao programa SoilCover (MENDONÇA ET AL., 2003)	75
Figura 4.1 – Componentes do Balanço Hídrico (O’KANE, 2002)	78
Figura 4.2 – Gráfico Umidade (%) x Dia (Niterói)	79
Figura 4.3 – Gráfico Temperatura (°C) x Dia (Niterói)	79

Figura 4.4 – Gráfico Precipitação (mm/dia) x Dia (Niterói)	80
Figura 4.5 – Gráfico Umidade (%) x Dia (Rio das Ostras)	81
Figura 4.6 – Gráfico Temperatura (°C) x Dia (Rio das Ostras)	81
Figura 4.7 – Gráfico Precipitação (mm/dia) x Dia (Rio das Ostras)	82
Figura 4.8 – Curva Granulométrica – Morro do Céu – Amostra 1	83
Figura 4.9 – Curva Granulométrica – Morro do Céu – Amostra 2	84
Figura 4.10 – Curva granulométrica – Rio das Ostras (PIRES, 2007)	85
Figura 4.11 – Curva de Compactação – amostra nº 2 Morro do Céu	86
Figura 4.12 – Curva de Compactação – Rio das Ostras	87
Figura 4.13 – Cravação do anel	88
Figura 4.14 – Umedecimento do corpo de prova	89
Figura 4.15 – Preparação dos corpos de prova	90
Figura 4.16 – Desmontagem dos corpos de prova	92
Figura 4.17 – Papel-filtro na estufa	92
Figura 4.18 – Curva característica Morro do Céu	94
Figura 4.19 – Curva característica média Morro do Céu	94
Figura 4.20 – Curva característica Rio das Ostras	95

Figura 4.21 – Curva característica média Rio das Ostras	96
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Pt	Potencial total
Pg	Potencial gravitacional
Pos	Potencial osmótico
Pp	Potencial de pressão
Pm	Potencial matricial
Ψ	sucção total (kPa)
Ψ_M	sucção matricial [F/L ²]
u_a	pressão do ar [F/L ²]
u_w	pressão da água [F/L ²]
ρ_w	massa específica da água (998kg/m ³ a 20 °C)
R	constante universal dos gases (8,31432 J/molK)
T	temperatura (K)
w_v	massa molecular do vapor de água (18,016 kg/molK)
u_v	pressão parcial do vapor de água dos poros (kPa)
u_{v0}	pressão de saturação do vapor de água a mesma temperatura de u_v (kPa)
ψ_a	sucção matricial que corresponde à entrada de ar (air entry) [L]
ψ_r	sucção matricial que corresponde à umidade volumétrica residual [L]
θ	umidade volumétrica [L ³ / L ³]
θ_s	umidade volumétrica de saturação [L ³ / L ³]
θ_r	umidade volumétrica residual [L ³ / L ³]
α	parâmetro de ajuste da curva [1/L]
a_r	valor aproximado da sucção matricial de entrada de ar [L]
n,m	parâmetros de ajuste
K	coeficiente de condutividade hidráulica
Δh	perda de carga
L	comprimento do solo
K(θ)	condutividade hidráulica não saturada (m/s)
v	velocidade (ou densidade) de descarga (m/s)
z	coordenada de posição (m)

D_s	diâmetro efetivo das partículas [L]
γ_w	peso específico do fluido [F/L ³]
μ	viscosidade do fluido [MT/L ²]
e	índice de vazios
C	fator de forma
E	fluxo de evaporação real
\tilde{A}	declividade da curva de pressão de vapor d'água versus temperatura média do ar
R_n	energia líquida de radiação disponível na superfície do solo (mm/dia de água)
W_a	velocidade do vento (Km/h)
P_a	pressão de vapor do ar acima da superfície de evaporação (mm Hg)
B	inverso da umidade relativa do ar
A	inverso da umidade relativa da superfície do solo
h_w	carga hidráulica total (m)
t	tempo (s)
C_w	coeficiente de adensamento com relação à fase de água líquida
ρ_w	peso específico da água (Kg/m ³)
g	aceleração da gravidade (9,81 m/s ²)
m_2^w	inclinação da curva de retenção de umidade (1/KPa)
y	posição (m)
K_w	condutividade hidráulica como função da sucção mátrica (m/s)
C_v	módulo de variação de volume com relação à fase vapor
P	pressão total de gás na fase ar (KPa)
P_v	pressão de vapor de água em meio poroso não saturado (KPa)
D_v	coeficiente de difusão do vapor d'água através do solo (kg.m/KN.s)
P_{sv}	pressão de saturação no solo a uma temperatura T
h_r	umidade relativa do solo como uma função da sucção total e da temperatura
C_h	calor específico volumétrico (J/m ³ °C)
C_v	calor específico do solo (J/Kg °C)
ρ_s	densidade do solo (Kg/m ³)
λ	condutividade térmica (W/°C)
L_v	calor latente de vaporização (J/Kg)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE SOLO NÃO SATURADO	17
2.1 Solos Não-Saturados – As fases do solo	17
2.2 Potencial da Água no Solo	20
2.2.1 Potencial Osmótico (Pos)	22
2.2.2 Potencial Matricial ou Mátrico (Pm).....	22
2.2.3 Potencial Gravitacional (Pg).....	23
2.2.4 Potencial de Pressão (Pp)	24
2.3 Conceito de Sucção do Solo	24
2.3.1 Métodos de medição e controle da sucção	26
2.4 Características Hidráulicas	35
2.4.1 Curva de Retenção de Água do Solo	35
2.4.1.1 Fatores que Interferem na Curva de Retenção de Água do Solo.....	38
2.4.1.2 Relações Empíricas para Definir a Curva de Retenção de Água no Solo	40
2.4.2 Condutividade Hidráulica.....	42
2.4.2.1 Condutividade Hidráulica Saturada.....	42
2.4.2.2 Condutividade Hidráulica Não-Saturada.....	43
2.4.3 Equação de Richards – cálculo do fluxo em solo não-saturado	47
3. CAMADAS DE COBERTURA.....	50
3.1 Tipos de Cobertura	51
3.2 Componentes do Sistema de Cobertura Final.....	53
3.3 Descrição das Camadas	54
3.3.1 Camada superficial	54
3.3.2 Camada de proteção.....	55
3.3.3 Camada de Drenagem.....	56
3.3.4 Camada Barreira Hidráulica ou de Gás	57
3.3.5 Camada de Coleta de Gás.....	58
3.3.6 Camada de Base / Fundação	59
3.3.7 Novas Tendências – Camada Evapotranspirativa	59
3.4 Modelo SoilCover	65
3.4.1 Exemplo de Utilização do Modelo Soil Cover.....	71
4. ESTUDO PRELIMINAR DE DOIS LOCAIS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS	76
4.1 Dados meteorológicos	77
4.2 Caracterização dos Solos	82
4.2.1 Curva Granulométrica	82
4.2.2 Limites de Atterberg – Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade.....	85
4.2.3 Densidade Real dos Grãos.....	86
4.3 Determinação da curva de compactação Proctor Normal	86
4.4. Determinação da permeabilidade saturada	87
4.5. Ensaio de Sucção - Curva característica solo-água	87
4.5.1 Utilização do papel-filtro.....	88
4.5.2 Resultados do Ensaio de Sucção	93
4.6 Considerações finais.....	96
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	98
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
7. ANEXOS.....	105

1. INTRODUÇÃO

A disposição adequada de resíduos sólidos seja de origem urbana ou industrial continua sendo um dos grandes desafios dentro do Saneamento Básico e Ambiental. De forma geral, a disposição destes resíduos no solo apresenta-se como uma alternativa bastante eficiente. Entretanto, caso esta disposição seja realizada de forma inadequada, pode acarretar sérios problemas como a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB/2000, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, divulgada no início de 2002, indica que são gerados no país cerca de 228.000 t/dia de resíduos, sendo 62% dos resíduos sólidos urbanos gerados na região sudeste. Em relação à forma de disposição de resíduos sólidos domiciliares, públicos e comerciais a pesquisa informa que cerca de 64% dos municípios continuam depositando em lixões e aproximadamente 32% possuem aterros adequados (sanitários ou controlados); cerca de 5% dos municípios não declararam onde depositam os seus resíduos.

No caso específico do Estado do Rio de Janeiro a quantidade total gerada é de cerca de 17.000 t/dia, sendo 13.000 t/dia na Região Metropolitana e 8.000 t/dia no município do Rio de Janeiro, sendo que cerca de 12.500 t/dia possuem uma destinação adequada (PNSB, 2000). No entanto, ressalta-se que nesse levantamento está incluso o Aterro Municipal de Gramacho. Assim esses números podem ser revistos e com base no Pró-lixo, Programa do Governo do Estado do Rio de Janeiro, uma revisão desses números foi efetuada resultando em: 4% do lixo do estado do Rio de Janeiro vai para Aterro Sanitário e cerca de 30% está depositado em lixão. (MESQUITA, 2004).

É evidente a necessidade urgente de implantação, nos próximos anos, de uma quantidade significativa de novos aterros sanitários nos municípios brasileiros e fechamento dos lixões existentes. A principal preocupação ambiental associada ao fechamento dos aterros de resíduos, conforme já comentado, está relacionada ao controle de suas emissões, em particular, o lançamento do lixiviado (chorume) no ambiente (COSSU, 1998). O controle da migração do percolado (FERREIRA ET AL, 2001) é fundamental para minimizar seus impactos no meio ambiente. Neste aspecto, as camadas

de cobertura são de fundamental importância para os lixões. Nos aterros sanitários as barreiras de proteção na base dos aterros, as camadas de cobertura e os sistemas de drenagem irão mitigar os impactos ambientais.

A camada de cobertura final de um aterro deve assegurar: a proteção à saúde humana e ao meio ambiente; a mínima infiltração de água de chuva no aterro encerrado; a drenagem da água; a minimização do fluxo de gases e da erosão, e também ser resistente a recalques (TCHOBANOGLIOUS ET AL., 1993). Quando a relação custo/eficiência das coberturas convencionais é avaliada, levando-se em consideração o material a ser utilizado na construção, surge uma proposta inovadora, a cobertura final evapotranspirativa, cujo projeto leva em consideração as condições locais.

A importância deste estudo para o estado do Rio de Janeiro é enorme, visto que o Aterro Metropolitano de Gramacho e o Aterro de Morro do Céu, em Niterói, estão em fase final de operação. Existe ainda a necessidade de implantar novos aterros nos demais municípios e todos os lixões deverão ser remediados.

Os aterros possuem uma vida útil e com o passar do tempo essa vai se esgotando e a área disponível vai ficando reduzida até que fique totalmente utilizada. Em função disso, faz-se necessária a construção de um sistema de cobertura final do aterro para que seja feita a separação física entre os resíduos e o meio ambiente.

O objetivo desta pesquisa é:

1) Revisão dos conceitos necessários para o entendimento de camadas de cobertura de aterro. Foi feita uma abordagem sobre camadas evapotranspirativas, estas funcionam não como uma barreira e sim como uma esponja ou um reservatório que armazena umidade durante a precipitação e posteriormente devolve essa umidade para a atmosfera por meio da evapotranspiração ou drenagem lateral, podem ser nomeadas como camadas monolíticas ou barreiras capilares (ZORNBERG, 2007).

2) Apresentação dos tipos de camadas de cobertura, especialmente as camadas evapotranspirativas;

3) Abordagem da existência de modelos computacionais utilizados para dimensionamento da camada de cobertura.

4) Estudos preliminares de dois locais de disposição de resíduos do Estado do Rio de Janeiro: determinação das propriedades hidráulicas – ensaio de sucção (teor de umidade x sucção) e permeabilidade saturada para os dois solos.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE SOLO NÃO SATURADO

Para se projetar coberturas evapotranspirativas é necessário que se determine: a capacidade de acumulação de água do solo local disponível, que estará na condição não saturada; a quantidade de água a ser acumulada na cobertura nos períodos em que a taxa de precipitação exceda a de evapotranspiração; e a espessura de camada de solo necessária.

Solos tropicais são, em geral, uma mistura de solos arenosos, argilosos e siltosos. Na condição não saturada, que será a condição mais usual da camada de cobertura, haverá um valor de sucção mátrica em função do teor de umidade, a chamada curva característica. Estes valores variam em função das condições de compactação desta camada e em função da precipitação pluviométrica (WILSON ET AL, 1994).

Neste capítulo será realizada uma revisão de alguns conceitos básicos para o entendimento dessa situação.

2.1 Solos Não-Saturados – As fases do solo

Os solos são encontrados na natureza como uma mistura de várias fases. O solo seco é constituído por uma composição de partículas sólidas e ar, enquanto que o solo saturado é constituído por uma mistura de partículas sólidas e água. Entre estes dois extremos há os solos não saturados, os quais se constituem de partículas sólidas, água e ar em porcentagens volumétricas diferentes.

O termo solo não saturado que hoje é utilizado no português técnico, era até pouco tempo denominado solo parcialmente saturado. O termo solo parcialmente saturado vem do uso inglês do termo “partially satured soils”. Também do inglês temos a expressão “unsatured soil”, que em português ganhou duas versões: solo insaturado e

solo não saturado. Sendo esta última expressão a mais utilizada atualmente. (MARINHO, 2005).

O solo é comumente referido como um sistema de três fases: fase sólida, fase líquida e fase gasosa. Recentemente, uma quarta fase foi incluída, a fase de interação ar-água, também chamada de membrana contráctil (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A massa e o volume de cada fase podem ser esquematicamente representados pelo diagrama de fases. A figura 2.1 (A) mostra um diagrama simplificado de três fases, onde podemos observar que a membrana contráctil faz parte da fase água. A figura 2.1 (B) mostra um diagrama mais completo de quatro fases.

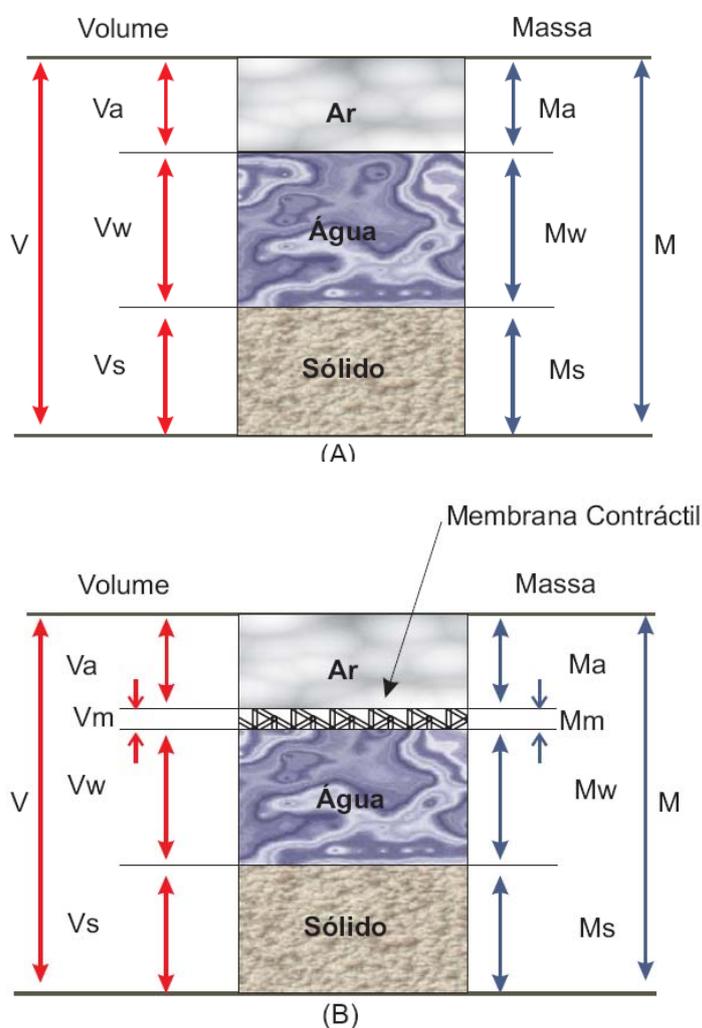


Figura 2.1 – Diagrama de fases de um solo não saturado, (A) diagrama simplificado de três fases; (B) diagrama completo de quatro fases (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

- Fase sólida

A fase sólida do solo é representada pelas partículas de minerais, podendo apresentar características altamente variáveis como tamanho, forma, textura, composição mineralógica, configuração cristalográfica etc.

Um aspecto importante a ser considerado é a superfície específica, à qual estão associados o tipo e o predomínio das forças que atuam na superfície das partículas de solo. Quanto mais fina a partícula de solo, maior será a superfície específica, e maior será a intensidade de forças elétricas atuando na superfície destas partículas.

As características e propriedades das partículas sólidas, quanto à forma e tamanho, podem influenciar no comportamento do solo. Dentro da faixa de pressões normalmente aplicadas nos solos, sob o ponto de vista da engenharia civil, as partículas sólidas são consideradas incompressíveis.

- Fase Líquida

A fase líquida é composta fundamentalmente de água, sais e ar dissolvido. Ela pode ocupar integralmente o espaço vazio da fase sólida ou parcialmente como no caso dos solos não-saturados. A água dos poros tem sido classificada em três tipos: água gravitacional, água capilar e água adsorvida. A água gravitacional é a água que está livre para se mover por entre os poros, sob ação da gravidade. A água capilar é aquela que permanece no solo devido às forças de capilaridade desenvolvidas no contato água - partícula de solo, e se movimenta dentro da massa de solo por ação destas forças. O fenômeno de capilaridade só existe quando o solo está na condição não saturada. A água adsorvida é a água que se adere à superfície da partícula, através de mecanismos de adsorção, devido à existência de cargas elétricas negativas nessa superfície. Este tipo de água faz parte da fase sólida e não pode ser separada por forças hidrodinâmicas. Sob o ponto de vista da hidrodinâmica, a água capilar e a água gravitacional formam a água livre (JUCÁ, 1990).

A água pode apresentar variações na sua densidade e na sua viscosidade devido às diferenças de temperatura e pressão. Para as condições usuais do sistema solo-água, as

variações de densidade e viscosidade são desprezíveis em relação às variações de pressão, podendo assim ser considerada como incompressível (SCOTT e WESLEY, 1965).

- Fase Gasosa

A fase gasosa, constituída por ar livre e água em forma de vapor, está presente no espaço poroso não ocupado pela água, quando o solo se encontra na condição seca ou não saturada.

- Interface Ar-água

A interface ar-água, também conhecida como membrana contráctil, é composta por uma película de propriedades diferentes daquelas da água e do ar que a compõem. No entanto, as relações massa-volume consideram o solo como um sistema trifásico, fazendo com que o volume da membrana contráctil seja desprezado e seu peso incorporado ao peso da água (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

2.2 Potencial da Água no Solo

O estado de energia da água do solo pode ser expresso como a soma das duas formas clássicas de energia, a cinética e a potencial. Sendo a velocidade da água no solo reduzida considera-se a energia cinética nula, portanto a energia potencial pode caracterizar o estado de energia da água do solo (BAVER ET AL., 1972).

Quando um trabalho é realizado sobre a água, sob condições específicas, sua energia potencial é alterada em uma quantidade igual ao trabalho realizado. A variação da energia potencial da água em consideração, com relação a um estado padrão de referência arbitrado, é chamado de Potencial Total da Água do Solo (MARSHALL & HOLMES, 1981).

A água no estado padrão – Ponto A – encontra-se, livre de sais minerais ou outros solutos, em uma determinada cota, e está sujeita à pressão atmosférica (Figura 2.2).

O Potencial Total da Água do Solo, na Figura 2.2, representa o trabalho útil que deve ser realizado em uma quantidade infinitesimal de água pura, para conduzi-la, reversível e isotermicamente, desde um reservatório situado a uma altura conhecida – Ponto A – até a água no solo, na cota de interesse (Ponto B).

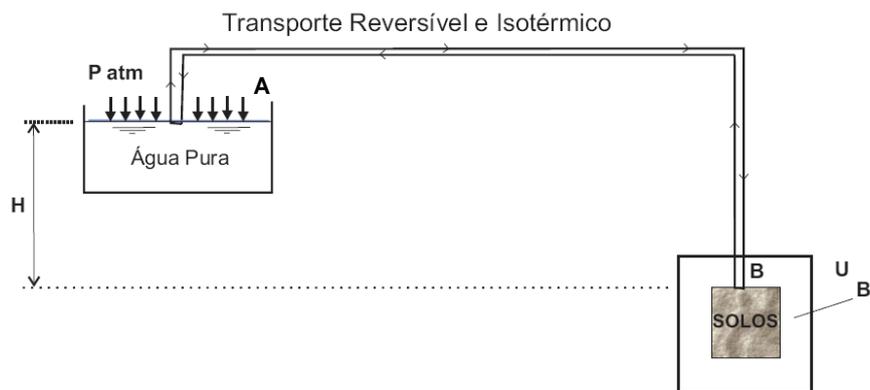


Figura 2.2 – Esquema ilustrativo da definição de potencial total da água no solo.

A Equação (2.1) apresenta o potencial total da água no solo, cujos componentes são: o potencial osmótico, o potencial matricial, o potencial gravitacional, e o potencial de pressão. Outros componentes podem ser incluídos, como, o potencial de consolidação ou o potencial térmico, porém serão descartados por terem importância menor no comportamento geotécnico de solos não saturados.

$$P_t = P_g + P_{os} + P_p + P_m \quad (2.1)$$

Onde:

P_t = Potencial total;

P_g = Potencial gravitacional;

P_{os} = Potencial osmótico;

P_p = Potencial de pressão;

P_m = Potencial matricial.

2.2.1 Potencial Osmótico (Pos)

O Potencial Osmótico ou de soluto, surge em função da diferença de composição entre a água do solo (presença de sais minerais e substâncias orgânicas) e a água pura. Esta diferença de composição só causará movimento de água pura quando o sistema estiver “separado” por uma membrana semipermeável. Sendo membrana semipermeável aquela que só permite passagem de solvente (no caso a água pura), não deixando passar o soluto. Como no solo, de uma maneira geral, não existem membranas semipermeáveis, qualquer diferença de potencial osmótico que se estabeleça provoca um movimento de solutos (que se redistribuem) e um movimento desprezível de água.

Geralmente com teor de umidade alto esta componente é desprezível. Sua importância cresce quando a concentração salina é significativa ou quando o teor de umidade é muito baixo (REICHARDT, 1987).

2.2.2 Potencial Matricial ou Mátrico (P_m)

O Potencial Matricial é um potencial de pressão e resulta do efeito combinado da ação de forças capilares e de adsorção, que surgem devido à interação entre a água e as partículas sólidas que compõem o solo (Figura 2.3).

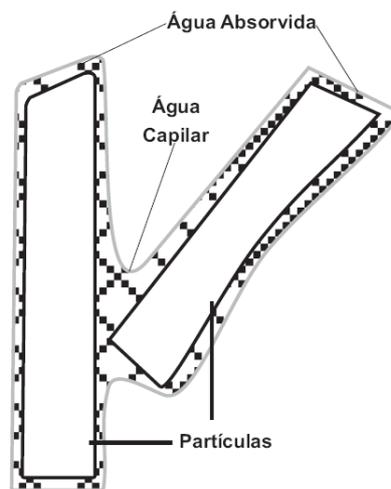


Figura 2.3 – Água de um solo não saturado sujeita a capilaridade e adsorção que combinadas produzem um potencial matricial (HILLEL, 1971).

A componente matricial é nula quando o solo se encontra na condição saturada. À medida que o solo vai se tornando não saturado, o efeito da capilaridade começa a atuar e o potencial mátrico torna-se negativo. Para altos valores de umidade, a capilaridade é o principal fenômeno que determina o potencial mátrico. 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 mátrico (REICHARDT, 1987).

2.2.3 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. O plano de referência é o estado padrão para a gravidade e o plano mais

comumente escolhido é a superfície do solo. O potencial gravitacional tem valor zero no plano de referência, é positivo acima dele e negativo abaixo dele (REICHARDT, 1987).

2.2.4 Potencial de Pressão (Pp)

O potencial de pressão é medido em relação à condição padrão, tomada como sendo a da 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. Quando o solo estiver na condição não saturada, o potencial mátrico passará a atuar no lugar do potencial de pressão (REICHARDT, 1987).

2.3 Conceito de Sucção do Solo

A interação solo-água pode ser quantificada a partir da afinidade que um solo não saturado tem por água. Se colocado em contato com um reservatório de água o solo absorve água, isto é, ele exerce uma sucção sobre a água. Esta avidez por água é função da mineralogia, densidade, umidade do solo, grau de compactação, granulometria e estrutura do solo (MARINHO, 2005). 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. Quando a água livre migra dentro do solo, ela poderá ser retida ou adsorvida por este. 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 total do solo é definida como a pressão manométrica negativa, em relação à pressão externa de gás sobre a água do solo, que deve ser aplicada a um

reservatório de água pura (à mesma cota e temperatura) de sorte a que se mantenha o equilíbrio, através de uma membrana semi-permeável (permite o fluxo de água porém não o de solutos), entre a água do reservatório e a água do solo. Definição esquematizada pela Figura 2.4.

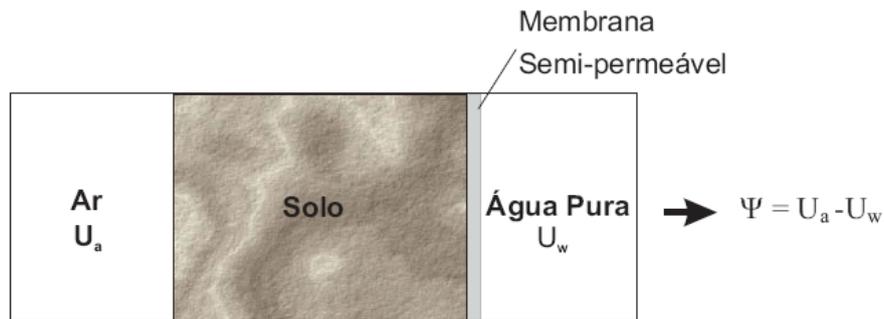


Figura 2.4 – Esquema ilustrativo da definição de sucção: corresponde a $u_a - u_w$, de sorte a não haver fluxo através da membrana semi-permeável. Comumente $u_a = P_{atm}$ (CALLE, 2005).

Observa-se que a sucção total (Ψ), corresponde ao potencial total, quando o potencial gravitacional pode ser desprezado. Desta maneira, esta mesma sucção total, ou simplesmente sucção do solo, pode ser decomposta em duas componentes: a sucção osmótica (Ψ_{os}), e a sucção matricial (Ψ_M), que correspondem, respectivamente, ao potencial osmótico (produzido pela diferença de composição entre a água do solo e a água pura, devido à presença de sais minerais e substâncias orgânicas) e ao potencial matricial (resultante da ação de forças capilares e de adsorção, que surgem devido à interação entre a água e as partículas minerais, ou seja, a matriz que compõe o solo).

Desta forma, tem-se:

$$\Psi = \Psi_M + \Psi_{os} = u_a - u_w \quad (2.2)$$

Onde:

Ψ - sucção total [F/L^2]

Ψ_M - sucção matricial [F/L²]

u_a - pressão do ar [F/L²]

u_w - pressão da água [F/L²]

A sucção osmótica (ψ_o) equivale à sucção total quando o solo se encontra saturado, ou seja, quando a componente matricial não ocorre, restando apenas o efeito da concentração de solutos.

A sucção matricial (ψ_M) equivale à sucção total 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).

Para a mecânica dos solos tem-se rotineiramente, atribuído uma mudança na sucção total a variações na sucção matricial (sucção osmótica desprezível), podendo ser também definida como a diferença entre a pressão do ar (u_a) e a pressão da água (Ψ_w) presentes nos poros do solo, conforme a equação 2.3:

$$\Psi = \Psi_M = u_a - u_w \quad (2.3)$$

Supondo-se que os vazios do solo estejam em contato com a pressão atmosférica (considerada igual a zero, para efeito de referência), a pressão do ar terá o mesmo valor da pressão atmosférica. Sendo assim, a sucção matricial será representada pela pressão negativa da água nos poros.

2.3.1 Métodos de medição e controle da sucção

Os estudos sobre a sucção do solo datam desde o século XIX, quando os primeiros estudos foram aplicados à agricultura. Uma melhor compreensão dos métodos de medição da sucção pode ser possível por meio de uma análise detalhada desses primeiros trabalhos. Esses métodos de medição utilizam ferramentas básicas, onde o

conceito físico / químico é facilmente compreendido. Com o objetivo de estudar as plantas da região foi apresentado um estudo sobre medições de sucção no deserto. Fez uso de tubos capilares com uma membrana semi-permeável, preenchidos com soluções de diferentes concentrações. Desta forma, foi capaz de verificar se o solo absorvia ou perdia água por osmose. Em outras palavras, Livingston foi capaz de avaliar a sucção que se encontrava naquele solo.

Em 1916, foi desenvolvido um método para determinação indireta da sucção utilizando sementes de plantas que funcionavam como elemento de absorção. Posteriormente esse método foi aprimorado por Gardner em 1937. Outros autores como Livingston & Koketsu (1920), Hansen (1926) etc, também contribuíram para os estudos da determinação da sucção em solos. Edlefsen & Anderson (1943) fizeram os estudos envolvendo os aspectos teóricos da termodinâmica que se relacionam com a interpretação e compreensão da sucção em solos. E, na mecânica dos solos Terzaghi (1925) foi o primeiro a referir-se à capacidade dos solos argilosos de sustentarem elevada sucção.

São diversas as técnicas disponíveis para medição da sucção do solo, seja no campo ou no laboratório. A tabela abaixo apresenta um resumo de algumas técnicas de medição de sucção do solo (MARINHO e PEREIRA, 1998).

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
Pisicômetro	Total e osmótica	100 – 8000
Funil de Placa Porosa	Matricial	0 – 70
Papel-filtro	Matricial e total	0 – 29000

Tabela 2-1 – Técnicas de medida de sucção (modificado de MARINHO e PEREIRA, 1998).

2.3.1.1 Tensiômetro

É datado do início do século XX e, segundo OR (2001), Livingston foi o primeiro a utilizar o tensiômetro para medir e controlar a sucção matricial em solos. Este instrumento é aparentemente o mais simples de ser utilizado para medir sucção, do ponto de vista dos conceitos que o envolvem.

É um instrumento que permite medir diretamente a sucção matricial do solo e consiste de um tubo de plástico onde em uma extremidade há instalado um sistema de medição de pressão, o sistema de medição de pressão 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 permitirá o fluxo de água entre o solo e o próprio tensiômetro.

O princípio básico de funcionamento do tensiômetro é a sucção da água do instrumento pela água existente no solo, até que se estabeleça o equilíbrio, cessando assim o fluxo. Isto ocorre devido à diferença de pressão que há entre eles.

Uma vez atingido o equilíbrio entre o solo e o sistema de medição, a água no tensiômetro terá a mesma sucção do solo.

Porém, há uma conceituação teórica relacionada ao funcionamento deste instrumento que possui forte ligação com suas limitações. Dentre as limitações, a maior delas está relacionada com a máxima sucção possível de ser medida, medem sucções até aproximadamente 90kPa, devido ao fenômeno usualmente descrito como cavitação, expansão de microbolhas de ar dentro do sistema.

Segundo MARINHO & CHANDLER (1994), a técnica necessária para evitar a cavitação em tensiômetros envolve os seguintes passos:

- O uso de água deaerada é importante para evitar a saturação da água por ar (ferver a água é um método apropriado, no entanto o contato da água com o ar pode em minutos saturar a água com ar).
- A água e todas as superfícies dentro do sistema de medição devem ser extremamente puras e limpas (e.g. HENDERSON and SPEEDY 1980).

- As superfícies em contato com a água do sistema devem ser as mais polidas possíveis para evitar ou reduzir o número e tamanho das microcavidades. Quanto menor a área superficial, mais fácil será evitar a cavitação.
- O sistema deve ser submetido a vácuo para que seja removida a maior quantidade de ar possível aprisionado nas microcavidades. Dificilmente todo o ar será removido por este processo (e.g. JONES ET AL, 1981).
- O sistema deve ser submetido a um processo de ciclos de pressão, indo de zero (ou negativa) até uma pressão positiva da ordem de 3MPa. Este processo pode ajudar na dissolução ou liberação do ar presentes nas cavidades.(e.g. CHAPMAN ET AL, 1975; RICHARDS E TREVENA, 1976).
- A pré-pressurização do sistema com alta pressão é necessária para dissolver ou estabilizar o ar presente (e.g. HARVEY ET AL, 1944).

2.3.1.2 Aparelho Extrator de Richards

O princípio de medida da sucção mátrica do solo utilizando o extrator de Richards consiste basicamente em colocar uma amostra de solo saturado em placas de cerâmica, submetê-la a uma determinada pressão, esperar a amostra atingir a drenagem máxima da água contida nos poros do solo (correspondente à tensão aplicada) e determinar a umidade da amostra.

2.3.1.3 Psicrômetro

São aparelhos de medição direta 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 que permite estabelecer um equilíbrio entre o teor de umidade relativo do ar dos vazios do solo e do ar

do seu interior. 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.

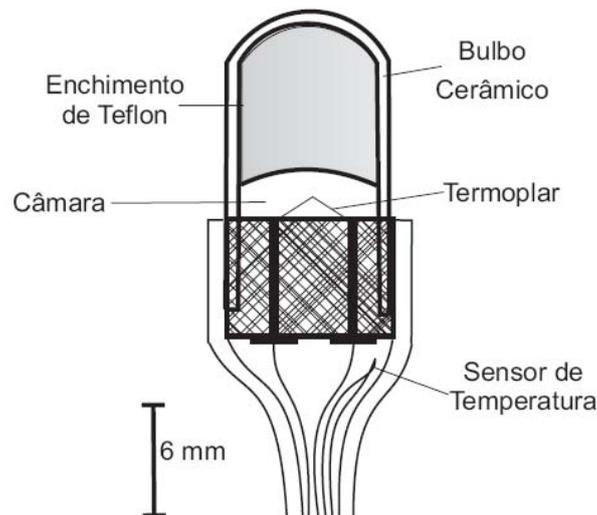


Figura 2.5 – Esquema de um Psicômetro (CALLE, 2005).

Quando circula a corrente na direção adequada para o abaixamento da sua temperatura, fica coberto por uma certa quantidade da água que se condensou, transformando-se em um bulbo úmido. Quando a água condensada começa a se evaporar, é criada uma diferença de potencial entre esta junta e outra de referência, que resulta numa corrente elétrica. A magnitude da corrente elétrica depende, dentre outros fatores, da taxa de evaporação da água condensada sobre a junta, que é função da umidade relativa do ar no interior do bulbo poroso. Assim, admitido o equilíbrio do ar no interior do bulbo com o ar do solo, a sucção total pode ser obtida através da seguinte relação (CAMPOS, 1994):

$$\psi = \frac{RT}{W_v} \rho_w \ln \left(\frac{u_v}{u_w} \right) \quad (2.4)$$

Onde:

ψ - sucção matricial (kPa);

ρ_w - massa específica da água (998kg/m³ a 20 °C);

R - constante universal dos gases (8,31432 J/molK);

T - temperatura (K);

w_v - massa molecular do vapor de água (18,016 kg/molK);

u_v - pressão parcial do vapor de água dos poros (kPa); e

u_{v0} - pressão de saturação do vapor de água a mesma temperatura de u_v (kPa).

2.3.1.4 Funil de Placa Porosa

É o equipamento utilizado para sucções matriciais com limitação de medição de 70kPa devido ao problema de cavitação ou pressão de borbulhamento da pedra porosa. No entanto, na prática não resulta possível utilizar um funil de 7m de altura de água, sendo estes geralmente pequenos. Na Figura 2.6 pode-se ver um esquema que aplica a sucção matricial através da placa porosa. A sucção matricial estará dada pela altura de água (h), visto que a pressão no ar é a atmosférica.

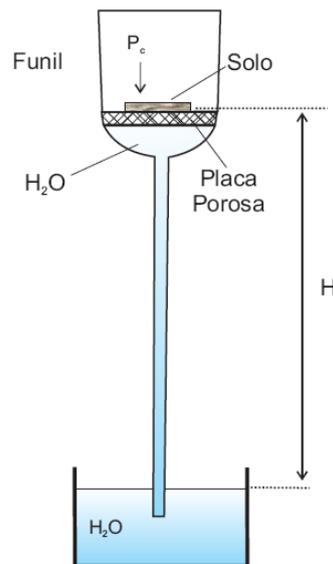


Figura 2.6 – Funil de Placa Porosa (REICHARDT, 1985)

2.3.1.5 Placas ou Membranas de Pressão

Usadas para sucções matriciais superiores a 70kPa. Pelo fato da água cavitatar a 1 atm., é aplicada uma pressão de ar sobre uma placa porosa de alta pressão de entrada de ar, que tem a face inferior ligada à pressão atmosférica. O aparelho é constituído de uma câmara e do elemento de alta entrada de pressão de ar, e pode-se atingir sucções matriciais até cerca de 15000kPa, conforme Figura 2.7.

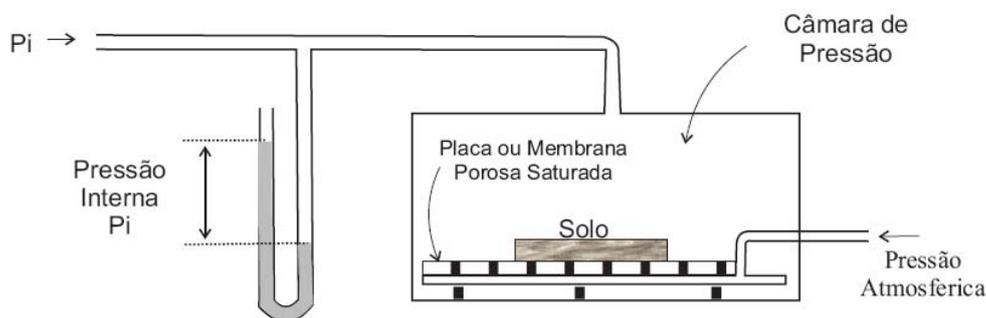


Figura 2.7 – Câmara de Pressão (REICHARDT, 1985)

O ensaio é realizado da seguinte maneira: coloca-se um corpo de prova sobre a pedra porosa saturada, em seguida, aplica-se uma pressão de ar, fazendo com que a sucção matricial induzida seja transmitida ao solo, até que ocorra a eliminação parcial da água para este estágio. Após disto, o corpo de prova é pesado para determinação de sua umidade. Repete-se este procedimento sucessivas vezes, até não ocorrer mais variações de umidade no corpo de prova; nesta condição, a pressão de ar aplicada será igual a sucção matricial do solo. Com os dados de sucção matricial e de umidade respectivamente para cada estágio pode-se obter a curva de retenção do solo.

2.3.1.6 Método do Papel-Filtro

O método do papel filtro é um método de medição indireta da sucção do solo, este terá um maior destaque, pois foi o método adotado neste trabalho, e posteriormente serão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório.

A técnica do papel filtro tem sido utilizada desde 1937, desde então muitos pesquisadores estão fazendo uso desta para medir sucção pelo fato de ser o método mais simples para se medir a sucção.

Quando um solo é colocado em contato com um material poroso capaz de absorver água, esse fluxo de água para o material acontecerá até que o equilíbrio seja

alcançado, portanto, quando um solo com determinada umidade, for colocado em contato com o papel-filtro, com umidade menor, este último absorve a água do solo de tal maneira que o sistema atinja um equilíbrio.

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) apud CALLE (2000), 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 infere-se a sucção do solo segundo uma curva de calibração do papel-filtro.

Este método permite, em laboratório, a medição tanto da sucção total quanto da sucção matricial. O que difere entre os dois tipos de medição de sucção é o contato entre o solo e o papel-filtro. Quando o papel-filtro não estiver em contato direto com o solo, o ar que fica entre o solo e o papel-filtro atua como uma membrana semi-permeável para os sais, permitindo apenas o fluxo de vapor d'água, portanto, a sucção medida será a sucção total, Figura 2.8 (A). Para que não haja o contato direto do solo com o papel, recomenda-se a colocação de um disco perfurado do mesmo diâmetro do corpo de prova entre o solo e o papel-filtro. Por outro lado, para medir a sucção matricial o papel-filtro deve ser colocado diretamente sobre o solo, Figura 2.8 (B).

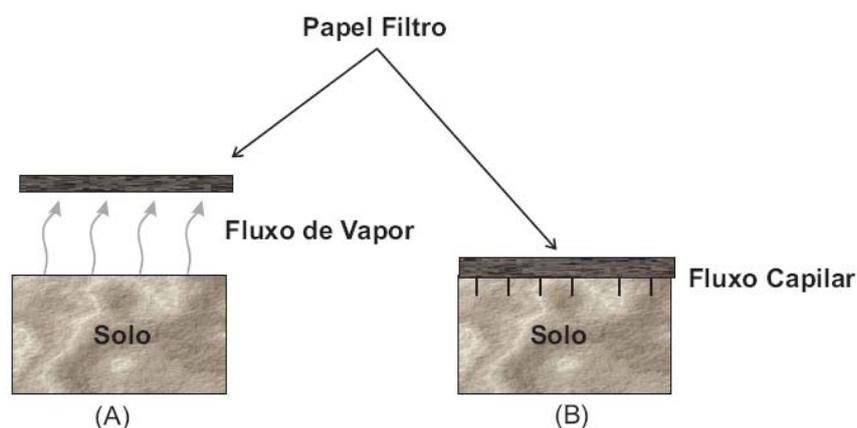


Figura 2.8 – Tipos de fluxo de água do solo para o papel filtro (MARINHO, 1994).

Na situação onde a sucção ocorre por fluxo de vapor, as moléculas de água tendem a escapar do solo por forças capilares de dentro do solo ou por eventuais forças osmóticas. Já no fluxo capilar, ocorre através do contato entre as partículas do solo e as fibras do papel filtro, sendo que o papel absorve a água do solo até que ocorra o equilíbrio.

O papel filtro deve ser usado diretamente da caixa, isto é no estado seco ao ar (CHANDLER E GUTIERREZ, 1986). A norma americana ASTM-D5298-92 sugere que o papel filtro seja seco em estufa por no mínimo 16 horas antes do uso. Este procedimento pode afetar as características de absorção do papel resultando na alteração da curva de calibração (MARINHO, 1995).

Porém, apesar de ser o método mais simples para se medir a sucção, é exatamente essa simplicidade que induz o usuário a uma utilização descuidada, ocasionando erros e gerando dúvidas sobre o método, assim requer cuidado durante a determinação do teor de umidade do papel-filtro. 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 30s. A técnica também requer manuseio do papel e precisão da pesagem (da ordem de 0.001g). De acordo com MARINHO (1994) o tempo de transferência do papel-filtro para uma cápsula fechada ou um saco plástico auto-selante deve ser de no máximo 5s.

2.4 Características Hidráulicas

2.4.1 Curva de Retenção de Água do Solo

A curva de retenção de água do solo também pode ser denominada curva de sucção matricial e curva característica. É uma curva que representa uma relação entre a quantidade de água presente nos poros e a sucção do solo, isto é, a relação entre a sucção matricial e o teor de umidade ou grau de saturação do solo. A curva de retenção é uma

representação da capacidade do solo de armazenar água. 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 mátrica (Ψ_m) ou sucção total (Ψ). Para elevados valores de sucção (acima de 1500 kPa) a sucção mátrica e a sucção total podem ser consideradas equivalentes (FREDLUND e XING, 1994).

A Figura 2.9 apresenta um exemplo com curvas de sucções matriciais onde se verifica que a sucção total do solo é influenciada pela variação da umidade, produzindo-se uma diminuição da sucção total quando a umidade é incrementada.

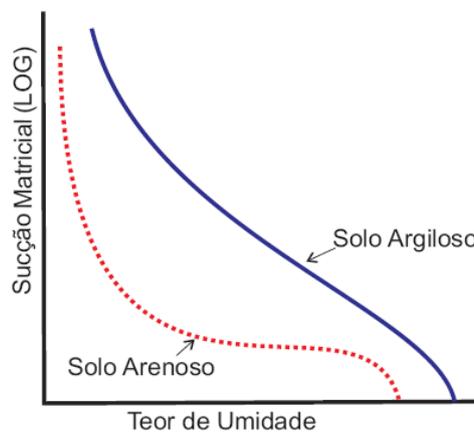


Figura 2.9 – Curvas características de solos argilosos e arenosos (HILLEL, 1971).

O valor da sucção matricial crítica, de um modo geral, é menor para solos granulares do que para solos finos. Além disso, como nos solos granulares existem possibilidades maiores de uniformização granulométrica (mal graduado) e porosimétrica, a sucção matricial crítica mostra-se melhor caracterizada nestes do que nos solos finos. (HILLEL, 1971 e REICHARDT, 1985).

A curva de retenção pode ser obtida no laboratório por meio de dois procedimentos:

- secagem: (ou desidratação), quando a amostra previamente saturada é exposta a potenciais matriciais crescentes, o que implica ir diminuindo a

umidade do solo. A perda de água do solo pode ser obtida mediante a aplicação de pressões na amostra ou deixando evaporar ao tempo; e

- umedecimento: (molhamento ou hidratação), quando uma amostra seca tem o potencial matricial reduzido gradualmente, aumentando-se a umidade.

A Figura 2.10 apresenta duas curvas, uma obtida pelo procedimento de umedecimento e a outra pelo procedimento de secagem.

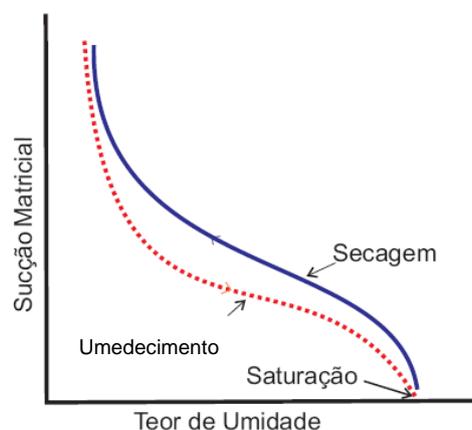


Figura 2.10 – Curvas características por umedecimento e secagem (HILLEL, 1971).

A não coincidência das curvas, conforme mostrado na Figura 2.10, apresenta o fenômeno conhecido como histerese. Este é o fenômeno que diferencia as curvas de retenção obtidas pelo procedimento de “umedecimento” da amostra, daquelas obtidas pelo procedimento de “secagem” da amostra.

Nota-se na Figura 2.10 que o solo apresenta teores de umidade maiores, durante o processo de secagem, para atingir as sucções desejadas. A histerese produzida pelos processos de secagem e umedecimento pode ser atribuída à não uniformidade dos vazios, 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 solo (CALLE, 2000). 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 (ROJAS, 2002).

Apesar de existirem os dois procedimentos de obtenção da curva de retenção, o procedimento mais comum é o de secagem. Neste, quando a amostra de solo fica exposta a sucções matriciais crescentes, verifica-se que se inicia um fluxo de água para fora da amostra a partir de um determinado valor de sucção matricial. Este fato se dá sempre quando o maior poro do solo esvazia-se; neste momento, o valor da sucção matricial é denominado de valor de registro de passagem de ar ou valor de entrada de ar, também denominado de sucção matricial crítica.

2.4.1.1 Fatores que Interferem na Curva de Retenção de Água do Solo

Diversos fatores interferem no formato da curva de retenção de água do solo, podendo ser destacados: distribuição dos poros, a estrutura e a mineralogia das partículas e a distribuição granulométrica (CALLE, 2000).

- **Distribuição dos Poros:**

Em solos arenosos, em função da maioria dos poros serem relativamente grandes, a uma dada sucção matricial muitos poros se esvaziam e poucos ainda podem reter água.

Em solos argilosos, a capacidade de retenção de água é maior, e percebe-se que a cada sucção matricial, apenas uma parcela dos poros drenam, de forma que ainda permanece uma certa quantidade cheia de água. Portanto nos solos argilosos não se verificam variações bruscas na curva de retenção, possuem uma maior capacidade de retenção de água, em relação ao solo arenoso, para um mesmo valor de sucção.

- **Estrutura do solo:**

A estrutura do solo também é um fator que afeta a forma da curva de retenção. Duas curvas de retenção de um mesmo solo estão representadas na Figura 2.11, sendo uma para um solo que foi agregado em suas condições naturais e outra para um solo que foi compactado. O teor de umidade saturado do material compactado é menor que no

material agregado porque a compactação reduz a porosidade do material, portanto, reduz 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.

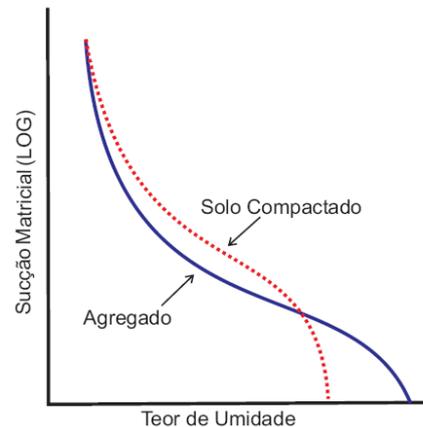


Figura 2.11 – Efeito da estrutura do solo na curva de retenção (HILLEL, 1971).

Pode-se verificar que as argilas em relação às areias com um mesmo valor de sucção, apresentam um maior conteúdo de água volumétrico, ou seja, uma maior capacidade de retenção de água. A Figura 2.12 apresenta curvas de retenção típicas para diferentes tipos de solos, trabalhos realizados por KOOREVAAR ET AL. (1983) in FREDLUND & RAHARDJO (1993), CRONEY & COLEMAN (1961), in FREDLUND & RAHARDJO (1993).

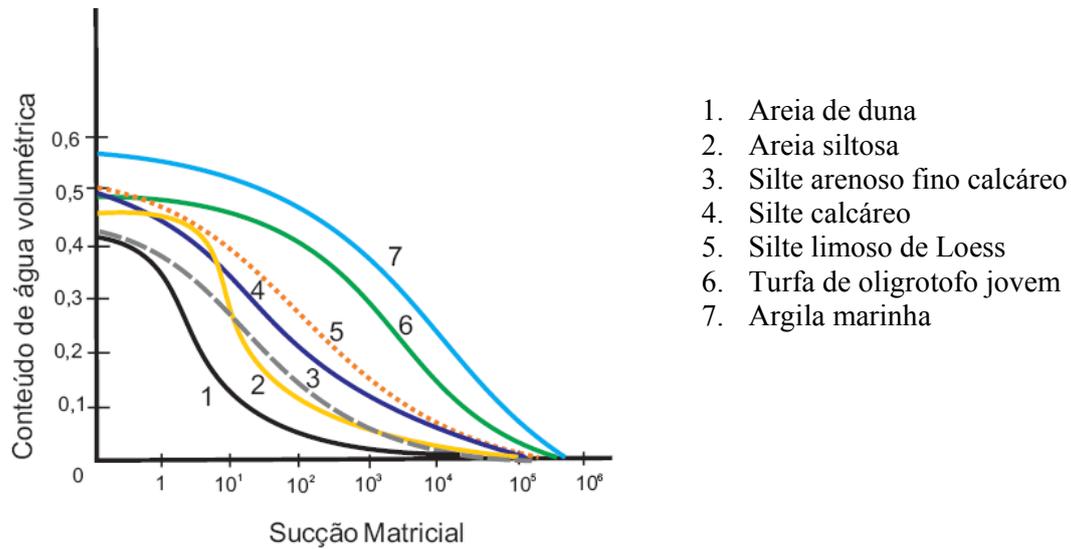


Figura 2.12 – Curvas características obtidas para diferentes tipos de solos (KOOREVVAR ET AL, 1983)

2.4.1.2 Relações Empíricas para Definir a Curva de Retenção de Água no Solo

A curva de retenção pode ser representada mediante relações empíricas, a partir dos dados de sucção matricial e umidade volumétrica obtidos em ensaios de laboratório, como por exemplo o método do papel filtro.

Diversas relações empíricas são comumente usadas para estimar a curva de retenção de água. Algumas delas são apresentadas a seguir:

- BROOKS e COREY (1966) in FREDLUND & RAHARDJO (1993):

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_a}{\psi} \right)^2 + \theta_r \quad (2.5)$$

- VAN GENUTCHEN (1980):

$$w = w_t + \frac{(w_s - w_r)}{(1 + |\alpha \psi|^n)^m} \quad (2.6)$$

$$m = 1 - 1/n$$

- FREDLUND, XING e HUANG (1994):

$$\theta = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a_r}\right)^n\right)} \right]^m \quad (2.7)$$

Onde:

ψ - sucção matricial [L];

ψ_a - sucção matricial que corresponde à entrada de ar (air entry) [L];

ψ_r - sucção matricial que corresponde à umidade volumétrica residual [L];

θ - umidade volumétrica [L^3 / L^3];

θ_s - umidade volumétrica de saturação [L^3 / L^3];

θ_r - umidade volumétrica residual [L^3 / L^3];

α - parâmetro de ajuste da curva [1/L];

λ - parâmetro de ajuste, depende do tipo de solo;

e - 2,71828;

a_r - valor aproximado da sucção matricial de entrada de ar [L];

n, m - parâmetros de ajuste; e

10^6 - valor limite de sucção matricial para qualquer tipo de solo [F/L^2].

2.4.2 Condutividade Hidráulica

As propriedades hidráulicas do solo que determinam o comportamento do fluxo da água em seus vazios são a condutividade hidráulica e a curva de retenção do solo. Conforme já mencionado, a curva de retenção é uma representação da capacidade do solo armazenar água, e a condutividade hidráulica ou permeabilidade do solo é uma propriedade que os solos apresentam de permitirem a passagem (percolação) de um determinado fluido.

HEAD (1982) define a condutividade hidráulica como a taxa na qual um fluido (geralmente água) sob pressão pode 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. É geralmente expresso em metros por segundo (m/s) ou centímetros por segundo (cm/s). A condutividade hidráulica pode ser saturada e não saturada.

2.4.2.1 Condutividade Hidráulica Saturada

A condutividade hidráulica saturada pode ser definida como aquela que ocorre quando o solo atinge seu grau de saturação, de forma que o volume de vazios é totalmente preenchido com água.

Geralmente o fluxo de água nos solos é laminar e, o movimento de água do solo, nesse tipo de fluxo é quantificado pela lei de Darcy, que pode ser expressa como:

$$v = K \Delta h / L \quad (2.8)$$

Onde:

v - velocidade de descarga

K - coeficiente de condutividade hidráulica

Δh - perda de carga

L - comprimento do solo

Para os solos saturados, os permeômetros são utilizados em ensaios de laboratório para determinar a condutividade hidráulica. Esses ensaios são baseados na lei de Darcy e podem ser conduzidos de duas formas, ensaios a carga constante e ensaios a carga variável. Os ensaios a carga constante são caracterizados pela carga hidráulica mantida constante sendo então a vazão correspondente medida. Este ensaio é o mais indicado para materiais arenosos que possuem condutividades hidráulicas elevadas. 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 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.

2.4.2.2 Condutividade Hidráulica Não-Saturada

A condutividade hidráulica não-saturada pode ser definida como aquela que ocorre no solo 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:

$$v = - K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (2.9)$$

Onde:

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

v : velocidade (ou densidade) de descarga (m/s);

θ : umidade volumétrica (m^3/m^3);

z : coordenada de posição (m); 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 & COLLIS GEORGE (1950). O método baseia-se na variação dos tamanhos dos poros do solo, partindo do princípio de que a porosidade é um fator muito importante nos solos não saturados, e a distribuição dos poros influencia nos potenciais capilares (sucção matricial).

A condutividade hidráulica depende de vários fatores, podem ser destacados: o índice de vazios, o grau de saturação, a estrutura, textura e composição mineralógica do solo, o peso específico e viscosidade do líquido percolante (BARROS, 2005).

- Índice de vazios

O modo como 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. Segundo TAYLOR (1948), quanto mais fofo o solo mais permeável ele é.

- Grau de saturação

O grau de saturação de um solo tem uma influência importante sobre sua condutividade hidráulica. A proporção na qual os vazios são preenchidos com água é crucial nas medidas de condutividade hidráulica. Bolhas de ar podem bloquear os canais de percolação entre as partículas, reduzindo significativamente a condutividade hidráulica. Se o grau de saturação é inferior a 85%, o ar é provavelmente contínuo, ao invés de bolhas isoladas, o que invalida a lei de Darcy. Vale lembrar que a lei de Darcy é

válida para escoamento laminar, tal como é possível e deve ser considerado o escoamento na maioria dos solos naturais, e aplica-se a solos saturados. Por isso nos ensaios de permeabilidade são feitos esforços para eliminar o ar de modo que o solo possa ser assumido como saturado.

No que tange a um solo não saturado, a percolação da água não remove todo o ar que se encontra dentro do mesmo, de forma que as bolhas de ar nele contidas pela tensão superficial da água, permanecem e tornam-se um obstáculo para o fluxo da água. Por isso, segundo PINTO (2000) o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor do que ele apresentaria se estivesse saturado.

- 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 ainda 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 floculada, 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 (e).

Outro aspecto importante na estrutura dos solos é que eles não são isotrópicos em relação à condutividade hidráulica. A exemplo têm-se os solos sedimentares, que tendem a apresentar maiores coeficientes de permeabilidade na direção horizontal do que na vertical. Isto se explica, pois as partículas tendem a se posicionar com suas maiores dimensões orientadas na direção horizontal.

- Peso específico e viscosidade do líquido percolante

PINTO (2000), apresenta uma equação para o coeficiente de permeabilidade deduzida por TAYLOR (1948), onde este correlacionou o fluxo do líquido pelo solo à percolação de água por um conjunto de tubos capilares, associando-se à lei de Darcy.

$$k = D_s^2 \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \cdot C \quad (2.10)$$

Onde:

k – condutividade hidráulica de Darcy [L/T]

D_s – diâmetro efetivo das partículas [L]

γ_w - peso específico do fluido [F/L³]

μ - viscosidade do fluido [MT/L²]

e – índice de vazios

C – fator de forma

Por esta equação pode-se observar que o coeficiente de permeabilidade depende do peso específico (γ_w) e da viscosidade do líquido (μ). E estas duas propriedades da água variam com a temperatura. O peso específico tende a variar pouco, porém a viscosidade tende a variar mais, sendo o seu efeito mais sensível.

Um aumento na temperatura causa uma redução na viscosidade da água, ou seja, a água torna-se mais “fluida”, o que afeta o valor da condutividade hidráulica medida.

A fim de se obter uma uniformidade, foi adotado por convenção o coeficiente referido à água na temperatura de 20° C.

- Textura e forma da partícula

A forma e a textura dos grãos influenciam a condutividade hidráulica. Partículas alongadas ou irregulares criam trajetórias de fluxos mais tortuosos do que aqueles ao redor de partículas aproximadamente esféricas. Partículas de superfície de textura áspera apresentam maior resistência por atrito ao fluxo do que partículas de superfície lisa. Desta forma os efeitos das partículas alongadas e irregulares, bem como a textura áspera,

tendem a reduzir a velocidade de fluxo de água através do solo, ou seja, a reduzir sua condutividade hidráulica.

- 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. Por esta razão, o tipo de mineral pode influenciar a condutividade hidráulica de argilas mais do que o tamanho das partículas. 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.

2.4.3 Equação de Richards – cálculo do fluxo em solo não-saturado

O fluxo de água pelos solos é conduzido por um gradiente na energia hidráulica, o qual é quantificado pelo potencial do fluido (energia por unidade de massa de água). O potencial de fluxo é dado por uma forma expandida da Equação de Bernoulli:

$$\phi = gz + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{n} \right)^2 + \frac{-\psi}{\rho_w} + \frac{P_o}{\rho_w} \quad (2.11)$$

Onde:

z – distância vertical

v – velocidade da água

n – porosidade

P_o – sucção osmótica

A velocidade da água (v / n) é pequena, tendendo a um componente desprezível. A sucção osmótica é tipicamente considerada constante por uma camada evapotranspirativa, e conseqüentemente não contribui para o gradiente hidráulico.

Como no caso de solos saturados, a lei de Darcy para solos não saturados indica que o fluxo é conduzido pelo gradiente no potencial hidráulico total. Contudo, os caminhos disponíveis para fluxo de água em solos não saturados diminui conforme o teor de umidade diminui (ou a sucção aumenta). Isso é quantificado pela função de condutividade hidráulica $K(\psi)$, o qual contribui para o decréscimo da condutividade com o aumento da sucção (ou diminuição do teor de umidade. A velocidade de descarga por um solo na direção vertical z pode ser estimado por meio da Equação de Darcy e pela equação 2.11:

$$v = \frac{Q}{A} = -\frac{K(\psi)}{g} \frac{\partial \phi}{\partial z} = -K(\psi) \frac{\partial}{\partial z} \left(1 - \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (2.12)$$

Onde:

Q – taxa de fluxo volumétrico

A- área de solo perpendicular a direção do fluxo

A figura 2.13 mostra um controle do volume de espessura dz para um fluxo em uma dimensão por uma camada de solo com espessura de L usando a base da camada do solo como referencial. O princípio de continuidade nesse controle do volume pode ser expresso por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.13)$$

Substituindo-se a equação 2.12 na equação 2.13, obtém-se a equação que governa o fluxo em uma dimensão por materiais porosos não saturados, é a Equação de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(1 - \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] \quad (2.14)$$

A Equação de Richards é uma equação parabólica não linear, que pode ser resolvida usando elementos finitos ou diferenças finitas. A solução numérica para a equação de Richards pode ser modificada porque a função [$K(\psi)$ e $\theta(\psi)$] são fortemente não linear e pode ter derivadas não definidas ou com valor zero.

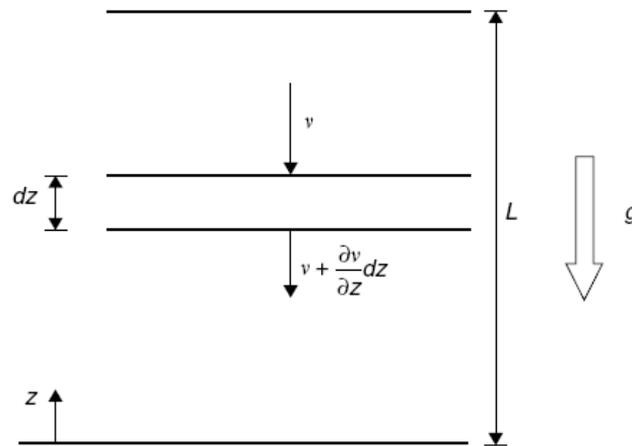


Figura 2.13 – Controle do volume para o fluxo vertical por uma camada evapotranspirativa (ZORNBERG, 2006)

Os conceitos apresentados são fundamentais para o projeto e monitoramento de camadas de cobertura final para aterros de disposição de resíduos sólidos, urbanos, industriais e de mineração.

3. CAMADAS DE COBERTURA

Conceitualmente, 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; a mínima infiltração de água de chuva no aterro encerrado; a drenagem da água; a minimização do fluxo de gases e da erosão. Além disso, deve manter a sua integridade com a ocorrência de recalques e requerer o mínimo de manutenção (TCHOBANOGLIOUS ET AL., 1993).

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 holística 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).

As coberturas evapotranspirativas utilizam a capacidade de retenção de água pelo solo local e a capacidade de evapotranspiração de vegetações para alcançar o desempenho desejado. A camada de solo deve ser capaz de acumular água até que ela possa ser removida, enquanto a cobertura vegetal deve ser capaz de reter parte da chuva precipitada até que ela também seja removida, ambos por evapotranspiração (JOHNSON E HILL, 2004).

Para se projetar coberturas evapotranspirativas é necessário que sejam conhecidas e testadas as características dos componentes locais e o resultado da interação (que ocorre na cobertura) entre eles (JOHNSON E HILL, 2004).

É preciso que se determine: a capacidade de acumulação de água do solo local disponível; a quantidade de água a ser acumulada na cobertura nos períodos em que a taxa de precipitação exceda a de evapotranspiração; e a espessura de camada de solo necessária. Neste sentido, avaliar as condições de umidade e de sucção da camada de cobertura, que em geral estará na condição não saturada, tem relevância.

Na elaboração do projeto do sistema de cobertura final, diversos fatores devem ser avaliados, como (BARROS, 2005):

- Tipo e classe do resíduo a ser coberto – resíduo perigoso, resíduo sólido urbano, resíduo hospitalar etc;
- Balanço hídrico do local – importante para a determinação do tipo de material que será utilizado como cobertura, pois quanto maior o índice pluviométrico do local, menor deverá ser a permeabilidade do solo a ser utilizado como cobertura;
- Clima do local – o clima influencia diretamente a definição do tipo de solo a ser utilizado na cobertura e o dimensionamento da espessura da camada da cobertura;
- Estabilidade dos taludes do sistema de cobertura – a inclinação dos taludes deve proporcionar segurança e estabilidade a todo o sistema de cobertura final, os impactos adversos também podem minimizados ou eliminados por meio de um sistema adequado de drenagem;
- Recuperação da área do aterro – pode ser feita por um sistema de revegetação;
- Disponibilidade de material – o material a ser utilizado como cobertura não deve estar a grandes distâncias fato que inviabiliza o uso pelo custo do transporte.

3.1 Tipos de Cobertura

O tipo de cobertura a ser utilizado varia em função dos objetivos a serem alcançados e da prévia definição do projeto. Existem três condições diferentes de cobertura final.

1ª - cobertura final que tem por objetivo o controle de infiltração de água para o interior do aterro, minimizando a percolação.

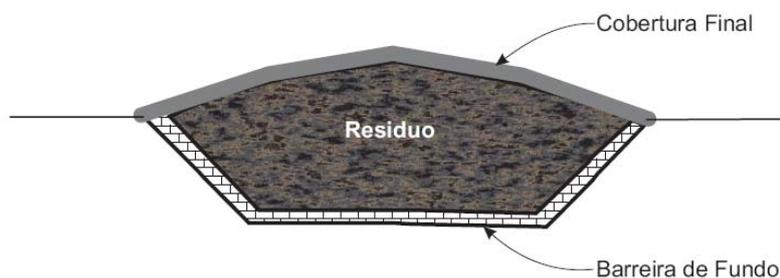


Figura 3.1 – Tipos de cobertura – controle da infiltração (KOERNER e DANIEL, 1997)

2ª - cobertura final que tem por objetivo o controle de liberação de gases de dentro do aterro.



Figura 3.2 – Tipos de cobertura – controle da liberação de gases (KOERNER e DANIEL, 1997)

3ª - cobertura final que tem por objetivo proporcionar a separação física entre o resíduo e o meio ambiente, visando a proteção da saúde pública.

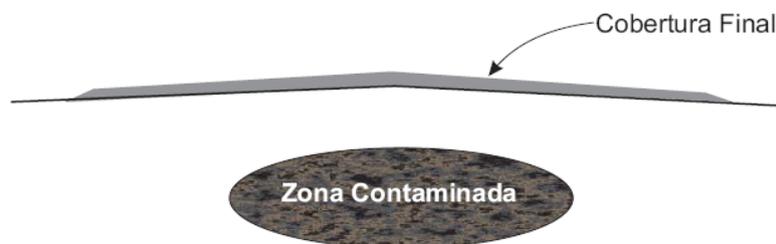


Figura 3.3 – Tipos de cobertura – separação física resíduo / meio ambiente (KOERNER e DANIEL, 1997)

3.2 Componentes do Sistema de Cobertura Final

Um sistema de cobertura final de aterro é composto de seis componentes básicos: camada superficial, camada de proteção, camada de drenagem, barreira hidráulica / gás, camada de coleta de gás e camada de base, conforme apresentado na Figura 3.4.

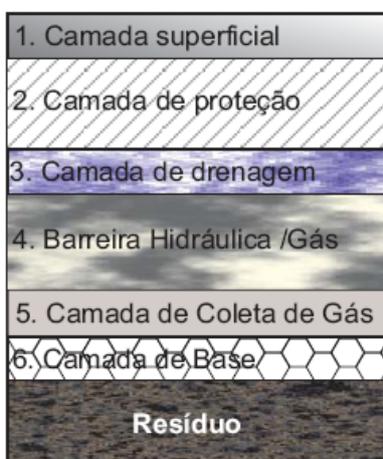


Figura 3.4 – Camadas de um sistema de cobertura final
(KOERNER e DANIEL, 1997)

Porém, alguns componentes não são necessários para determinados sistemas de cobertura final. Por exemplo, em uma região árida a camada de drenagem pode não ser necessária; a camada de coleta de gás pode ser exigida para algumas coberturas, mas não para outras, dependendo se o resíduo ou o material contaminado produzir gases que necessitem de coleta e gerenciamento.

Algumas camadas podem ser também combinadas: a camada de superfície pode ser combinada com a camada de proteção, formando uma única camada; a camada de coleta de gás (composta por solo granular) é frequentemente combinada com a camada de

base. Para a construção dessas camadas, além dos solos naturais, são utilizados também os materiais geossintéticos.

3.3 Descrição das Camadas

3.3.1 Camada superficial

Essa camada possui a função de separar os componentes que se encontram abaixo da mesma do meio ambiente. 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 e como consequência é reduzido o processo de erosão. Geralmente o melhor material a ser utilizado na construção desta camada é uma mistura de argila, silte e areia.

A inclinação da camada de superfície deve ser avaliada, pois garante a estabilidade do conjunto e evita a erosão, geralmente são mais planas no topo e inclinadas nas laterais (podendo apresentar alto poder de erosão). É preciso ainda considerar o desvio de água da superfície ao longo da seção, a Figura 3.5 ilustra estas condições.

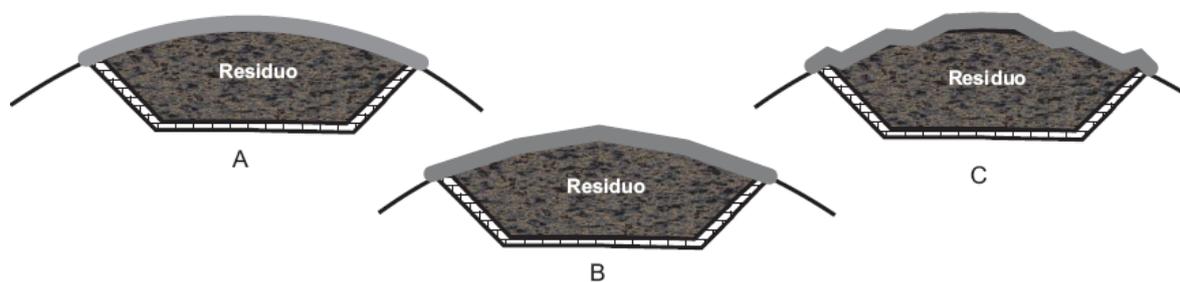


Figura 3.5 – Tipos de configurações de cobertura final (KOERNER e DANIEL, 1997)

As espécies de plantas que serão utilizadas também devem ser avaliadas, pois influenciam na definição da espessura da camada de superfície; caso a escolha seja errônea, as raízes podem atingir profundidades maiores alcançando camadas que estão situadas abaixo, ocasionando trincamentos, e comprometendo o sistema de cobertura final.

3.3.2 Camada de proteção

Esta camada encontra-se diretamente abaixo da camada de superfície, e é utilizada para proteger as camadas do sistema de cobertura que se encontram abaixo, e armazenar a água que percola através da camada de superfície.

Algumas coberturas não possuem a camada de proteção, neste caso a camada de superfície pode ser colocada diretamente sobre a camada de drenagem. Porém, tal prática não é muito apropriada, pois caso haja erosão na camada de superfície, poderá haver conseqüentemente um rompimento desta camada e das demais camadas subjacentes.

Em casos onde o projeto do sistema de cobertura exija que a camada de superfície seja composta de vegetação, a camada de proteção deve ser capaz de sustentar o crescimento das espécies para minimizar a erosão.

Vários requisitos devem ser obedecidos para a especificação da espessura da camada de proteção:

- acomodar e diminuir a intrusão das raízes das plantas, que se espera crescer na camada de superfície para as camadas abaixo;
- prover uma adequada retenção de água com capacidade de atenuar a infiltração da água de chuva para a camada de drenagem e sustentar a vegetação em períodos secos;

- proteger os componentes do sistema de cobertura da invasão de animais ou humana acidentalmente e das intempéries (umidade, ciclos de gelo e degelo) caso necessário; e
- ser constituída com solo suficiente que acomode ao longo do tempo a perda por erosão.

Diversos tipos de solos podem ser utilizados como camada de proteção, primeiramente deve ser feita uma avaliação dos solos já existentes no local onde se pretende construir, pois cada um apresenta características diferentes. Segundo 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, como as argilas, freqüentemente férteis, podendo apresentar dificuldades em períodos úmidos para o estabelecimento inicial da vegetação. Solos arenosos podem ser um problema 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.

3.3.3 Camada de Drenagem

A água que penetra para o interior do sistema de cobertura pode ser removida usando-se uma camada de drenagem. Esta possui três funções principais:

- reduzir a carga hidráulica (do líquido) na camada inferior que funciona como barreira, minimizando assim a quantidade de água que infiltra para as camadas inferiores, do resíduo ou do solo contaminado;
- drenar a água do solo acima, permitindo absorver e reter a água adicional; e
- eliminar a poropressão na interface da barreira subjacente.

A camada de drenagem pode sofrer obstrução ao longo do tempo, porém deve ser projetada, construída e operada para funcionar sem que ocorra obstrução excessiva durante o tempo útil de sua instalação. Isto pode colocar em risco a estabilidade do

talude, ocasionando até a ruptura do mesmo. Pode-se evitar este tipo de problema pela incorporação de filtro de solo ou geotêxtil entre a camada de drenagem e a camada superior.

Em regiões áridas, a necessidade de uma camada de drenagem deve ser baseada na frequência e na intensidade da precipitação e na capacidade de retenção das outras camadas do sistema de cobertura. Nessas regiões a construção da camada de drenagem pode ser eliminada pela construção de uma camada de superfície e de proteção que absorva a maioria, se não toda a precipitação que infiltra nestas camadas.

3.3.4 Camada Barreira Hidráulica ou de Gás

A função desta camada é controlar o movimento de líquidos e / ou gases. Para a construção desta camada geralmente são utilizados os seguintes materiais:

1º) Geomembranas:

Os critérios gerais esperados com a utilização de geomembranas são os seguintes

- Prover uma barreira hidráulica para impedir a entrada de água no resíduo ou diminuir a infiltração na camada de solo abaixo;
- Prover uma barreira de gás, prevenindo a migração descontrolada de gases para a atmosfera;
- Funcionar como barreira hidráulica e / ou de gás por toda vida útil da instalação e após o seu fechamento;
- Funcionar de forma que não haja um contato íntimo com o liner de argila compactada (CCL – Compacted Clay Liner) subjacente ou liner de argila geossintética (GCL – Geosynthetic Clay Liner), isto no caso de estar sendo utilizado como um liner composto;

- Prover resistência por atrito adequada entre as superfícies e os materiais adjacentes de forma que a estabilidade da seção inclinada esteja assegurada;
- Ser capaz de ter uma instalação razoável e competir dentro do contexto de geomembranas com outros materiais de barreira; e
- Ser de custo razoável e ter disponibilidade para competir com outras geomembranas e outros materiais de barreira.

2º) Liner (revestimento) de argila geossintética (GCLs):

Este material consiste de um produto fabricado com uma camada de bentonita, componente de baixa condutividade hidráulica, colocada entre geotêxteis ou adesivos unidos a uma geomembrana.

3º) Liner (revestimento) de argila compactada (CCLs):

Este liner é constituído primariamente de solos naturais que são ricos em argila, embora possa conter materiais processados como a bentonita.

3.3.5 Camada de Coleta de Gás

A camada de coleta de gás é localizada entre a camada de base e a camada de barreira hidráulica /gás. Na construção desta camada devem ser observados:

- Quando for utilizado solo natural, a espessura mínima da camada deve ser de 300mm e deverá existir um ponto de abertura para o exterior para a disposição e tratamento do gás;
- Os tubos, de elevação vertical, devem ser localizados em pontos altos da seção da camada. Eles deverão ser projetados de forma a impedir a infiltração de água por meio deles ou em seus entornos;

- Os materiais utilizados nesta camada deverão ser granulares e altamente permeáveis (como cascalhos e pedregulhos);
- Geossintéticos podem ser usados, desde que tenham características de transmissividade equivalentes.

Os materiais usados na construção da camada coletora de gás deverão ser similares aos materiais granulares usados na camada de drenagem ou similares aos materiais geossintéticos de drenagem. Estes materiais deverão ser dispostos de tal forma que facilitem a construção e compactação.

3.3.6 Camada de Base / Fundação

A camada de fundação é construída diretamente sobre o resíduo e serve de base para as outras camadas que compõem o sistema de cobertura final. Dependendo do tipo de resíduo que esteja sendo coberto, a camada de fundação pode ser a última camada de solo colocado diariamente, uma cobertura de solo temporária ou uma camada de solo colocada previamente à construção do sistema de cobertura.

3.3.7 Novas Tendências – Camada Evapotranspirativa

O estudo para camadas evapotranspirativas é recente, o primeiro sistema de cobertura evapotranspirativa aprovado data de 1997, nos Estados Unidos para disposição final de resíduo perigoso. A camada foi construída em OII Superfund, Califórnia. Um total de 53 coberturas evapotranspirativas foram identificadas em 48 diferentes locais dos Estados Unidos. Dentre esse total, em 19 locais ainda estão em construção ou em fase de conclusão, enquanto o restante ainda está em fase de teste (ZORNBERG, 2003). As camadas evapotranspirativas são de fácil construção e requerem baixa manutenção.

Também podem ser construídas com diversos tipos de solos, reduzindo o custo. Experiências estão sendo realizadas para verificar se essas são adequadas, assim como as variáveis que conduzem seu desempenho.

As camadas evapotranspirativas podem ser nomeadas de outra forma, segundo ZoORNBERG (2006): camadas monolíticas e barreiras capilares.

- Camadas monolíticas:

Este tipo de camada é caracterizado quando um solo é colocado sobre o resíduo, e atua como um substrato para a vegetação e como barreira hidráulica. Ocorre um umedecimento durante a infiltração e um secamento durante a evapotranspiração. As flutuações maiores na umidade ocorrerão no topo da camada.

As camadas monolíticas requerem seleção de espessura de camada e armazenamento de umidade necessária para manter a percolação abaixo de um mínimo valor (de projeto) dado às condições necessárias ao local.

A capacidade de reter umidade de uma camada pode ser calculada como uma integral do perfil de teor de umidade volumétrico com a profundidade. A condição de contorno superior da umidade armazenada depende da forma da curva característica.

Um parâmetro usado para quantificar o armazenamento de umidade é a capacidade de campo, que é definido como o valor da umidade linear (limite) acima do qual o solo não retém água pela capilaridade sobre efeito da gravidade. Quando a água é adicionada ao solo que está na sua capacidade de campo, a drenagem ocorre e, a capacidade de campo é obtida por ensaios de infiltração. A capacidade de armazenamento de uma camada monolítica pode ser preliminarmente estimada multiplicando o teor de umidade volumétrico da capacidade de campo (obtida usando Curva Característica) pela espessura da cobertura.

- Barreiras Capilares:

São coberturas evapotranspirativas que consistem no seguinte sistema: solo fino (silte ou argila) sobre solo granular (areia, pedregulho ou geotêxtil não tecido).

As barreiras capilares usam o contraste dos valores de permeabilidade (entre solos finos e granulados) e melhora a habilidade do solo fino reter umidade.

A figura 3.6 mostra quando um sistema argila-areia está numa sucção inicial alta (1000 kPa) a argila tem uma saturação de 0,2 enquanto a camada inferior da areia está na umidade residual. O conceito de quebra de capilaridade recai na continuidade da sucção, mesmo na interface dos dois materiais.

Já a figura 3.7 indica que em sucção alta, a argila tem $k = 1 \times 10^{-13}$ m/s, enquanto a areia tem sempre forte tendência ao fluxo. 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 está longe abaixo do k do material fino. (3 kPa na Figura 3.7).

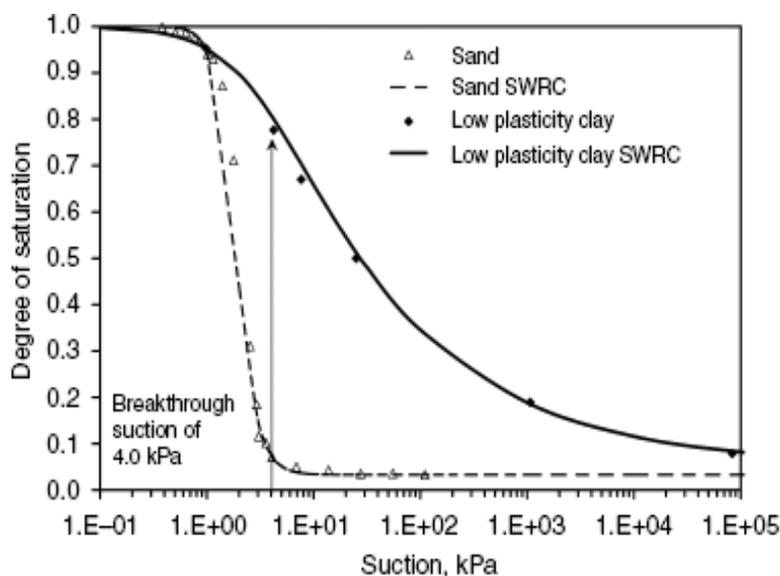


Figura 3.6 – efeito “quebra” de capilaridade (ZORNBERG, 2007)

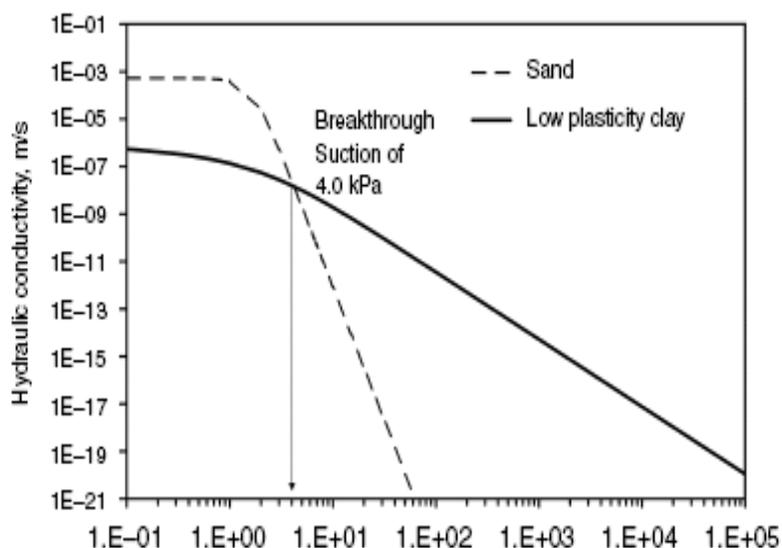


Figura 3.7 – função k do efeito quebra de capilaridade (ZORNBERG, 2007)

Esta sucção é o valor de “quebra” de sucção. Este valor de 3 KPa é significativamente abaixo da sucção correspondente a capacidade de campo (33 KPa para argila, ZORNBERG, 2007), o que indica que a saturação na argila é relativamente alta (95%) quando a “quebra” ocorre. Para valores de sucção menores do que ao correspondente a capacidade de campo, a água irá drenar para baixo por gravidade quando a sucção de “quebra” é atingida, o fluxo é observado na camada granular numa velocidade próxima a correspondente a k_{sat} da barreira.

A figura 3.8 mostra perfis de teores de umidade ilustrando flutuações sazonais esperadas numa barreira capilar. Diferente da camada monolítica, a frente da umidade pode atingir a base da camada sem resultar numa percolação, posto que a umidade na interface não excedeu o valor de quebra.

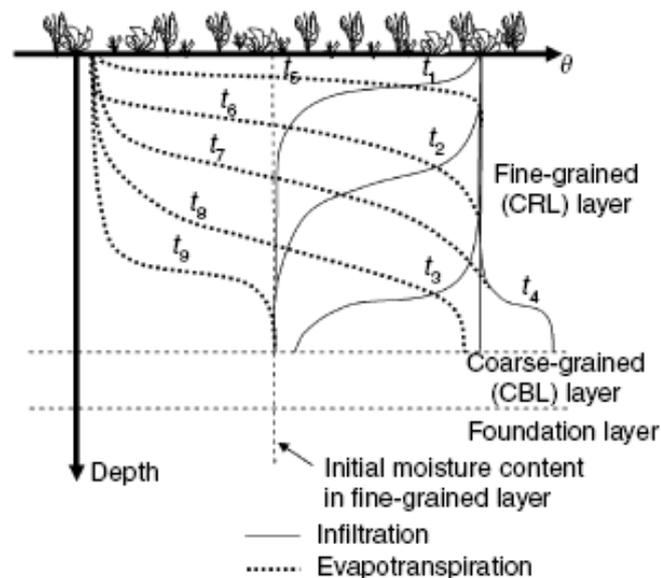


Figura 3.8- flutuação do teor de umidade (ZORNBERG, 2007)

Um importante benefício da capilaridade é que o armazenamento da umidade na camada fina pode exceder o estágio de drenagem livre (capacidade de campo). Conseqüentemente, mais água pode ser armazenada numa camada de capilaridade break do que numa camada monolítica de espessura equivalente.

Alternativamente, uma camada mais fina de granulometria fina pode ser usada como camada de capilaridade de quebra para obter a mesma capacidade de armazenamento. A magnitude de mudanças em longo termo dessas condições são investigadas especialmente em camadas inclinadas.

- Pontos importantes para projetar camadas evapotranspirativas

1- Estratégia de projetos

Embora o conceito de camada evapotranspirativa seja simples, seu projeto não é trivial e envolve análises numéricas e componentes demonstrativos de campo.

O projeto de uma camada evapotranspirativa envolve a identificação do critério de “desempenho” que é usado para avaliar a utilidade de alternativas de projetos diferentes.

Inclui:

- a) Identificação de área de empréstimo de solo
- b) Caracterização das propriedades hidráulicas de solo pré-selecionadas sob diferentes condições
- c) determinação da geometria da cobertura
- d) identificação das condições meteorológicas críticas
- e) identificação de plantas disponíveis e propriedade das coberturas vegetativas

Projetos típicos envolvem o uso de modelos numéricos para prever o comportamento da cobertura e demonstrações de campo que permitem avaliar alternativas de projetos diferentes.

As coberturas com efeito de barreira capilar têm sido usadas como cobertura alternativa para reduzir a infiltração de água nos aterros ou para prevenir a migração de gás. 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. CABRAL (2007), propõe uma barreira capilar dupla, já existente no Aterro Municipal de Quebec (Saint-Tite-des-Capes), Canadá. Essa barreira dupla capilar é composta de uma barreira capilar construída de material grosso (pedregulho) e de uma barreira hidráulica cuja função é controlar a infiltração na barreira capilar. A barreira hidráulica foi construída usando deinking-by-products (DBP), material que é produzido durante a reciclagem do papel.

Os principais objetivos são: 1- testar um sistema de cobertura alternativo para controlar a infiltração, e 2- testar a efetividade do deinking-by-products não somente como barreira capilar para a infiltração, mas também como um material que devido a sua capacidade de reter água pode reduzir a quantidade de emissões de gases.

Análises de dados de campo mostram que a barreira hidráulica está funcionando como desejado: 1- a distância do topo da barreira logo que a água começa a infiltrar na massa de resíduos cobre aproximadamente a extensão total da barreira, e 2- a infiltração total é inferior a 10^{-9} m/s. A taxa de infiltração na massa de resíduo, $4,7 \times 10^{-10}$ m/s, está bem abaixo do k_{sat} usual determinado para barreiras hidráulicas. A barreira de DBP também teve bom desempenho, contribuindo para eficiência como um todo da barreira capilar dupla. Nenhuma infiltração foi detectada na camada de pedregulho acima de aproximadamente 24 m, abaixo da inclinação de 24 m a infiltração dentro da camada de pedregulho teve início e eventualmente atingiu a massa de resíduo.

3.4 Modelo SoilCover

Modelos computacionais são utilizados para dimensionamento da camada de cobertura, como Vadose/W (GEOSLOPE, 2004), Soil Cover (GEO-ANALYSIS, 2000) ou Unsat-H (FAYER AND JONES, 1990), (in ZORNBERG, 2006). Estes modelos de elementos finitos unidimensionais prevêm a quantidade de água em um perfil de solo em função de suas características e das condições climáticas existentes. São necessários para estes modelos dados de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar máximas e mínimas, durante um ano a serem obtidos em estação climatológica próxima ao Aterro.

Especificamente o SoilCover é um modelo computacional composto por um conjunto de elementos finitos utilizado na simulação do movimento de água de um sistema cobertura / rejeito, o qual está sujeito à infiltração e evapotranspiração na superfície do solo. Prever o fluxo de água entre a superfície do solo e a atmosfera é uma questão crítica nos projetos de coberturas de aterros de resíduos. O fluxo de umidade entre o solo e a atmosfera é um processo complexo no qual três fatores dominam (WILSON, 1990). Esses fatores não funcionam como variáveis independentes, mas sim como um sistema acoplado, e é baseado nesses fatores que o SoilCover prediz o fluxo evaporativo de uma superfície saturada ou não-saturada do solo. O primeiro fator está relacionado com as condições atmosféricas: precipitação total, radiação, umidade relativa

do ar máxima e mínima, velocidade do vento, e temperatura do ar. O segundo fator diz respeito às propriedades do solo: condutividade hidráulica, curva característica do solo, porosidade, densidade real dos grãos, condutividade térmica e calor específico. E, o terceiro envolve a vegetação: profundidade das raízes, índice de área foliar, ponto de murcha, taxas de runoff e retenção superficial. (GEO-ANALYSIS, 2000).

A precipitação é especificada pelo usuário, enquanto a evaporação também pode ser especificada ou calculada pelo SoilCover. Perfis de volume de água, sucção, temperatura, e outros podem ser observados para avaliar o desempenho do sistema de cobertura. Um modelo computacional que avalia fluxo evaporativo em solos engloba um sistema de equações que descrevem fluxo de vapor d'água, água líquida e calor. O SoilCover calcula a evaporação do solo resolvendo as equações abaixo simultaneamente.

WILSON (1990) desenvolveu um método para calcular a evaporação em solos não saturados baseado na equação de Penman. A equação 3.1 apresenta a equação de Penman modificada (WILSON, 1990):

$$E = \left(\frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma \ddot{A}} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

E: fluxo de evaporação real

\ddot{A} : declividade da curva de pressão de vapor d'água versus temperatura média do ar (mmHg/°C)

Rn: energia líquida de radiação disponível na superfície do solo (mm/dia de água)

Ea: $f(u) = Pa (B-A)$

$f(u) = 0,35 (1 + 0,15 Wa)$

Wa: velocidade do vento (Km/h)

Pa: pressão de vapor do ar acima da superfície de evaporação (mm Hg)

B: inverso da umidade relativa do ar ($=1/h_a$)

A: inverso da umidade relativa da superfície do solo ($=1/h_s$)

Quando a umidade relativa na superfície de um solo saturado (h_s) for igual a 100%, “A” será igual a 1. Portanto, a formulação de Penman modificada por WILSON (1990) reduz a equação de Penman convencional quando a superfície do solo se encontra saturada.

A equação relativa ao processo de transferência de massa dentro do solo, desenvolvida por WILSON (1990) está representada na equação 3.2:

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w \frac{\partial \left[K_w \left(\frac{\partial h_w}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} + C_v \frac{\partial \left[D_v \left(\frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} \quad (3.2)$$

Onde:

h_w : carga hidráulica total (m)

t : tempo (s)

C_w : coeficiente de adensamento com relação à fase de água líquida $C_w = \frac{1}{\rho_w g m_2^w}$

ρ_w : peso específico da água (Kg/m^3)

g : aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$)

m_2^w : inclinação da curva de retenção de umidade ($1/\text{KPa}$)

y : posição (m)

K_w : condutividade hidráulica como função da sucção mátrica (m/s)

C_v : módulo de variação de volume com relação à fase vapor $C_v = \left[\frac{1}{(\rho_w)^2 g m_2^w} \right] \left[\frac{P + P_v}{P} \right]$

P : pressão total de gás na fase ar (KPa)

P_v : pressão de vapor de água em meio poroso não saturado (KPa)

D_v : coeficiente de difusão do vapor d'água através do solo ($\text{kg.m}/\text{KN.s}$)

O SoilCover calcula a pressão de vapor no solo usando a relação de EDLEFSEN e ANDERSON (1943) onde a pressão de vapor (P_v), equação 3.3 é calculada baseada na relação da sucção total na fase líquida.

$$P_v = P_{sv} h_r \quad (3.3)$$

Onde:

P_v : pressão de vapor no solo

P_{sv} : pressão de saturação no solo a uma temperatura T

h_r : umidade relativa do solo como uma função da sucção total e da

temperatura, $h_s = e^{\frac{\psi g w_v}{RT}}$

O cálculo da pressão de vapor (P_v) da equação (3.3) depende da pressão de saturação de vapor e da temperatura do solo. Dessa forma, o perfil da temperatura no solo pode ser avaliado simultaneamente com as equações (3.2) e (3.3). WILSON (1990) usa a equação (3.4) para descrever o fluxo de calor.

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial \left[\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} - L_v \left(\frac{P + P_v}{P} \right) \frac{\partial \left[D_v \left(\frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} \quad (3.4)$$

Onde:

T : temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

t : tempo (s)

C_h : calor específico volumétrico ($\text{J}/\text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) $\rightarrow C_h = C_v \rho_s$

C_v : calor específico do solo ($\text{J}/\text{Kg } ^{\circ}\text{C}$)

ρ_s : densidade do solo (Kg/m^3)

λ : condutividade térmica ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)

L_v : calor latente de vaporização (J/Kg)

P : pressão total de gás na fase ar (KPa)

P_v : pressão de vapor de água em meio poroso não saturado (KPa)

D_v : coeficiente de difusão do vapor d'água através do solo (kg.m/KN.s)

São dados de entrada do SoilCover:

Parâmetros do Solo:

- Porosidade do solo;
- Curva característica e dados de condutividade hidráulica;
- Condutividade térmica e calor específico x dados de volume de água;
- Volume de água descongelada x dados de temperatura para congelar (para análise de condições de congelamento), é computado internamente baseado na curva característica de água do solo e equilíbrio físico termodinâmico.

Parâmetros Climatológicos

- radiação líquida
- precipitação
- umidade relativa máxima e mínima
- temperatura diária do ar máxima e mínima
- velocidade do vento
- latitude

Parâmetros da Vegetação:

- umidade limite / ponto de murcha
- índice de área foliar
- profundidade do centróide da raiz

Condições Limite:

- matriz de sucção ou volume de água e precipitação

- temperatura

Condições Iniciais:

- sucção mátrica ou perfil do volume de água
- perfil de temperatura

Modelando Detalhes:

- geometria da malha – computada automaticamente com dados específicos da camada de solo do usuário.
- parâmetros de convergência
- parâmetros de tempo

O SoilCover cria um arquivo de dados de saída que contém resultados com as seguintes informações:

- evapotranspiração atual
- evapotranspiração potencial
- superfície, fluxo de base
- fluxos de raiz
- runoff total
- perfis de volume de água gravimétrico e volumétrico
- índice nodal do gelo
- perfis de saturação
- perfil de sucção mátrica
- perfis de temperatura
- perfis de condutividade hidráulica
- concentração de oxigênio
- perfis de pressão de vapor

3.4.1 Exemplo de Utilização do Modelo Soil Cover

O modelo computacional SoilCover já foi utilizado para a avaliação (VIDAL E BORMA., 2006) do perfil de saturação de cobertura de aterro de resíduos sólidos localizado na cidade de Palmas – TO. A cobertura do aterro é composta por 30% de argila, 58% de silte e 12% de areia. Os limite de liquidez e de plasticidade obtidos foram de 32% e 17,2%, respectivamente. A densidade analisada é de $G=2,693$, com permeabilidade de $K=1,85 \times 10^{-4}$ cm/s e porosidade de 0,374.

De posse da curva característica (figura 3.9), determinada em amostra retirada de camada de cobertura, e dos dados de entrada necessários para a simulação foram obtidos perfis de saturação referentes a três anos (figuras 3.10, 3.11, 3.12), a cobertura em estudo apresentava espessura de 45 cm, cobrindo uma espessura de aproximadamente 4 m de resíduo. Diante dos resultados obtidos, verificou-se que a saturação na cobertura predominou abaixo de 85%, com um mínimo de 66%. Quanto ao resíduo, a saturação variou de 64 a 80%, demonstrando que o material utilizado na cobertura do aterro não é adequado para a minimização de fluxo e de gás (VIDAL E BORMA, 2006).

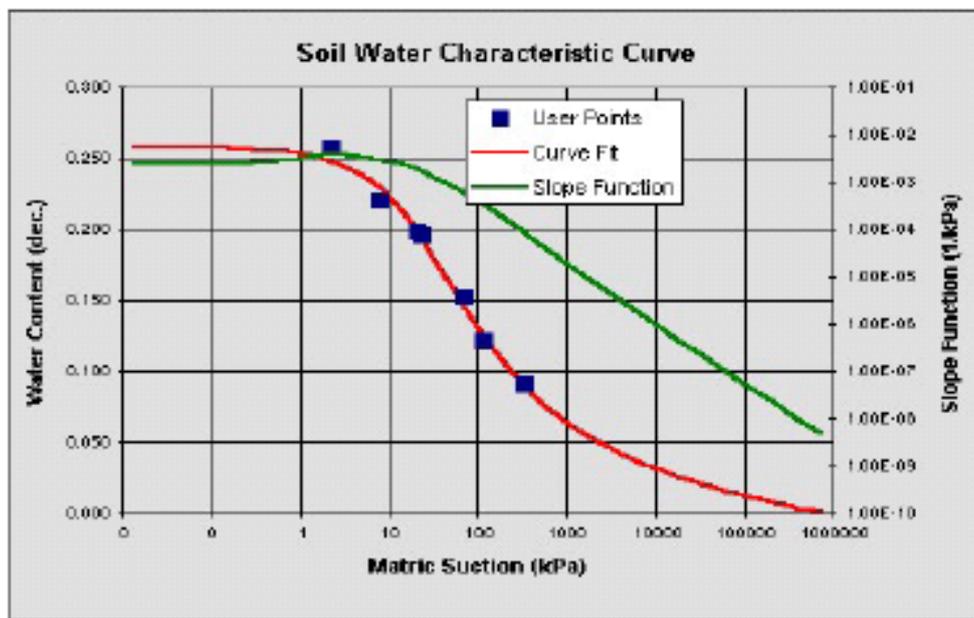


Figura 3.9 – Curva sucção x umidade – Aterro de Palmas (VIDAL E BORMA, 2006)

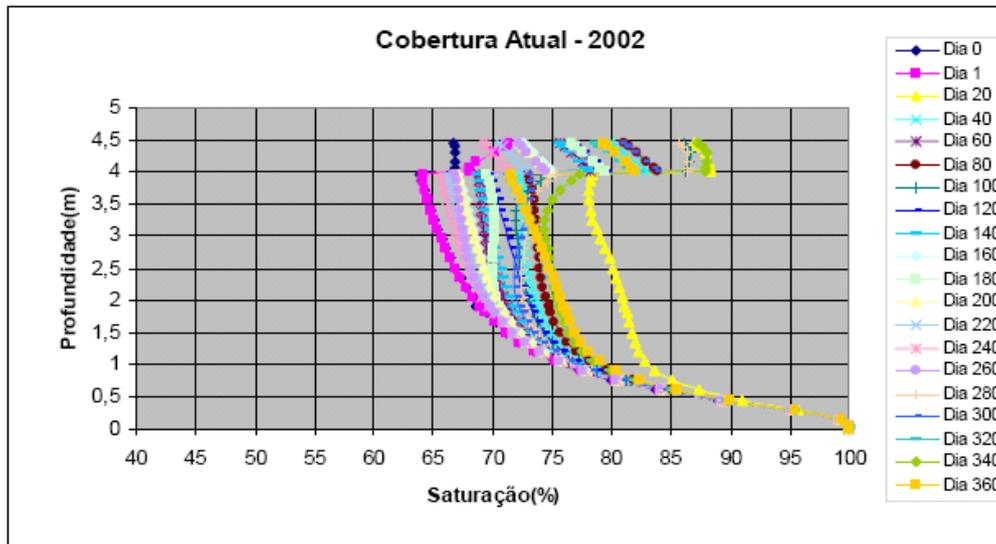


Figura 3.10 - Perfil de saturação ano de 2002 (VIDAL E BORMA, 2006)

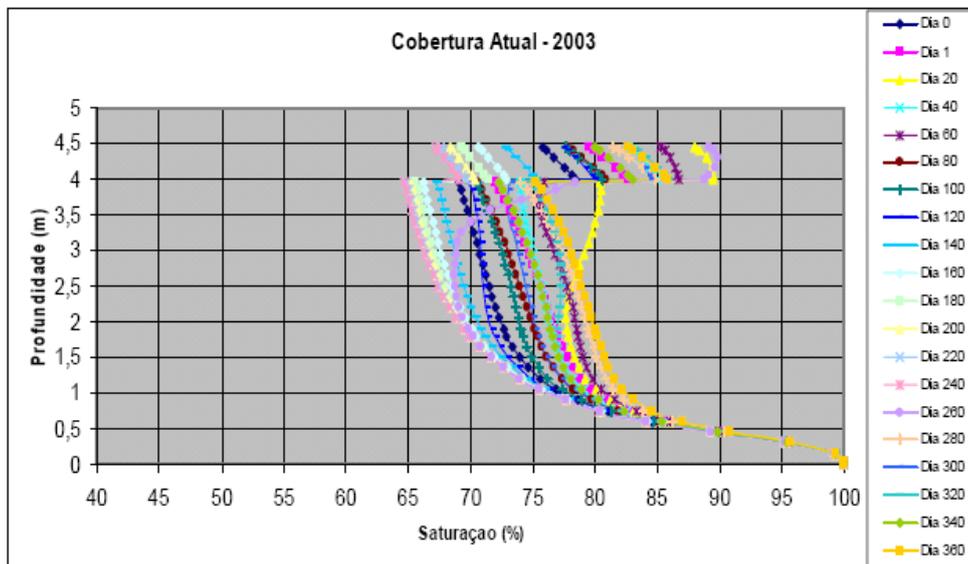


Figura 3.11 - Perfil de saturação ano de 2003 (VIDAL E BORMA, 2006)

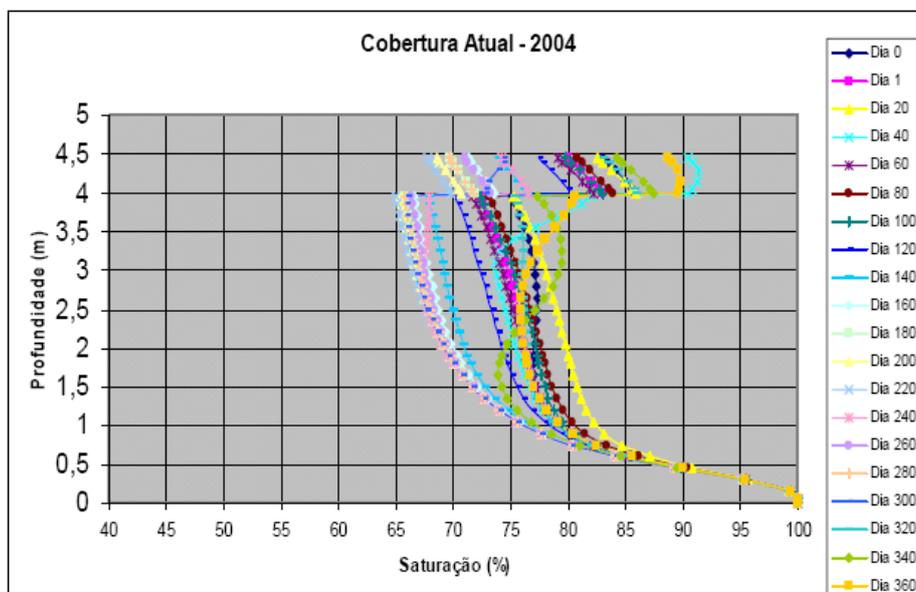


Figura 3.12 - Perfil de saturação ano de 2004 (VIDAL E BORMA, 2006)

O mesmo modelo computacional também foi utilizado para avaliação do solo de cobertura seca para disposição de resíduos de mineração carbonífera no Estado de Santa Catarina para o período de um ano (MENDONÇA ET AL, 2003). O material potencialmente recomendado para cobertura foi coletado no município de Forquilha e, o resíduo foi coletado a 500 metros do local de coleta do solo. Os resultados da caracterização geotécnica do solo indicaram um índice de plasticidade de 11,7%, densidade das partículas 2,657, com permeabilidade de $K=4,4 \times 10^{-7}$ cm/s. A umidade ótima foi de 13% e a massa específica aparente seca máxima encontrada foi de 1,85 g/cm³.

A simulação computacional foi realizada e consistiu em analisar o comportamento de armazenamento de água do resíduo, sua respectiva cobertura com solo compactado na umidade ótima e a camada acima (utilizando o mesmo solo) foi colocada no estado fofo, sempre com espessura de 30 cm (zona de raízes, caso haja vegetação). Foram analisadas 4 alternativas, utilizando-se 2 materiais (resíduo e solo disponível no local): A - resíduo (10m de espessura) disposto sem cobertura; B - resíduo (10m de espessura) tendo 30 cm de solo compactado sobrejacente, mais 30 cm do mesmo solo sem compactar; C - resíduo (10m de espessura) tendo 60 cm de solo compactado sobrejacente, mais 30 cm do mesmo solo sem compactar; D - resíduo (10 m de espessura) tendo 90 cm de solo compactado sobrejacente, mais 30 cm do mesmo solo sem compactar (MENDONÇA ET AL, 2003).

A curva característica obtida está ilustrada na figura 3.13 e o resultado para as quatro simulações está apresentado na Tabela 3.1. Verificou-se que as simulações C e D possuem maiores médias de grau de saturação e umidade gravimétrica, e menores valores de sucção. A alternativa C apresentou na camada compactada um grau de saturação médio de 84% ao longo do ano. Embora o grau de saturação mínimo dessa alternativa seja de 71%, observou-se na simulação que na maior parte do ano a camada se mantém com o grau de saturação entre 80 e 90%. A partir das alternativas estudadas, verificou-se que para o local de estudo, e em função das condições climatológicas existentes, a alternativa C seria a mais indicada, porém não atingiu uma saturação mínima de 80% durante todo o ano. Apesar da camada de cobertura compactada se manter com elevado grau de saturação o percentual de água que atinge a camada compactada fica

provavelmente armazenado devido à sua baixa condutividade hidráulica (10^{-8} cm/s) em relação ao resíduo (10^{-7} cm/s) (MENDONÇA ET AL, 2003).

Cenário	Grau de Saturação (%)			Sucção (KPa)			Umidade Gravimétrica (%)		
	Mín	Máx	Média	Mín	Máx	Média	Mín	Máx	Média
A	58,66	92,93	77,9±9,8	17,95	237	79,2± 6,2	8,97	14,21	11,9±1,5
B	69,48	92,06	70,7±7,6	5,39	22,89	14,0± 5,1	9,81	14,07	12,2±1,1
C	71,49	92,12	83,7±5,3	4,98	17,83	11,0± 3,2	10,88	14,06	13,1±0,9
D	74,35	91,6	84,7±4,2	5,34	16,16	10,5± 2,6	11,51	14,30	13,2±0,7

Tabela 3.1 – Valores obtidos no ano a partir da média aritmética diária na camada compactada (MENDONÇA ET AL, 2003)

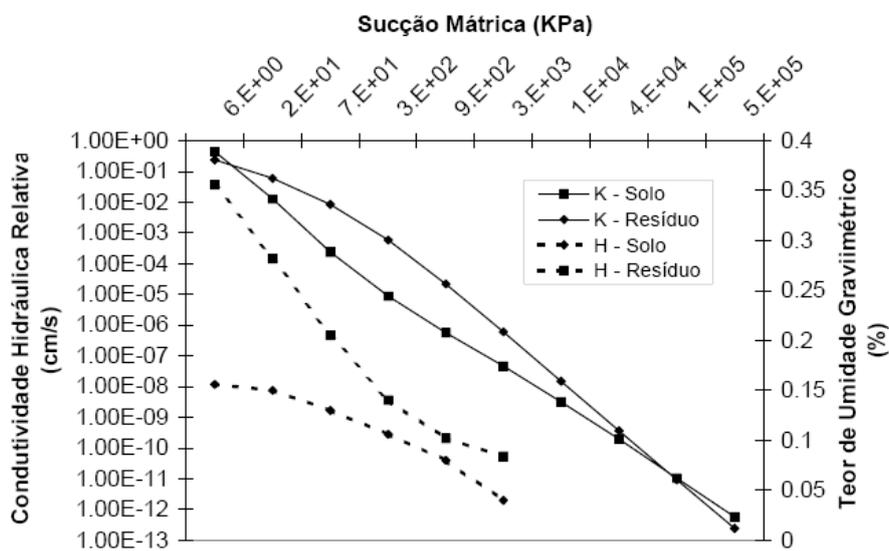


Figura 3.13 – Curva característica dos materiais e condutividade hidráulica, ambas fornecidas ao programa SoilCover (MENDONÇA ET AL., 2003)

4. ESTUDO PRELIMINAR DE DOIS LOCAIS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS

O objetivo foi avaliar os solos disponíveis em dois locais de disposição de resíduos: Aterro de Morro do Céu e Aterro Sanitário de Rio das Ostras para serem utilizados como camada de cobertura.

Desde 1983, o destino final do lixo coletado em Niterói é o Aterro do Morro do Céu, no bairro do Caramujo. Lá, os resíduos são espalhados, compactados e, finalmente, recobertos com uma camada de saibro. Por dia, chegam ao Aterro em média 470 toneladas de detritos. Só em 1995, foram depositados no Morro do Céu 209.887 toneladas (99.183 de lixo domiciliar; 45.435 de lixo de varrição de praia e 65.269 de outros detritos). Com 200 mil m², o Aterro está a 7 km do Centro da cidade, com distância média de 12 km dos Distritos de Limpeza, ficando a menos de 20 km da área mais remota da cidade. É considerado, portanto, economicamente adequado à finalidade à qual se destina. As fortes declividades do terreno original auxiliam no confinamento dos resíduos. A Estação Meteorológica de onde os dados foram coletados dista aproximadamente 3,2 km do aterro, estando situada no campus da Universidade Federal Fluminense, na Praia Vermelha (<http://www.clin.rj.gov.br/site/morro.htm>).

Rio das Ostras possui uma área de 230,62 km² e população atual estimada de 50.000 habitantes, onde está localizado o Aterro Sanitário de Rio das Ostras (www.riodasostras.rj.gov.br). Situado a 170 km ao norte da cidade do Rio de Janeiro, limita-se com os municípios de Casimiro de Abreu, Macaé e com o Oceano Atlântico. Rio das Ostras não possui uma estação meteorológica. A Estação Experimental da Pesagro, em Macaé, é a mais próxima, distando menos de 30km do centro do Município. Antes da implantação do Aterro Sanitário de Rio das Ostras, os resíduos provenientes da coleta de lixo eram disponibilizados no Lixão Municipal de Rio das Ostras, popularmente conhecido como Lixão do Âncora. (PIRES, 2007)

Para ambas as amostras foram realizadas a caracterização, a determinação da curva de compactação e das características hidrológicas: permeabilidade saturada e curva característica. Foram também levantados dados meteorológicos dos dois locais.

4.1 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos dos dois locais foram levantados nas Estações meteorológicas citadas anteriormente. As amostras foram coletadas nas áreas dos dois aterros.

A chuva que incide sobre o solo ou sobre um sistema de cobertura pode ser interceptada pela vegetação, escoar pela superfície, evaporar ou ser removida pelas plantas devido à transpiração. Quando o solo está próximo a saturação, quem comanda a evaporação é a demanda atmosférica que depende de vários fatores como: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (WELS ET AL, 2001). Quando o solo começa a secar, a taxa de evaporação começa a decrescer e quem comanda a saída de água do sistema são as características do solo, principalmente a curva característica.

Assim, somente uma parcela da água pluvial infiltra no solo, migra pela zona ativa e caminha para o resíduo; esta parcela é chamada de produto da percolação. Na figura 4.13 estão ilustrados os componentes do balanço hídrico. (MENDONÇA ET AL, 2003).

A condição climática é um parâmetro chave que influencia o desempenho da cobertura do aterro (WILSON ET AL, 1994). Dessa forma, é necessária uma quantificação precisa do balanço de água superficial (fluxo e armazenamento de umidade). A partir daí justifica-se o fato de modelos atmosféricos que englobam a transferência de calor e água (vapor e líquido) serem aplicados para a modelagem de sistemas de cobertura (SWANSON, 1995).



Figura 4.1 – Componentes do Balanço Hídrico (O’KANE, 2002)

Para a coleta dos dados referentes a Niterói foi feita uma visita à Estação Meteorológica da Universidade Federal do Estado. Esta estação meteorológica é a única e a mais próxima do Aterro Morro do Céu, é uma estação de funcionamento automático, e a observação é horária, a transmissão dos dados se dá por meio de um satélite. É composta por um anemômetro, uma célula fotovoltaica, um pára-raio, um pluviômetro, um radiômetro, um sensor de temperatura e pressão, e um data-log, onde está localizada a CPU, onde os dados captados são programados, armazenados e enviados para Brasília por satélite. O piso onde a estação se encontra é gramado para evitar a entrada de animais e pessoas, de modo a não alterar também o albedo (poder refletor de uma superfície).

As figuras 4.2, 4.3 e 4.4 resumem os dados de umidade, temperatura e precipitação, respectivamente, para o período de Abril/2006 a Abril/2007 para Niterói.

A região de Niterói apresenta as maiores médias mensais pluviométricas nos meses de novembro, dezembro e janeiro. As temperaturas mais elevadas são registradas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro com uma média em torno de 26,4 °C, e a mais baixa no mês de novembro 15,9°C, apresentando uma temperatura média anual de 18,9°C. A

umidade mínima e máxima do ar registrada foi de 21% (mês de agosto) e 92% (mês de maio), respectivamente.

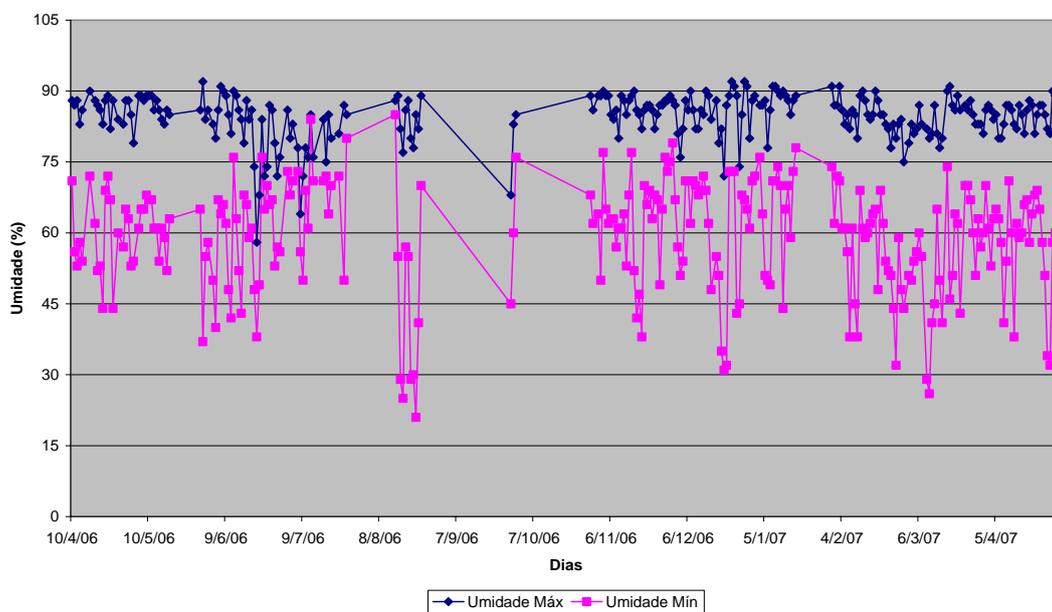


Figura 4.2 – Gráfico Umidade (%) x Dia (Niterói)

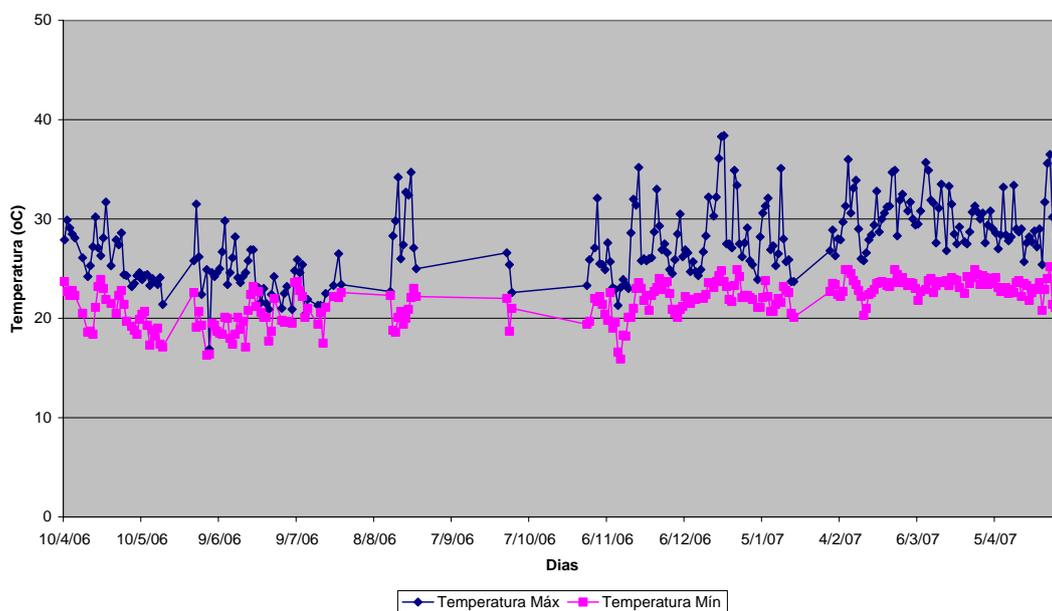


Figura 4.3 – Gráfico Temperatura (°C) x Dia (Niterói)

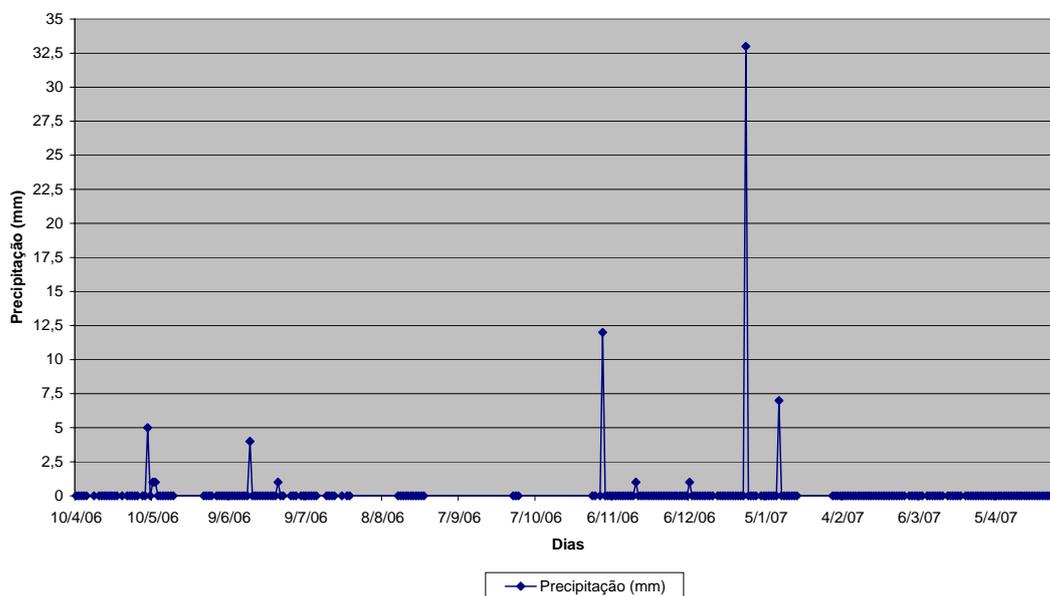


Figura 4.4 – Gráfico Precipitação (mm/dia) x Dia (Niterói)

As informações meteorológicas para a região de Rio das Ostras foram obtidas através do SIMERJ, Sistema de Meteorologia do Estado do Rio de Janeiro, provenientes da Estação Meteorológica de Macaé, estação mais próxima do local de estudo. As informações para Rio das Ostras também são referentes ao período de Abril/2006 a Abril/2007 e estão resumidas nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7 para umidade, temperatura e precipitação, respectivamente. Em relação as maiores médias mensais de precipitação, Rio das Ostras registra ocorrência nos meses de outubro a fevereiro e as menores, de março a setembro. As temperaturas mais elevadas ocorreram nos meses de dezembro a março, sendo a máxima registrada em torno de 38,4°C, e a mais baixa no mês de junho 12,5°C. A máxima umidade do ar, 92% foi registrada nos meses de julho, agosto e setembro, e a mínima foi de 20 % em setembro.

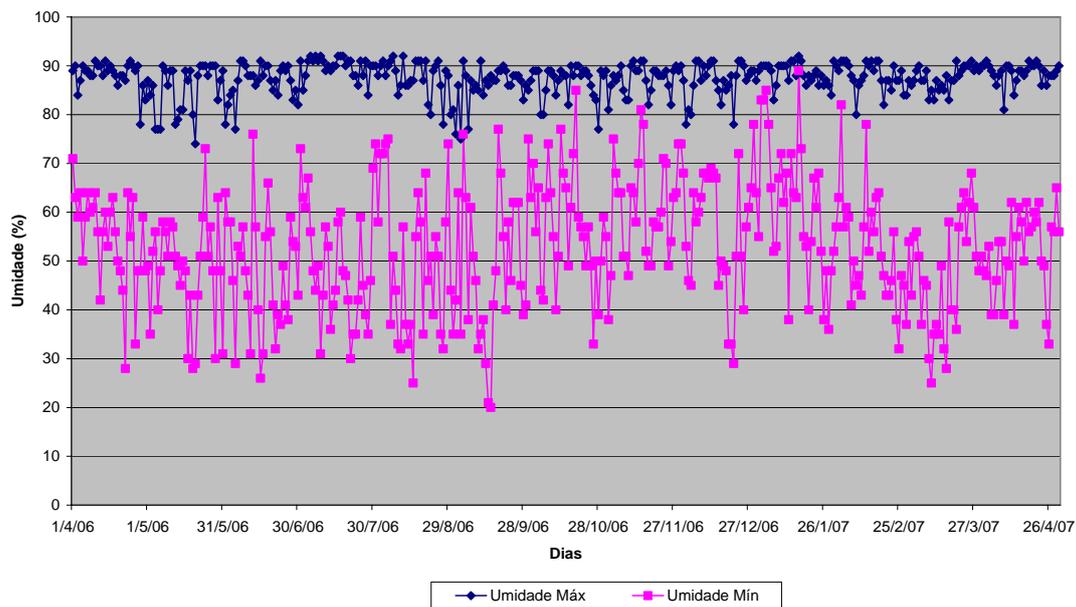


Figura 4.5 – Gráfico Umidade (%) x Dia (Rio das Ostras)

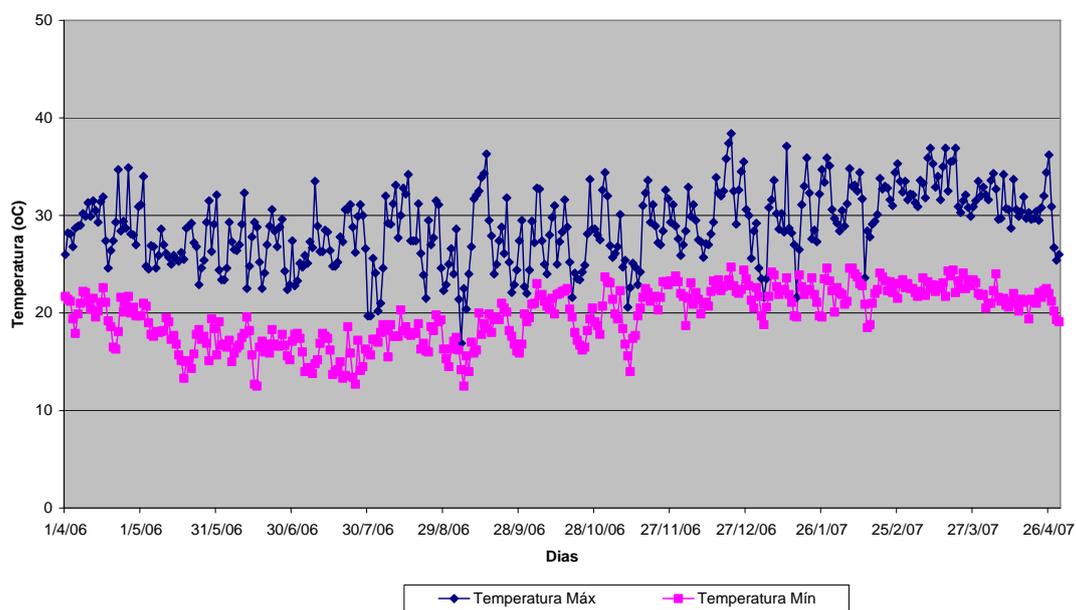


Figura 4.6 – Gráfico Temperatura (°C) x Dia (Rio das Ostras)

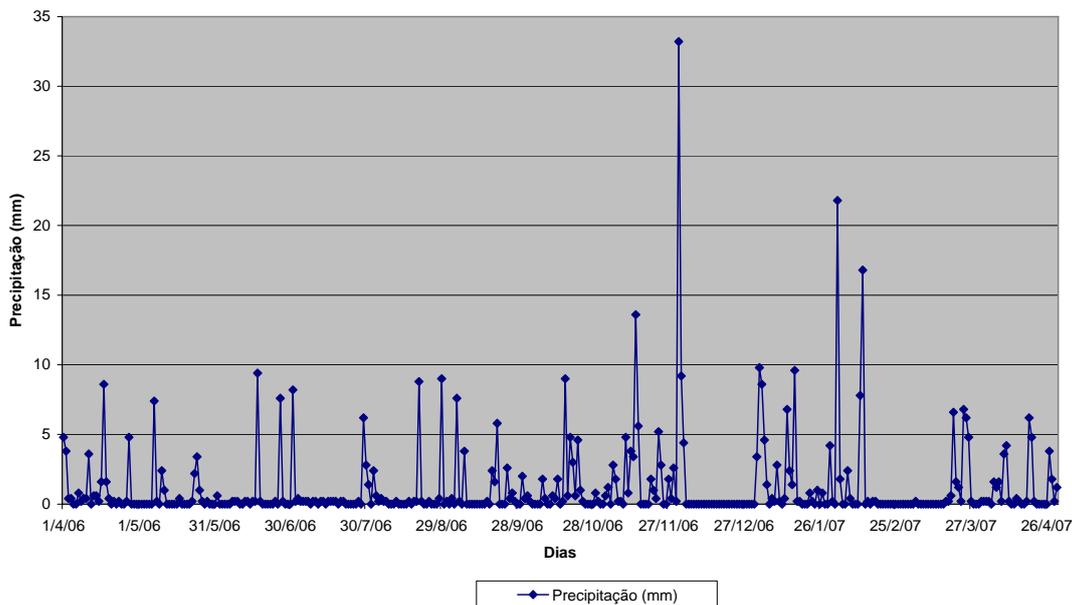


Figura 4.7 – Gráfico Precipitação (mm/dia) x Dia (Rio das Ostras)

4.2 Caracterização dos Solos

4.2.1 Curva Granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a norma NBR 7181/84 – Solo – Análise Granulométrica, a análise granulométrica e as respectivas curvas para as duas amostra estão no anexo.

A curva granulométrica, Figura 4.8, para a amostra nº 1 do Aterro de Morro do Céu apresentou um solo composto de 13% de argila, 11% de silte, 53% de areia e 23% de pedregulho, podendo ser caracterizado uma areia argilo-siltosa.

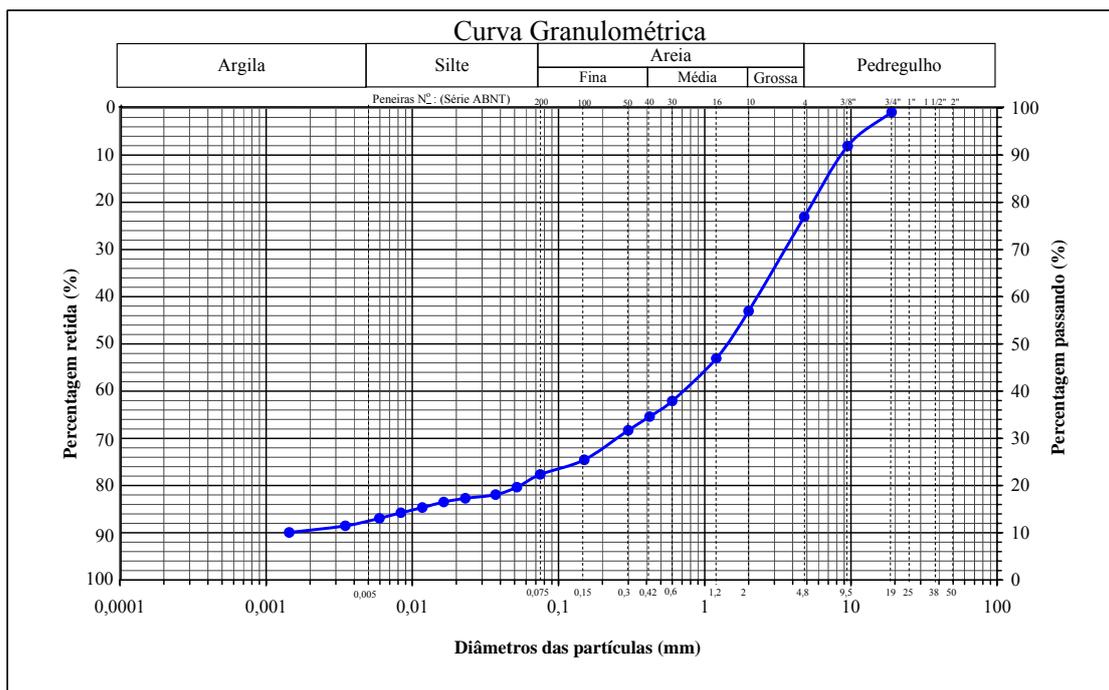


Figura 4.8 – Curva Granulométrica – Morro do Céu – Amostra 1

Outra amostra (Amostra n^o 2) do mesmo local foi ensaiada e apresentou um solo composto de 19% de argila, 19% de silte, 58% de areia e 4% de pedregulho conforme mostra a Figura 4.9, assim caracterizando uma areia silto-argilosa. O solo da primeira amostra apresentou uma fração de finos de 24%, valor inferior ao da segunda amostra que foi de 38%.

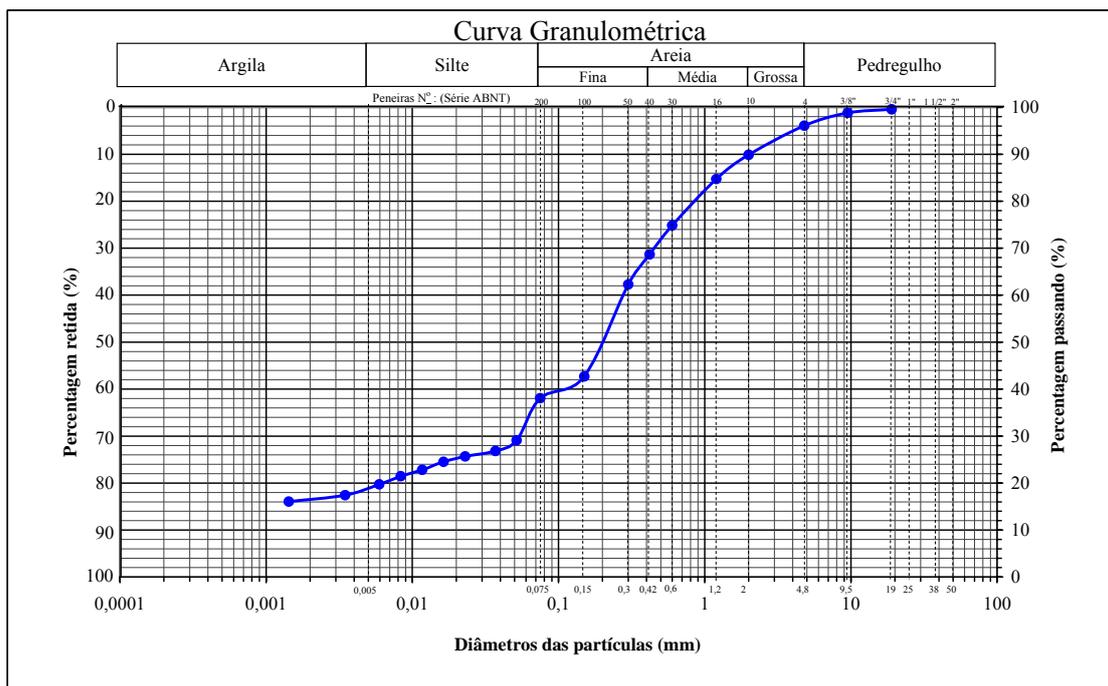


Figura 4.9 – Curva Granulométrica – Morro do Céu – Amostra 2

O solo do Aterro de Rio das Ostras foi descrito como uma argila arenosa com pedregulhos de coloração amarela clara. A caracterização do solo está apresentada na Figura 4.10, onde é possível observar que o solo contém uma fração fina de 59%, sendo 39% de argila e 20% de silte e a fração de areia foi de 40% e de pedregulho 1% (PIRES, 2007).

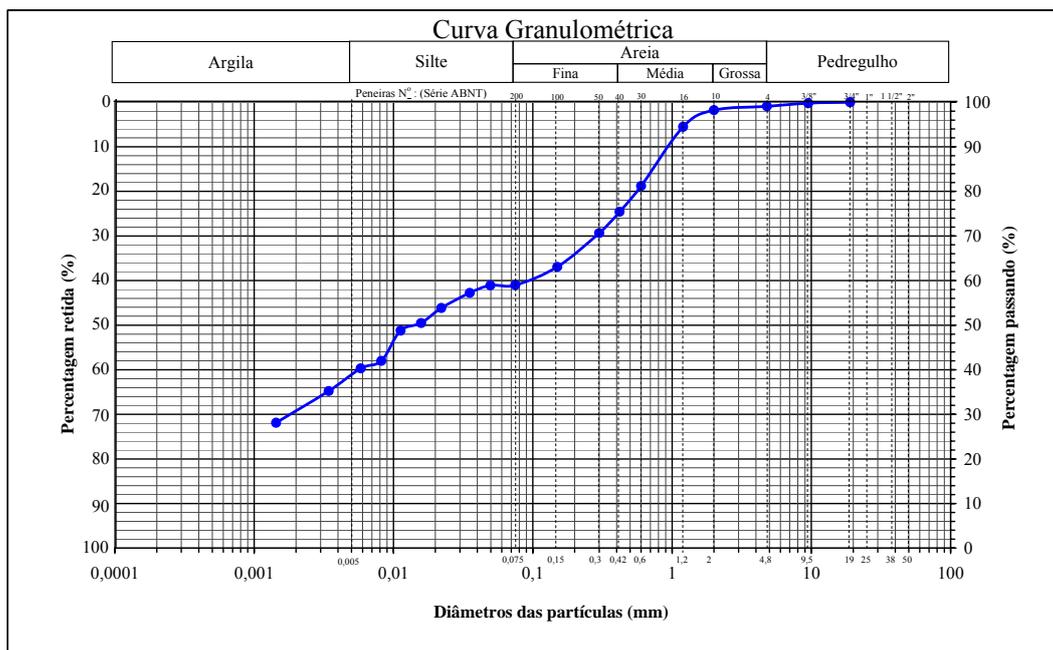


Figura 4.10 – Curva granulométrica – Rio das Ostras (PIRES, 2007)

4.2.2 Limites de Atterberg – Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade

Para a realização dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram utilizados os métodos descritos nas normas, NBR 6459/84 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e NBR 7180/84 – Solo - Determinação do Limite de Plasticidade.

Em relação a amostra nº 1, por se tratar de um solo com pouca fração fina, não foi possível a determinação dos Limites de Atterberg. Para a amostra nº 2 os resultados encontrados foram de 28,13% para o limite de liquidez e 20,65% para o limite de plasticidade, obtendo-se um índice de plasticidade de 7,35%. O solo de Rio das Ostras apresentou limite de liquidez 56,57%, limite de plasticidade 39,08% e índice de plasticidade de 17,5% (PIRES, 2007).

4.2.3 Densidade Real dos Grãos

O Ensaio de densidade real dos grãos foi realizado segundo a norma DNER-ME 093/94 - Solos - Determinação da densidade real dos grãos. Os resultados encontrados para a amostra nº 1 e para a amostra nº 2 do Aterro Morro do Céu foram de 2,631 e 2,673 respectivamente. Para Rio das Ostras o valor foi de 2,584.

4.3 Determinação da curva de compactação Proctor Normal

O ensaio de compactação foi realizado segundo a norma NBR 7182/86 – Solo - Ensaio de Compactação, com energia do tipo Proctor Normal, a fim de determinar a umidade ótima de compactação e a massa específica aparente seca máxima.

Para a primeira amostra de solo de Morro do Céu, o ensaio de compactação Proctor Normal definiu massa específica seca máxima de $1,879 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 11,5% e, para a segunda amostra de solo o valor da umidade ótima foi de 12,4% para uma massa específica aparente seca máxima de $1,893 \text{ g/cm}^3$. Em relação à Rio das Ostras os valores obtidos foram de $1,585 \text{ g/cm}^3$ para massa específica aparente seca e 22,7% para umidade ótima.

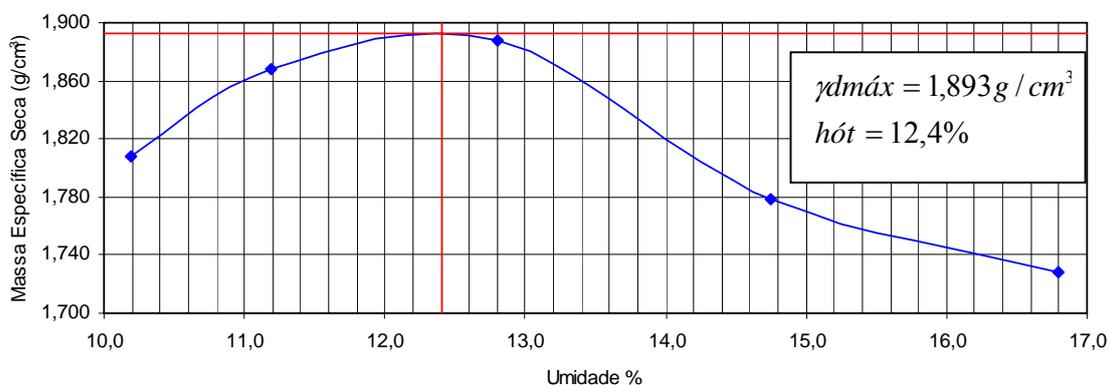


Figura 4.11 – Curva de Compactação – amostra nº 2 Morro do Céu

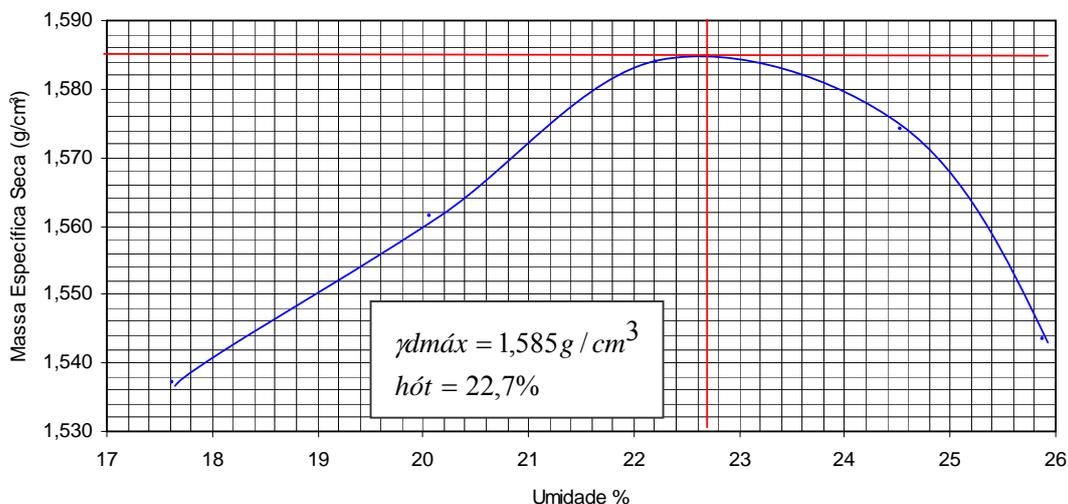


Figura 4.12 – Curva de Compactação – Rio das Ostras

4.4. Determinação da permeabilidade saturada

Para esta pesquisa foi realizado o ensaio em laboratório para a determinação do coeficiente de permeabilidade e , o método adotado foi o do permeâmetro de carga variável. A amostra utilizada foi um corpo de prova compactado nas condições de umidade ótima. O valor encontrado foi de $k = 2,85 \times 10^{-7}$ cm/s. O ensaio de permeabilidade de carga variável para Rio das Ostras foi realizado com amostra compactada na umidade ótima obtendo-se o valor de $1,87 \times 10^{-7}$ cm/s.

4.5. Ensaio de Sucção - Curva característica solo-água

Feita a caracterização da amostra de solo, deu-se início ao Ensaio de Sucção com a utilização do papel-filtro, etapa que teve duração de aproximadamente dois meses. A

primeira etapa desse ensaio é a preparação do corpo de prova, onde devem ser cravados anéis no solo compactado na umidade ótima. No entanto, como o solo da amostra nº 1 de Morro do Céu era composto de muito pedregulho, não foi possível que os corpos de prova fossem moldados, e assim o ensaio não pode ser realizado.



Figura 4.13 – Cravação do anel

Para a amostra nº 2 de Morro do Céu, e para Rio das Ostras foi possível de serem moldados três e cinco corpos de prova, respectivamente, os corpos de prova foram moldados adotando-se as mesmas condições iniciais para as duas amostras de solo, solo compactado na umidade ótima. Assim, inicia-se o ensaio de sucção, com a utilização do papel-filtro, cujo objetivo é obter a relação de sucção x teor de umidade.

4.5.1 Utilização do papel-filtro

O objetivo do papel-filtro é obter a relação de sucção x teor de umidade. Durante todo o ensaio o manuseio dos papéis-filtro foi realizado com a utilização de uma pinça metálica e de luvas, para evitar qualquer alteração nas características originais do papel. Como a relação entre teor de umidade e sucção é influenciada pela umidade inicial da

amostra, optou-se por levar as amostras até a umidade próxima da saturação e, a partir daí, as amostras foram secas ao ar para cada ponto (RIOS, 2006).

No processo de umedecimento foi acrescentada ao corpo de prova, com o auxílio de uma pipeta, uma quantidade de água previamente calculada para se obter a umidade desejada (S em torno de 100%), Figura 4.14. No processo de secagem as amostras foram expostas ao tempo e os teores de umidade foram controlados com relação ao peso de água perdido no processo de evaporação de cada anel. As amostras umedecidas ficaram em repouso por aproximadamente 24 horas, envoltas em papel filme e papel alumínio e confinadas em duas caixas de isopor, para se ter uma amostra mais homogênea sem contato com o meio ambiente.



Figura 4.14 – Umedecimento do corpo de prova

Na realização deste ensaio foi adotado o procedimento padrão descrito na Norma ASTM D 5298-03, com algumas alterações. A referida norma sugere que o papel-filtro seja seco em estufa no mínimo por 16 horas antes do seu uso. Mas, segundo Marinho (1994), este procedimento pode afetar as características de adsorção do papel-filtro, resultando na alteração da curva de calibração. Então, nesta pesquisa o papel-filtro foi utilizado diretamente da caixa, no estado seco ao ar.

Outra alteração se refere ao número de papéis-filtro utilizados para uma mesma amostra. Segundo a norma ASTM D 5298-03, para medir a sucção mátrica são colocados, em contato com o solo, três papéis-filtro entre duas amostras de solo. 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). No procedimento deste ensaio foi utilizado apenas um papel-filtro de cada lado da amostra e a sucção foi inferida pela média do teor de umidade dos dois papéis-filtro.

Os corpos de prova foram obtidos pela cravação de anéis cilíndricos cujas medidas variavam de 4,40 – 5,08 cm de diâmetro e 1,88 – 2,50 cm de altura. Depois dos corpos de prova moldados, eles foram levados até o primeiro valor de umidade desejado, valores de umidades previamente calculados e assim foram colocados em contato direto com os papéis-filtro, um papel de cada lado da amostra. Todo o corpo de prova com o papel-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, de modo que nenhum dos papéis-filtro adquirisse mais umidade do que o outro, Figura 4.15.



Figura 4.15 – Preparação dos corpos de prova

O período de equalização entre o papel-filtro e a amostra foi de sete dias. FEUERHARMEL ET AL. (2004) sugere o tempo de equalização de sete dias para valores de sucção maiores que 10.000 kPa e quatro dias para valores de sucção menores do que 10.000 kPa. MARINHO (1997) salienta que o tempo de equalização está relacionado com o tipo e nível de sucção. O mesmo autor sugere o tempo de sete dias quando se está medindo sucção mátrica, independentemente do nível de sucção. Segundo a norma ASTM D 5298-03, o tempo mínimo de equalização entre solo e o papel-filtro é de sete dias, após esse período se determina a umidade do papel-filtro (RIOS, 2006).

Após o período de equalização, as amostras foram retiradas das caixas de isopor. Em seguida foi retirado o papel alumínio e o papel filme que envolve o corpo de prova; o papel-filtro é retirado com o auxílio de uma pinça metálica e colocado dentro de uma cápsula com tampa (Figura 4.16). As cápsulas com os papéis-filtro foram pesadas em uma balança e depois era descontado o peso da cápsula vazia. Esta operação não deve deixar o papel-filtro exposto por mais de 5 segundos para evitar a perda ou ganho de umidade. Após a pesagem os papéis-filtro foram colocados na estufa por um período mínimo de 24 horas (Figura 4.17). Depois de decorrido este tempo os papéis-filtro, agora secos, foram colocados rapidamente dentro das cápsulas e pesados novamente, obtendo-se assim a umidade do papel-filtro.



Figura 4.16 – Desmontagem dos corpos de prova



Figura 4.17 – Papel-filtro na estufa

A leitura das umidades é realizada, e com esses dados de umidade do papel-filtro e a curva de calibração do mesmo é possível de se obter a sucção do solo. Para a determinação dos próximos pontos do ensaio, os corpos de prova são expostos ao ar, controlando-se nesta etapa a variação do teor de umidade, até atingirem a umidade desejada quando então o processo é repetido.

4.5.2 Resultados do Ensaio de Sucção

Foi realizado para cada local o ensaio de sucção, para Morro do Céu (amostra nº2) foram moldados três corpos de prova e para Rio das Ostras foram moldados cinco corpos de prova, com as mesmas condições iniciais: compactado na umidade ótima. Na figura 4.18, estão apresentadas as três curvas características de Morro do Céu.

Verifica-se uma tendência de comportamento similar para as três curvas. No entanto, se observarmos 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. Analisando as umidades de 10 e 15% ($\pm 2\%$ em relação aa umidade ótima), verifica-se que a sucção varia entre 6500 e 12000 KPa para 10% de umidade e de 1000 a 8000 KPa para 15% (acima da umidade ótima). Estas três umidades (10%, 12,5% e 15%) correspondem respectivamente aos seguintes graus de saturação: 65%, 81% e 97,7%.

Um referencial para valores de sucção seria 1000 kPa como sucção alta, segundo ZORNBERG (2006). Nesse solo de Morro do Céu, pela curva apresentada na figura 4.18, esta condição de sucção corresponderia a uma variação de umidade entre cerca de 18 e 23%, o que está muito acima da umidade ótima.

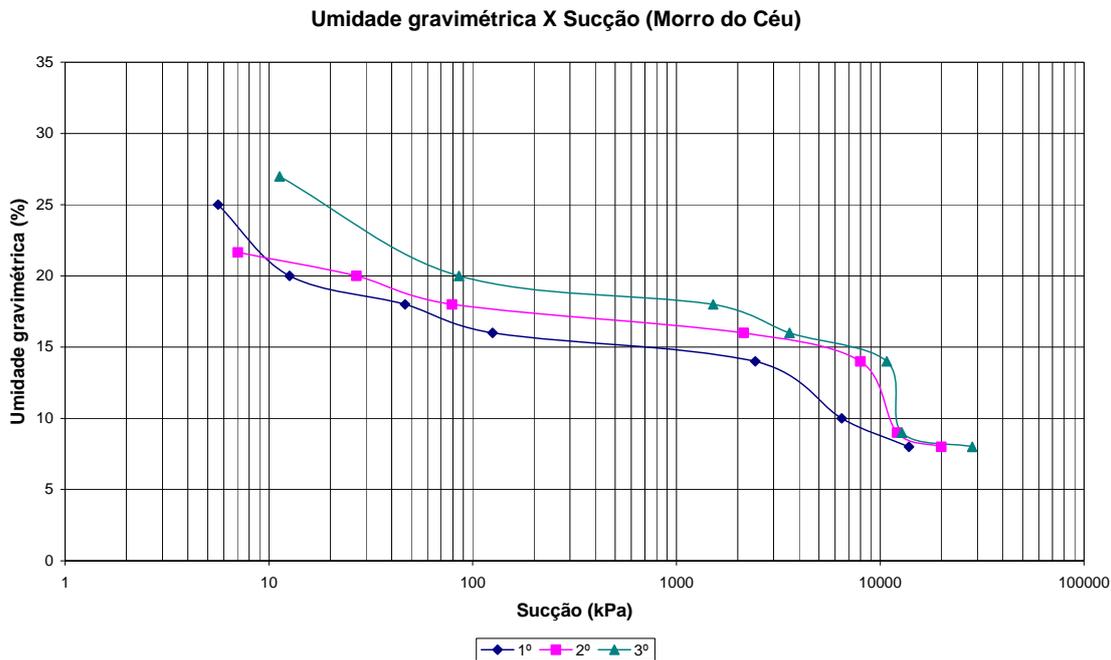


Figura 4.18 – Curva característica Morro do Céu

Cada um dos pontos observados na curva é referente as leituras que foram realizadas a cada semana para a relação sucção x teor de umidade. Verificando-se a variação dos valores de sucção pode-se adotar a curva média para obter-se uma maior representatividade conforme a Figura 4.19.

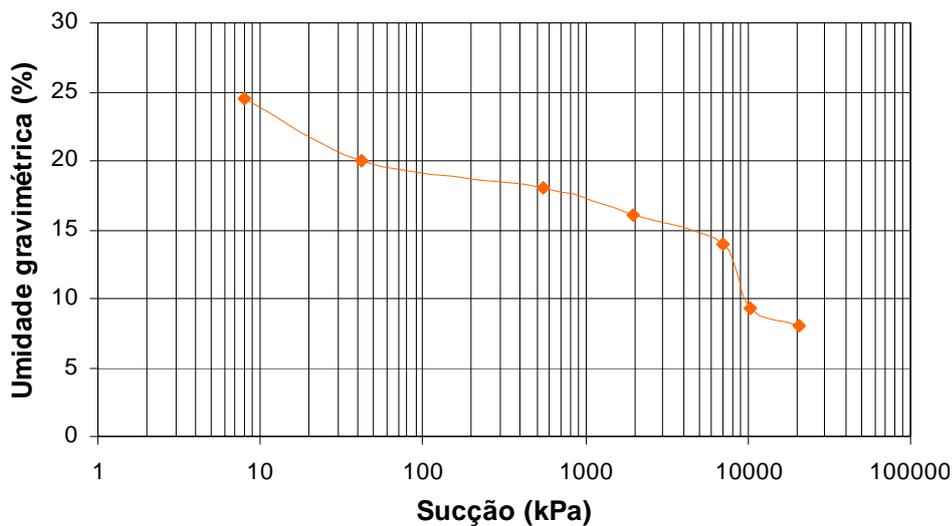


Figura 4.19 – Curva característica média Morro do Céu

O solo de Rio das Ostras também mostrou a mesma tendência de comportamento para as cinco curvas, Figura 4.20. Ao observarmos o valor de sucção para a umidade de 22,5% para as cinco amostras verifica-se uma variação de 2800 KPa a aproximadamente 9000 KPa, valores que podem ser considerados altos. Analisando-se as umidades de 20 e 25% ($\pm 2\%$ em relação à umidade ótima), verifica-se que a sucção varia entre 5000 KPa e 9000 KPa para 20% de umidade e de 4300 KPa e 6000 KPa para 25% (acima da umidade ótima), ZORNBERG (2006) cita 1000 KPa como valor alto para sucção. Essas três umidades analisadas (20%, 22,5% e 25%) correspondem respectivamente aos seguintes graus de saturação: 83%, 94,5% e 100%. Como os valores encontrados para sucção foram altos, na faixa de cerca de 2800 KPa a 9000 KPa (ZORNBERG, 2006), e a estrutura do solo influencia na curva característica, assim como para o solo de Morro do Céu, o solo de Rio das Ostras também deveria ser submetido a outra condição de compactação.

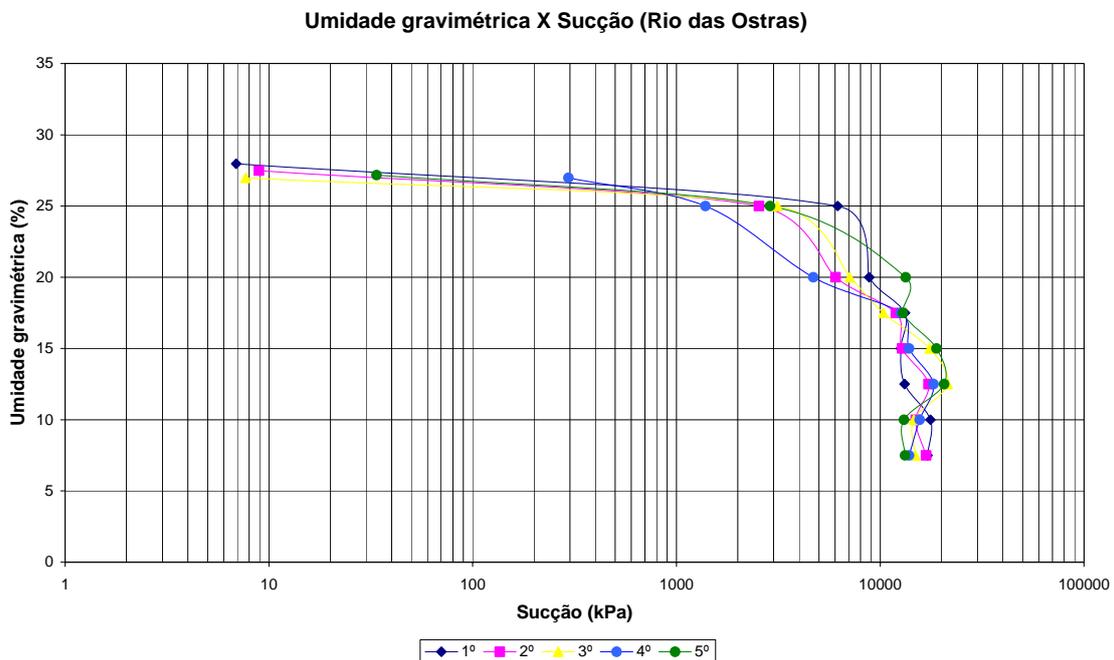


Figura 4.20 – Curva característica Rio das Ostras

Assim como para Morro do Céu foi adotada a curva média, para Rio das Ostras a mesma curva está ilustrada na Figura 4.21, podendo-se obter uma maior representatividade.

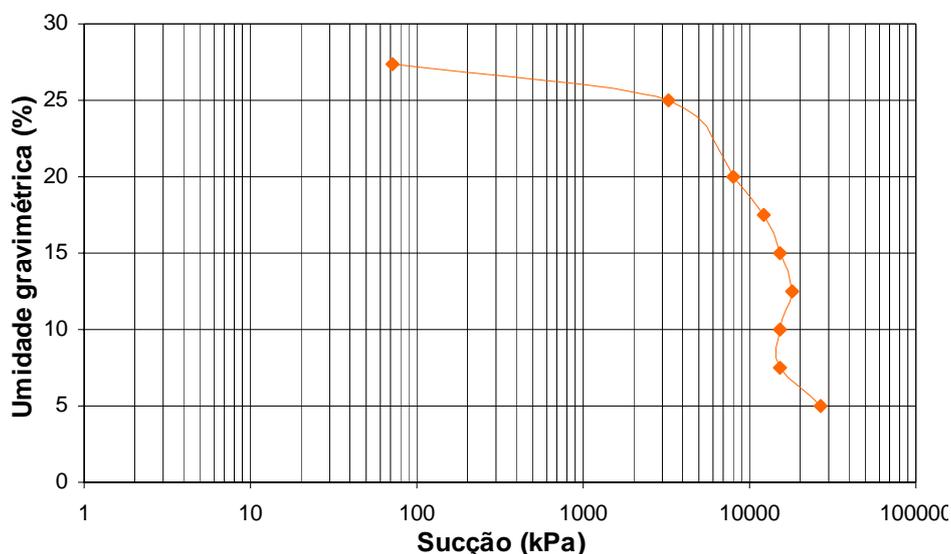


Figura 4.21 – Curva característica média Rio das Ostras

Os resultados apresentados na Figura 4.18 do solo compactado de Morro do Céu, permitiram traçar uma curva média apresentada na Figura 4.19. Essa curva permitiu definir o valor de entrada de ar – AEV (air entry value), ponto no eixo das abcissas (sucção) onde a curva característica muda a inclinação. No solo compactado de Morro do Céu esse valor está entre 100 e 1000 KPa.

Para o solo de Rio das Ostras, a curva característica média foi apresentada na figura 4.21 e os valores de AEV ficaram entre 1000 e 10000 KPa de sucção.

4.6 Considerações finais

1) Os ensaios de sucção forneceram uma primeira visão do comportamento desses solos compactados em relação à variação da sucção com a perda de umidade.

O que se observou foi que o solo de Morro do Céu, uma areia silto argilosa, que apresenta um menor percentual de finos, para uma variação de cerca de $\pm 2\%$ em torno da umidade ótima (12,5%) a variação da sucção ainda fica longe do ponto de AEV, de entrada de ar, que permitiria a percolação. Verifica-se ainda que há uma variação de sucção 4000 e 12000 KPa ou seja um nível de sucção alto, indicando provavelmente um potencial desse solo para uso de camada evapotranspirativa.

O solo de Rio das Ostras, com um percentual de finos maior, apresentou uma variação de sucção em torno da umidade ótima (22,7%) entre 3000 e 10000 KPa, estando um pouco mais próximo do AEV (entre 100 e 1000 KPa). Nesse solo se observa ainda que quando ocorre uma grande perda de umidade, aparentemente de forma abrupta, a sucção se mantém elevada.

Ensaio de sucção realizados em amostra moldada na camada de cobertura do Aterro de Palmas indicaram na curva característica (figura 3.9) níveis de sucção entre 1 e 500 KPa.

Em outra pesquisa (MENDONÇA et al, 2003), avaliação do solo de cobertura seca para disposição de resíduos de mineração carbonífera. A curva característica do solo local foi determinada com solo compactado, figura 3.13, e atingiu sucções no valor de 1x100.000 KPa.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A camada de cobertura final de um aterro de resíduos sólidos urbanos deve assegurar a proteção à saúde humana e ao meio ambiente; a mínima infiltração de água de chuva no aterro encerrado; a drenagem da água; a minimização do fluxo de gases e da erosão. 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 buscando uma relação mais favorável entre o custo e os resultados de proteção ambiental e da saúde humana obtidos.

A utilização de camadas evapotranspirativas é recente, data de 1997 o primeiro sistema de cobertura evapotranspirativa aprovado, na Califórnia. Esse tipo de camada ainda está sendo pesquisado, testes estão sendo realizados para verificar o desempenho das variáveis que influenciam no seu desempenho. Podem ser construídas com diversos tipos de solos, são de fácil construção e requerem baixa manutenção. Estas utilizam a capacidade de retenção de água pelo solo local e a capacidade de evapotranspiração de vegetações para alcançar a desempenho desejada. A camada de solo deve ser capaz de acumular água até que ela possa ser removida, enquanto a cobertura vegetal deve ser capaz de reter parte da chuva precipitada até que ela também seja removida, ambos por evapotranspiração.

Além da monitoração em campo e de análises em laboratório para camadas de cobertura de aterro, existem modelos computacionais finitos unidimensionais que prevêm a quantidade de água em um perfil de solo em função de suas características e das condições climáticas existentes. Especificamente o SoilCover é um modelo computacional composto por um conjunto de elementos finitos utilizado na simulação do movimento de água de um sistema cobertura / rejeito, o qual está sujeito à infiltração e evapotranspiração na superfície do solo.

A avaliação da camada de cobertura de dois locais de destinação final de resíduos, Aterro Morro do Céu (Niterói – RJ) e Aterro Sanitário de Rio das Ostras (Rio das Ostras – RJ) foi realizada por meio dos ensaios de sucção para amostras compactadas. Para Niterói o valor de sucção referente à umidade ótima (12,5%) variou numa faixa de 4000 KPa a 12000 KPa. E, para valores de umidade de 10% a 15%, isto é $\pm 2\%$ em relação à umidade ótima, verificou-se que a sucção variou entre 6500 KPa e 12000 KPa. O solo de Rio das Ostras apresentou uma variação de 2800 KPa a aproximadamente 9000 KPa, para a umidade ótima (22,5%). Para uma variação de 5% de umidade (20% a 25%, $\pm 2\%$ em relação à umidade ótima), a sucção variou entre 5000 KPa e 9000 KPa para 20% de umidade e de 4300 KPa e 6000 KPa para 25%. Os valores de sucção encontrados para os dois locais podem ser considerados altos tendo-se a literatura como referência.

Sugestões:

- 1) Utilizar o SoilCover para determinar as curvas de saturação para várias espessuras de camada monolítica.
- 2) Utilizar o Vadose/W e comparar as duas simulações.
- 3) Realização de ensaios de sucção com um período de duração maior, para dois solos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Análise Granulométrica*: NBR 7181/1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Determinação do limite de liquidez*: NBR 6459/1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Determinação do limite de plasticidade*: NBR 7180/1984.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Ensaio de Compactação*: NBR 7182/1986.

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

BAVER, L. D., GARDNER, W. H. & GARDNER, W. R., 1972. Soils Physics. 4 ed. London, Inc., Cap. 7-9.

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

CABRAL, A., EL-GHABI, B., PARENT, S.E. and MARINEAU, L., 2007. Design and performance of an experimental double capillary barrier cover placed in a municipal solid waste landfill in Quebec, Canada. Proceedings Sardinia 2007, Tenth International Waste management and Landfill Symposium Cd rom.

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., 2007. Comportamento Geomecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 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, T. P. M., 1994. Equipamentos e técnicas para determinação da sucção no campo. Anais II Simp. Solos não Saturados, Recife – PE pp. 9-18.

CHANDLER, R. J. & GUTIERRES, C. I., 1986. The filter paper method of suction measurement. Geotechnique, London 36: 265-268.

COSSU, R. (1998) Drainage and Collection of Leachate. Proceedings of International Training Seminar: Management and Treatment of MSW Landfill Leachate, p. VII-1 a VII-14, CISA, Venice, Italy.

EDLEFSEN, N.E. & ANDERSON, A.B.C., 1943. Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia* 15: 31-298.

FAYER, M. e JONES, T.L., 1990. "UNSAT-H version 2.0: Unsaturated soil water and heat flow model.". PNL-679, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington

FERREIRA, J.A.; CAMPOS, J.C.; RITTER, E., 2001. Uma Revisão das Técnicas de Tratamento de Chorume e a Realidade do Estado do Rio de Janeiro. In: Anais do 21o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental,. Paraíba. ABES, Rio de Janeiro.

FREDLUND, D. G., XING A., & HUANG, S., 1994. Prediction of the permeability functions for unsaturated soil using the soil water characteristics curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, N° 4, pp 533-546.

FREDLUND, D. G., & RAHARDJO., H., 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley-Interscience Publications.

GEO-ANALYSIS, 2000. *SoilCover User's Manual*, Unsaturated Soils Group. Department of Civil Engineering. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá.

GEOSLOPE INTERNATIONAL LTD, 2004. *Vadose/W Technical Overview*. Calgary, Canada.

HEAD, K. H., 1982. *Manual of soil laboratory testing*. Vol.2: Permeability, shear strength and compressibility tests. London.

HILLEL, D., 1971. *Soil Water-Physical principles and processes*. New York, Academic Press, Cap 1-5.

HILLEL, D., 1971. *Soil and Water – Physical principles and processes*. Academic Press, 288p.

HUPE, K., HEYER, K., BECKER, J.F., TRAORE, O., NOETZEL, S., STEGMANN, R. (2003) *Investigations of Alternative landfill Surface Sealing in Test Fields*. Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste management and Landfill Symposium Cd rom.

IBGE, (1989/2000) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB)*.

JOHNSON, C.; and HILL, S. (2004) Down to Earth – Local soil and vegetation may make your best landfill cover. Waste Management World – Review Issue 2004 –ISWA. James, London.

JUCÁ, J. F. T., 1990. Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada. Dissertação de doutorado, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha.

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. Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps, 1 ed. New York, ASCE PRESS,1997.

KOOREVAAR, M. G., & DIRKSEN C., 1983. Element of soil Physics. Amsterdam, Fund, Cargill, Campinas, 466p.

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

MARINHO, F. A. M., 2005. Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados. Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre-Docência.

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

MARINHO, F. A. M., 1994. Shrinkage behavior of de some plastic soils. Tese de Doutorado, University of London.

MARINHO, F. A. M., 1994-a. Medição de sucção com o método do papel filtro. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Vol. 2, pp. 515-522.

MARINHO, F. A.M., 1994-b. Shrinkage Behavior of Some Plastic Soils. Ph.D. Thesis – Imperial College – University of London.

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.

MARSHALL, T. S. & HOLMES, J. M., 1981. Soil Physics. Cambridge University Press, Cambridge, Cap. 1-4.

MENDONÇA, R.M.G., MATEUS, M.S.C.S., BARBOSA, M.C., BORMA, L.M., SOARES, P.S.M. (2003). Avaliação de sistema de cobertura seca para região sul de Santa Catarina. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental.

MESQUITA, J.M., 2004. Avaliação da aplicabilidade de um modelo de gestão integrada de resíduos sólidos nos municípios de pequeno porte no Estado do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UERJ, 127p.

O’KANE, M., 2002. “CANMET-CETEM Manual on Cover System Design for Reactive Mine Waste”. Report nº.689-01 prepared for CANMET-CETEM, June.

PENMAN, H.L., 1948. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London Ser. A. 193: 120-145.

PINTO, C. S., 2000. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. São Paulo: Oficina de 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 Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UERJ, 90p.

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

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

RIOS, M. G. F., 2006. Comportamento de um Aterro Compactado em Campo e Laboratório. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SCOTT, R. F., WESLEY, A., 1965. Principles of soil mechanics. Publishing Company.

SWANSON, D. A., 1995. “Predictive modeling of moisture movement in engineered soil covers for acid generating mine waste”. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. (1993) Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues. IRWIN/McGRAW-HILL, USA.

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

UBALDO, M. O., 2005. Uso de cinzas de carvão na composição de uma cobertura de rejeitos de mineração. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

VIDAL, F. S.; BORMA, L. S., 2006. Avaliação do perfil de saturação de uma cobertura de aterro de resíduos sólidos utilizando o modelo SoilCover.

WELS, C.; LOUNDON, S.; NEWMAN, G., 2001. "Modelling of alternative cover scenarios for mine rock piles at the Zortman and Landusky mine sites". In: National Association of Abandoned Mine Lands Annual Conference, August 19-22, 2001, Athens, Ohio.

WILSON, G. W., 1990. The avaluation of evaporative fluxes from unsaturated soil surfaces. Tese de Doutorado, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá.

WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., Barbour, S.L., 1994. "Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation, *Can. Geotech. J.*, 31:151-161.

ZORNBERG, M., LESTERL., & CALDWELL, J.A., 2003 Analysis and Design of evapotranspirative Cover for hazardous Waste Landfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 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.

7. ANEXOS

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

PROJETO:	Aterro Morro do Céu	AMOSTRA:	01
LOCAL:	Niterói		
DATA DEO ENSAIO:	18/7/2007		

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

Cápsula N°	511	531
Solo um.+tara(g)	71,50	69,37
Solo seco+tara(g)	70,84	68,83
Tara (g)	12,06	14,14
Água (g)	0,66	0,54
Solo seco (g)	58,78	54,69
Teor de umid.%	1,12	0,99
Média %	1,06	

PENEIRAMENTO GROSSO

Peneiras		Peso da am. seca (g)		% pas. am. total
N°(ASTM)	mm(ABNT)	Retido	Passando	
2"	50	0,00		100
1 1/2"	38	0,00		100
1"	25	0,00		100
3/4"	19	13,70	1551,89	99
3/8"	9,5	112,72	1439,17	92
4	4,8	234,83	1204,34	77
10	2	312,52	891,82	57

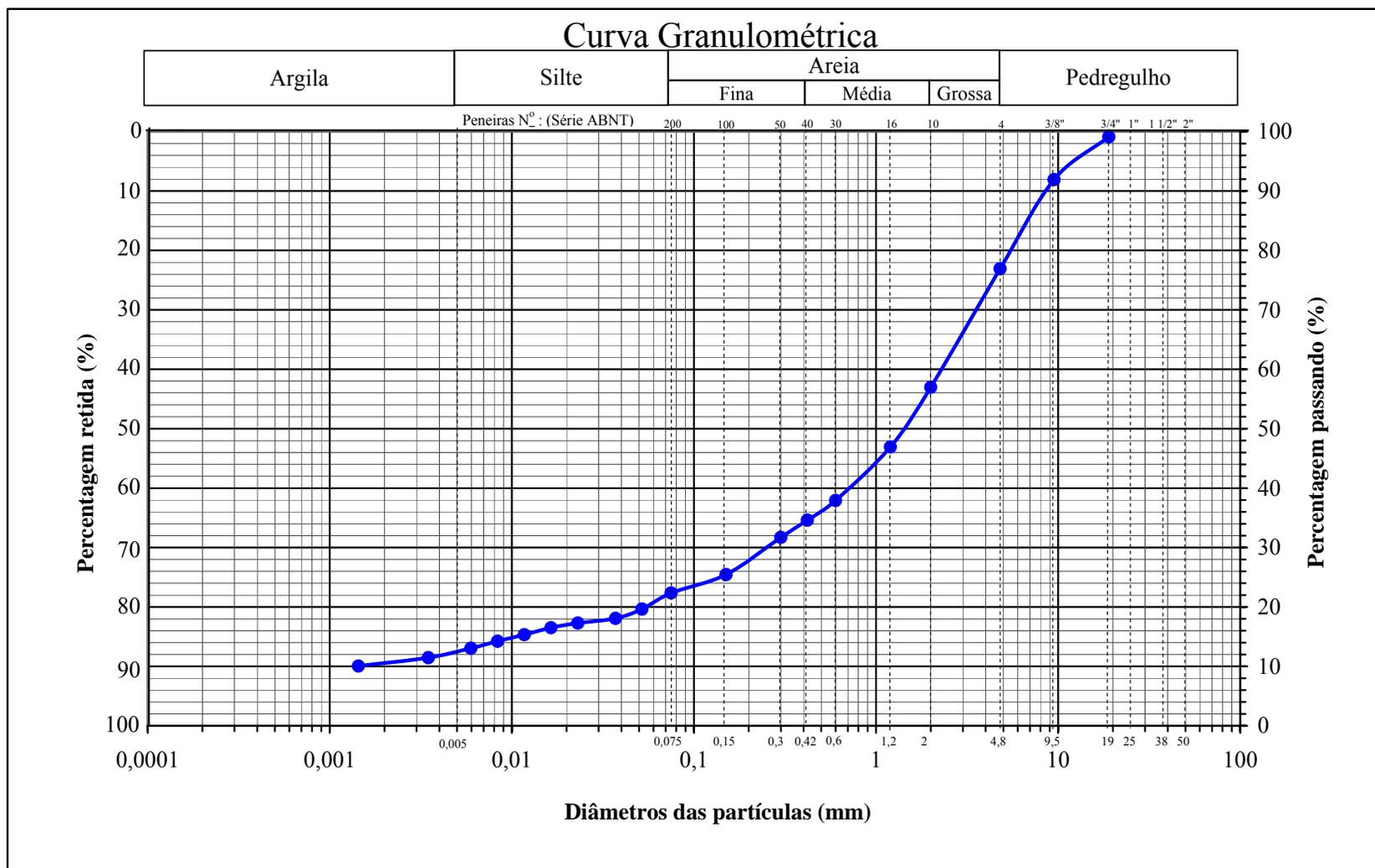
PENEIRAMENTO GROSSO (g)

PENEIRAMENTO FINO (g)

Amostra total úmida	1575,0	Peneiras		Peso da am. seca (g)		% pas. am. parcial	% pas. am. total
		N°	mm	Retido	Passando		
Solo seco retido #10	673,8	16	1,20	20,50	95,79	82,4	47
Solo úmido pas. #10=(A-B)	901,2	30	0,60	18,40	77,39	66,6	38
Solo seco pas.#10=C/(100+h)	891,8	40	0,42	6,77	70,62	60,73	35
Amostra total seca =B+D	1565,6	50	0,30	5,89	64,73	55,66	32
PENEIRAMENTO FINO (g)		100	0,15	12,79	51,94	44,67	25
Peso da amostra úmida=PU	117,52	200	0,075	6,33	45,61	39,22	22
Peso am.seca=PU/(100+h)	116,29						

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
25/07/07	11:16	30	25	1030,0	-2,0	28,00	13,84	0,072	22
25/07/07	11:17	60	25	1027,0	-2,0	25,00	14,39	0,052	20
25/07/07	11:18	120	25	1025,0	-2,0	23,00	14,76	0,037	18
25/07/07	11:21	300	25	1024,0	-2,0	22,00	14,23	0,023	17
25/07/07	11:26	600	25	1023,0	-2,0	21,00	14,42	0,016	17
25/07/07	11:36	1200	25	1021,5	-2,0	19,50	14,69	0,012	15
25/07/07	11:56	2400	24	1020,5	-2,4	18,10	14,95	0,008	14
25/07/07	12:36	4800	24	1019,0	-2,4	16,60	15,23	0,006	13
25/07/07	15:16	14400	24	1017,0	-2,4	14,60	15,59	0,003	11
26/07/07	10:40	86280	22	1016,0	-3,2	12,80	15,92	0,001	10
Densímetro:		150,980	Gs =	2,631	Proveta N°	19	Área =	29,609	cm ²
Volume:		42,040							



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

PROJETO:	Aterro Morro do Céu	AMOSTRA:	02
LOCAL:	Niterói		
DATA DO ENSAIO:	18/9/2007		

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

Cápsula N°	513	517
Solo um.+tara(g)	88,90	90,81
Solo seco+tara(g)	87,30	89,21
Tara (g)	11,03	12,43
Água (g)	1,60	1,60
Solo seco (g)	76,27	76,78
Teor de umid.%	2,10	2,08
Média %	2,09	

PENEIRAMENTO GROSSO

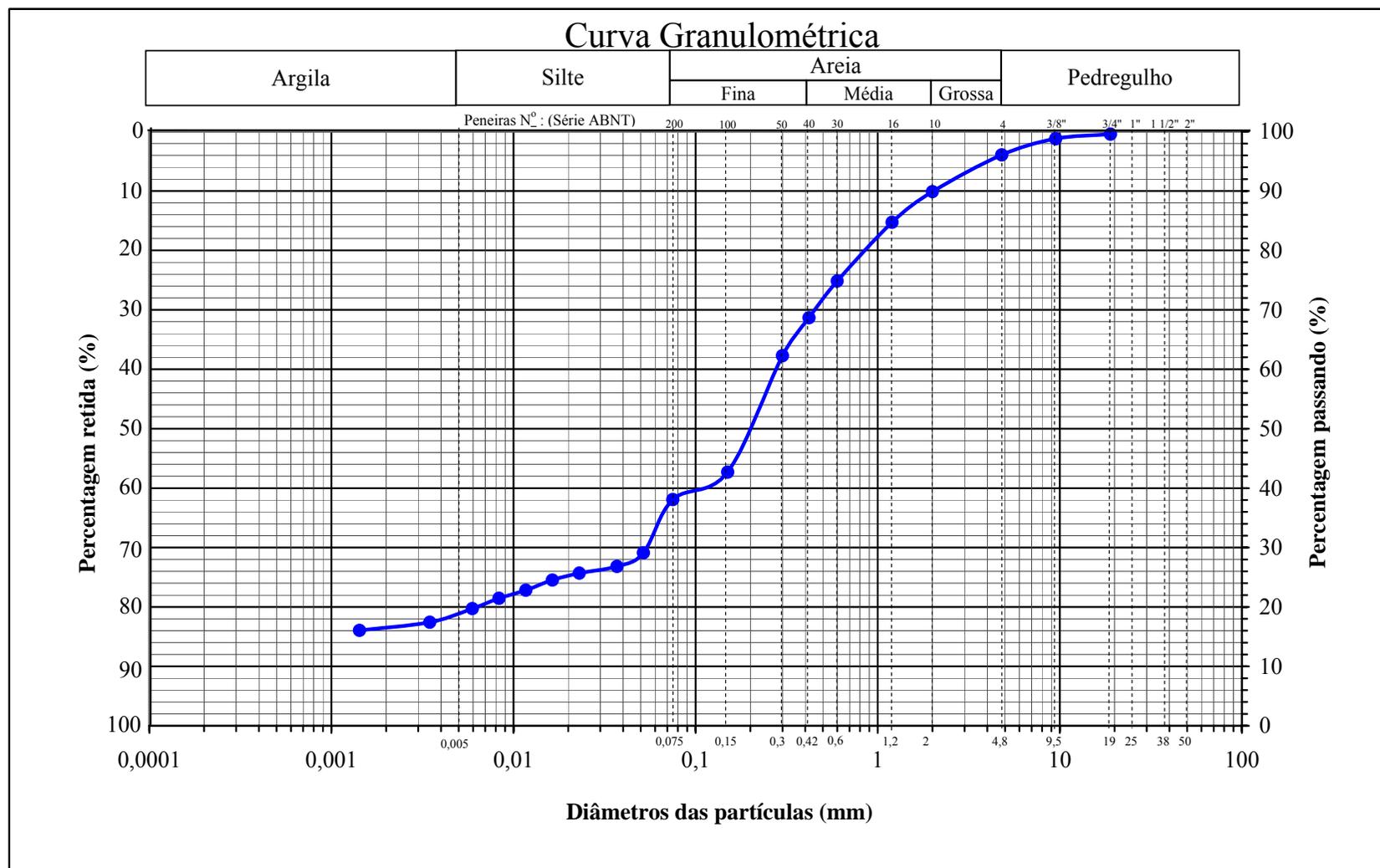
Peneiras		Peso da am. seca (g)		% pas. am. total
N°(ASTM)	mm(ABNT)	Retido	Passando	
2"	50	0,00		100
1 1/2"	38	0,00		100
1"	25	0,00		100
3/4"	19	8,86	2032,77	100
3/8"	9,5	15,64	2017,13	99
4	4,8	55,56	1961,57	96
10	2	126,28	1835,29	90

PENEIRAMENTO GROSSO (g)

Amostra total úmida	2080,0	Peneiras		Peso da am. seca (g)		% pas. am. parcial	% pas. am. total
		N°	mm	Retido	Passando		
Solo seco retido #10	206,3	16	1,20	7,24	118,59	94,2	85
Solo úmido pas. #10=(A-B)	1873,7	30	0,60	13,81	104,78	83,3	75
Solo seco pas.#10=C/(100+h)	1835,3	40	0,42	8,64	96,14	76,40	69
Amostra total seca =B+D	2041,6	50	0,30	8,95	87,19	69,29	62
PENEIRAMENTO FINO (g)		100	0,15	27,43	59,76	47,49	43
Peso da amostra úmida=PU	128,46	200	0,075	6,46	53,30	42,36	38
Peso am.seca=PU/(100+h)	125,83						

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
20/09/07	11:16	30	27	1030,0	-1,6	28,40	13,77	0,072	33
20/09/07	11:17	60	27	1027,0	-1,6	25,40	14,32	0,052	29
20/09/07	11:18	120	27	1025,0	-1,6	23,40	14,69	0,037	27
20/09/07	11:21	300	27	1024,0	-1,6	22,40	14,16	0,023	26
20/09/07	11:26	600	27	1023,0	-1,6	21,40	14,34	0,016	25
20/09/07	11:36	1200	27	1021,5	-1,6	19,90	14,62	0,012	23
20/09/07	11:56	2400	26	1020,5	-1,8	18,70	14,84	0,008	21
20/09/07	12:36	4800	26	1019,0	-1,8	17,20	15,12	0,006	20
20/09/07	15:16	14400	26	1017,0	-1,8	15,20	15,48	0,003	17
21/09/07	10:40	86280	25	1016,0	-2,0	14,00	15,70	0,001	16
Densímetro:		150,980	Gs =	2,673	Proveta N°	19	Área =	29,609	cm ²
Volume:		42,040							



LIMITE DE LIQUIDEZ

PROJETO:	Aterro Morro do Céu		AMOSTRA:	02
LOCAL:	Niterói			

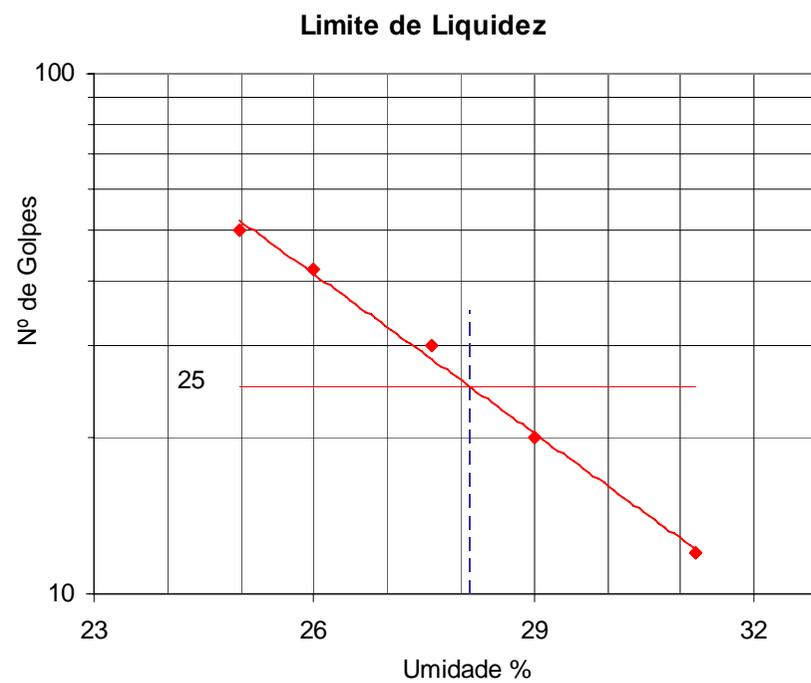
Cápsula N°	Cáp.e Solo Úmido (g)	Cáp. e Solo Seco (g)	Cápsula (g)	Água (g)	Solo Seco (g)	Teor de Umidade (%)	N° de Golpes
402	19,43	16,57	7,40	2,86	9,17	31,19	12
411	23,62	19,95	7,3	3,67	12,65	29,01	20
488	24,36	20,94	8,55	3,42	12,39	27,60	30
405	24,37	20,85	7,31	3,52	13,54	26,00	42
418	20,83	18,10	7,17	2,73	10,93	24,98	50

LIMITE DE PLASTICIDADE

PROJETO:	Aterro Morro do Céu		AMOSTRA:	02
LOCAL:	Niterói			

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.(%)
421	10,40	10,03	8,37	0,37	1,66	22,29	20,6
457	9,38	9,06	7,36	0,32	1,70	18,82	
415	7,46	7,20	6,03	0,26	1,17	22,22	
481	9,13	8,85	7,33	0,28	1,52	18,42	
461	9,15	8,83	7,34	0,32	1,49	21,48	

Limite de Liquidez (%)	28,13
Limite de Plasticidade (%)	20,65
Índice de Plasticidade (%)	7,48



DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

PROJETO:	Aterro Morro do Céu	AMOSTRA:	01
LOCAL:	Niterói		
DATA DO ENSAIO:	18/07/2007		

Ensaio Nº		1	2	3
Temperatura da água e solo °C	T	21	21	21
Picnômetro No		8	15	21
Picnômetro + solo seco (g)		48,32	53,65	44,41
Picnômetro (g)		26,84	33,26	23,87
Picnômetro + água (g)	Pw	76,95	85,77	73,80
Picnômetro + solo + água (g)	Pws	90,26	98,40	86,55
Solo seco (g)	Ps	21,48	20,39	20,54
Água deslocada $Ps + Pw - Pws$ (g)		8,17	7,76	7,79
Fator de correção	K	0,9998	0,9998	0,9998
Densidade real dos grãos	Gs	2,629	2,627	2,636
$PsK / (Ps + Pw - Pws)$	Média	2,631		

DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

PROJETO:	Aterro Morro do Céu	AMOSTRA:	02
LOCAL:	Niterói		
DATA DO ENSAIO:	18/09/2007		

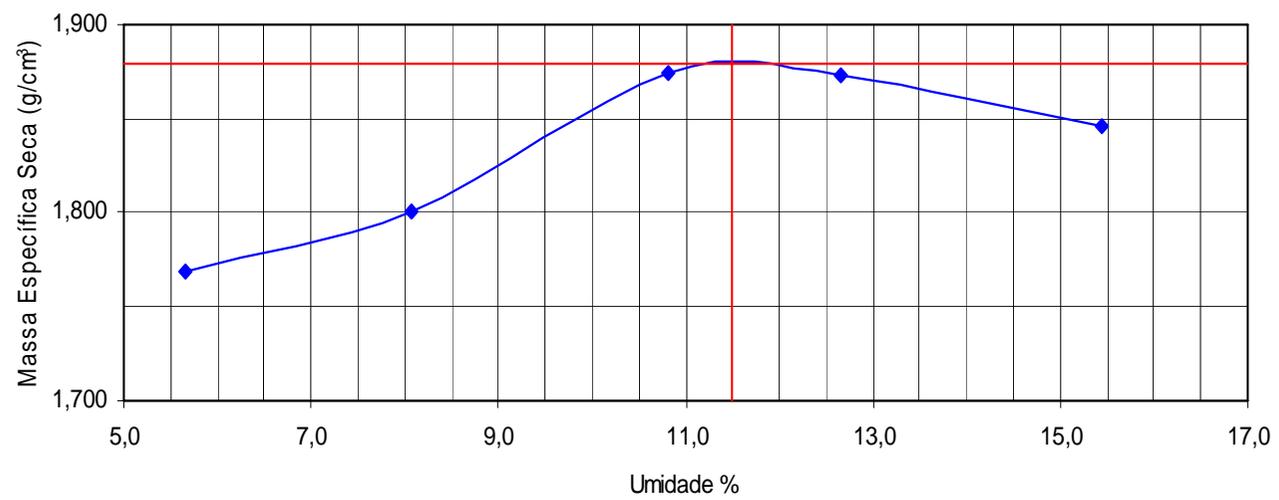
Ensaio N°		1	2	3
Temperatura da água e solo °C	T	21	21	21
Picnômetro No		6	7	8
Picnômetro + solo seco (g)		54,39	60,77	52,46
Picnômetro (g)		31,76	35,03	26,84
Picnômetro + água (g)	Pw	82,55	87,04	76,97
Picnômetro + solo + água (g)	Pws	96,75	103,15	92,97
Solo seco (g)	Ps	22,63	25,74	25,62
Água deslocada $P_s + P_w - P_{ws}$ (g)		8,43	9,63	9,62
Fator de correção	K	0,9998	0,9998	0,9998
Densidade real dos grãos	Gs	2,684	2,672	2,663
$P_s K / (P_s + P_w - P_{ws})$	Média	2,673		

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

PROJETO:	Aterro Morro do Céu	AMOSTRA:	01
LOCAL:	Niterói		
DATA DE ENSAIO:	18/07/2007		

Molde N°	37		60		25		55		43	
Água adicionada (g)	200		300		400		500		600	
Am. úmida+molde (g)	9220		9390		9660		9900		9595	
Peso do molde (g)	5287		5303		5300		5446		5168	
Peso am. úmida (g)	3933		4087		4360		4454		4427	
Vol. molde (cm ³)	2104		2100		2100		2110		2077	
Mas.esp.úm.(g/cm ³)	1,869		1,946		2,076		2,111		2,131	
Cápsula N°	514	584	367	542	320	598	571	511	512	550
Am. úmida+tara (g)	86,36	87,25	79,90	66,87	64,34	64,22	60,20	59,37	67,50	64,08
Am. seca+tara (g)	82,33	83,25	75,26	62,82	59,16	59,16	54,88	54,05	60,05	57,28
Tara (g)	11,62	12,31	17,79	12,62	11,20	12,38	12,87	12,06	12,44	12,67
Peso da água (g)	4,03	4,00	4,64	4,05	5,18	5,06	5,32	5,32	7,45	6,80
Peso am.seca (g)	70,71	70,94	57,47	50,20	47,96	46,78	42,01	41,99	47,61	44,61
Umidade (%)	5,70	5,64	8,07	8,07	10,80	10,82	12,66	12,67	15,65	15,24
Umidade média (%)	5,7		8,1		10,8		12,7		15,4	
Mas.esp.sec.(g/cm ³)	1,769		1,801		1,874		1,873		1,846	

Golpes por camada (5 camadas)	12
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1,879
Umidade ótima (%)	11,5

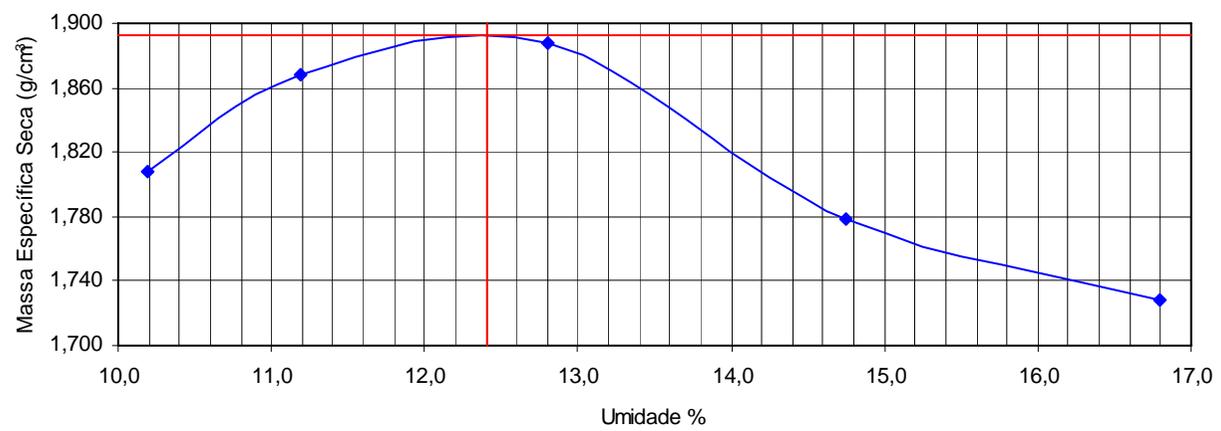


ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

PROJETO:	Aterro Morro do Céu	AMOSTRA:	02
LOCAL:	Niterói		
DATA DE ENSAIO:	18/09/2007		

Molde N°	55		13		55		37		37	
Água adicionada (g)	500		620		740		860		980	
Am. úmida+molde (g)	9650		8969		9940		9580		9535	
Peso do molde (g)	5446		4600		5446		5287		5287	
Peso am. úmida (g)	4204		4369		4494		4293		4248	
Vol. molde (cm ³)	2110		2103		2110		2104		2104	
Mas.esp.úm.(g/cm ³)	1,992		2,078		2,130		2,040		2,019	
Cápsula N°	513	586	354	587	510	569	513	557	349	599
Am. úmida+tara (g)	74,75	67,11	73,69	64,67	78,46	72,15	72,23	81,98	86,73	77,86
Am. seca+tara (g)	68,77	62,12	67,83	59,26	71,01	65,45	64,35	72,85	76,11	68,73
Tara (g)	11,03	12,33	13,90	12,24	11,34	14,38	11,03	10,84	14,77	12,64
Peso da água (g)	5,98	4,99	5,86	5,41	7,45	6,70	7,88	9,13	10,62	9,13
Peso am.seca (g)	57,74	49,79	53,93	47,02	59,67	51,07	53,32	62,01	61,34	56,09
Umidade (%)	10,36	10,02	10,87	11,51	12,49	13,12	14,78	14,72	17,31	16,28
Umidade média (%)	10,2		11,2		12,8		14,8		16,8	
Mas.esp.sec.(g/cm ³)	1,808		1,869		1,888		1,778		1,729	

Golpes por camada (5 camadas)	12
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1,893
Umidade ótima (%)	12,4



ENSAIO DE PERMEABILIDADE CARGA VARIÁVEL

PROJETO: Aterro Morro do Céu	AMOSTRA: 2
LOCAL: Niterói	Corpo de Prova na Umidade Ótima
DATA DE ENSAIO: 14/2/2008	

CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA	Molde N° -
-----------------------------------	------------

Umidade	Inicial		Final		Diâmetro do Molde (cm)		D	10,20
					Altura do Molde (cm)		L	10,00
Cápsula N°	354	541	2	-	Peso do Molde (g)		P	1438,50
					Área do Molde (cm ²)		A	81,71
Peso Úmido + Tara (g)	66,17	67,27	3.214,90	-	Volume do Molde (cm ³)		A x L	817,13
Peso Seco + Tara (g)	60,47	61,55	2.964,00	-	Área da Bureta (cm ²)		a	0,25
Água (g)	5,70	5,72	250,90	-	Peso Úmido + Molde (g)		PM	3145,00
Tara(g)	13,90	14,54	1.439,60	-	Peso Úmido (g)		PU	1706,50
Peso Seco (g)	46,57	47,01	1524,40	-	Peso Seco (g)		PS	1520,90
Umidade (%)	12,24	12,17	16,4589	-	Peso Esp. Úmido (g/cm ³)		γ_h	2,088
					Peso Esp. Seco (g/cm ³)		γ_s	1,861
					Peso Esp. dos Grãos(g/cm ³)		G_s	2,673
Umidade Média (%)	12,20		16,46		Volume de Sólidos (cm ³)		V_s	568,98
					Índice de Vazios		e	0,44
Grau de Saturação (%)	74,80		100,88		Porosidade (%)		n	30,37%
					Grau de Compactação (%)		GC	100

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 (°C)	Fator Cor. R_T	Permeabilidade K (cm/seg)	Permeabilidade Média K_{20} (cm/seg.)
103,5	83,5	20,0	22.140	25	0,9989	2,96E-07	2,85E-07
103,5	83,5	20,0	22.200	25	0,9989	2,95E-07	
103,5	63,5	40,0	54.000	25	0,9989	2,76E-07	
103,5	63,5	40,0	54.900	25	0,9989	2,72E-07	

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

PROJETO:	Aterro Sanitário de Rio das Ostras	AMOSTRA:	01
LOCAL:	Rio das Ostras		
DATA DO ENSAIO:	23/02/2005		

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

Cápsula N°	518	573
Solo um.+tara(g)	83,23	82,43
Solo seco+tara(g)	75,69	74,96
Tara (g)	14,47	14,6
Água (g)	7,54	7,47
Solo seco (g)	61,22	60,36
Teor de umid.%	12,32	12,38
Média %	12,35	

PENEIRAMENTO GROSSO

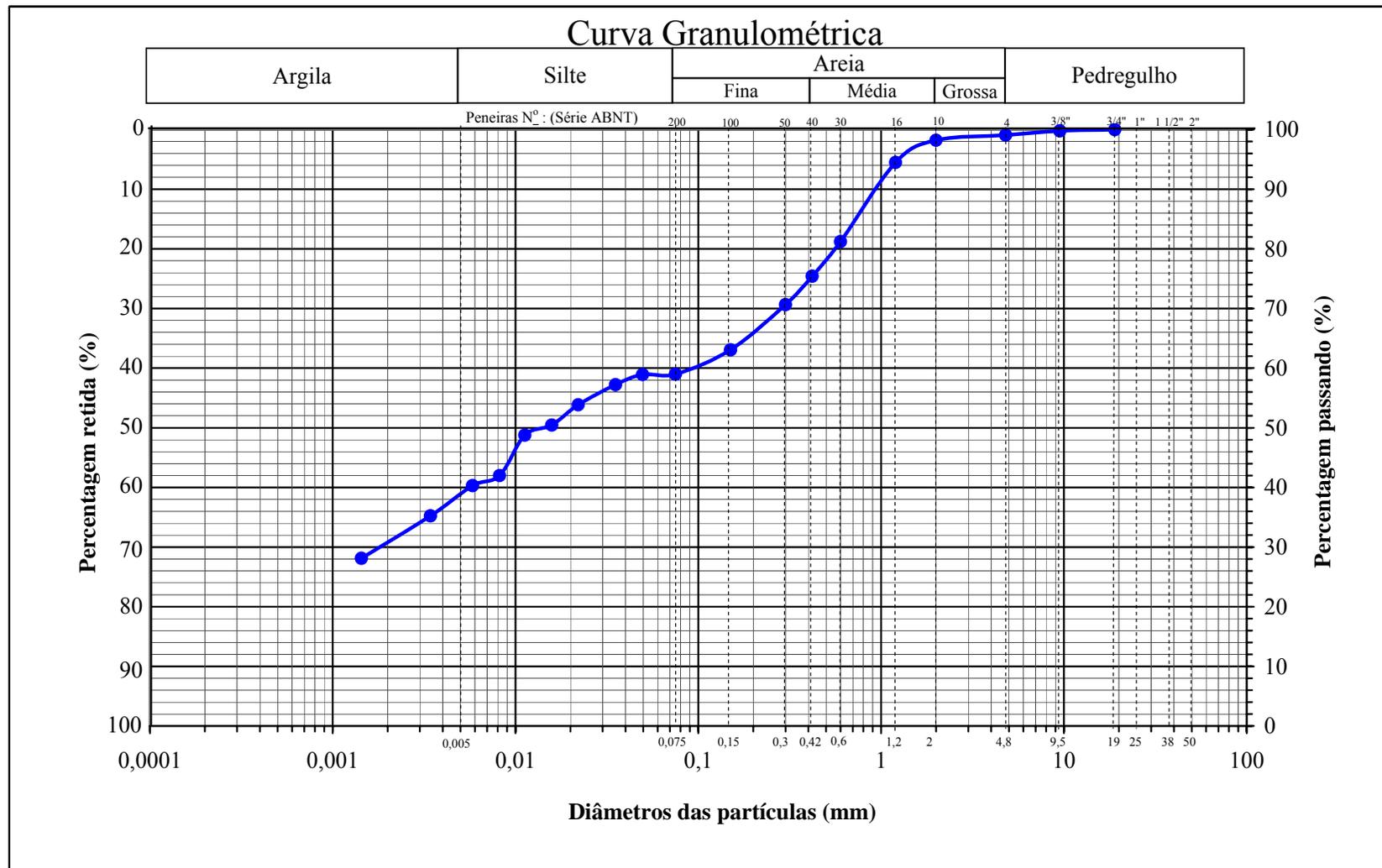
Peneiras		Peso da am. seca (g)		% pas. am. total
N°(ASTM)	mm(ABNT)	Retido	Passando	
2"	50	0,00		100
1 1/2"	38	0,00		100
1"	25	0,00		100
3/4"	19	0,00		100
3/8"	9,5	5,03	2229,08	100
4	4,8	15,60	2213,48	99
10	2	19,30	2194,18	98

PENEIRAMENTO GROSSO (g)

Amostra total úmida	2505,0	Peneiras		Peso da am. seca (g)		% pas. am. parcial	% pas. am. total
		N°	mm	Retido	Passando		
Solo seco retido #10	39,9	16	1,20	3,58	91,05	96,2	94
Solo úmido pas. #10=(A-B)	2465,1	30	0,60	12,80	78,25	82,7	81
Solo seco pas.#10=C/(100+h)	2194,2	40	0,42	5,59	72,66	76,78	75
Amostra total seca =B+D	2234,1	50	0,30	4,59	68,07	71,93	71
PENEIRAMENTO FINO (g)		100	0,15	7,30	60,77	64,22	63
Peso da amostra úmida=PU	106,31	200	0,075	3,93	56,84	60,06	59
Peso am.seca=PU/(100+h)	94,63						

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
24/02/05	10:29	30	29	1037,0	-1,2	35,80	12,41	0,070	61
24/02/05	10:30	60	29	1036,0	-1,2	34,80	12,59	0,050	59
24/02/05	10:31	120	29	1035,0	-1,2	33,80	12,78	0,035	57
24/02/05	10:34	300	29	1033,0	-1,2	31,80	12,43	0,022	54
24/02/05	10:39	600	29	1031,0	-1,2	29,80	12,80	0,016	50
24/02/05	10:49	1200	29	1030,0	-1,2	28,80	12,99	0,011	49
24/02/05	11:09	2400	29	1026,0	-1,2	24,80	13,72	0,008	42
24/02/05	11:49	4800	29	1025,0	-1,2	23,80	13,90	0,006	40
24/02/05	14:29	14400	29	1022,0	-1,2	20,80	14,45	0,003	35
25/02/05	10:40	86280	28,5	1018,0	-1,4	16,60	15,23	0,001	28
Densímetro:		150,980	Gs =	2,584	Proveta N°	19	Área =	29,609	cm ²
Volume:		42,040							



LIMITE DE LIQUIDEZ

PROJETO:	Aterro Sanitário de Rio das Ostras		AMOSTRA:	01
LOCAL:	Rio das Ostras			

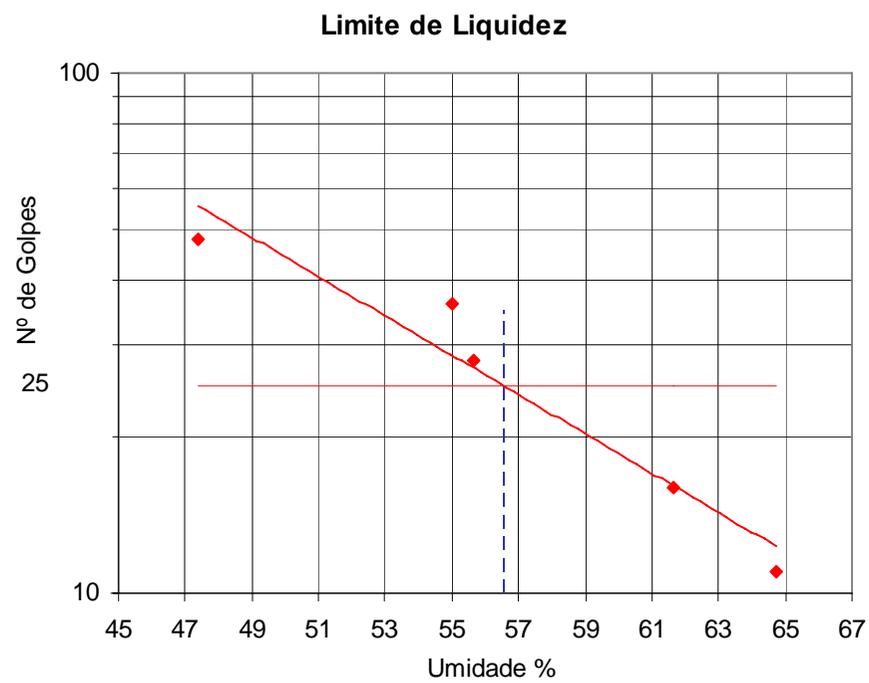
Cápsula N°	Cáp.e Solo Úmido (g)	Cáp. e Solo Seco (g)	Cápsula (g)	Água (g)	Solo Seco (g)	Teor de Umidade (%)	N° de Golpes
442	15,46	13,08	8,06	2,38	5,02	47,41	48
454	15,62	12,28	6,21	3,34	6,07	55,02	36
461	14,53	11,96	7,34	2,57	4,62	55,63	28
478	19,04	14,93	8,26	4,11	6,67	61,62	16
498	18,72	14,33	7,55	4,39	6,78	64,75	11

LIMITE DE PLASTICIDADE

PROJETO:	Aterro Sanitário de Rio das Ostras		AMOSTRA:	01
LOCAL:	Rio das Ostras			

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.(%)
403	11,65	10,40	7,27	1,25	3,13	39,94	39,1
433	8,75	8,10	6,23	0,65	1,87	34,76	
439	10,90	10,20	8,35	0,70	1,85	37,84	
477	12,41	11,23	8,18	1,18	3,05	38,69	
483	14,05	11,97	7,26	2,08	4,71	44,16	

Limite de Liquidez (%)	56,57
Limite de Plasticidade (%)	39,08
Índice de Plasticidade (%)	17,49



DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

PROJETO:	Aterro Sanitário de Rio das Ostras	AMOSTRA:	01
LOCAL:	Rio das Ostras		
DATA DO ENSAIO:	23/02/2005		

Ensaio Nº		1	2	3
Temperatura da água e solo °C	T	29	29	29
Picnômetro No		28	30	31
Picnômetro + solo seco (g)		40,72	44,05	41,51
Picnômetro (g)		29,92	32,41	31,89
Picnômetro + água (g)	Pw	80,66	83,44	82,73
Picnômetro + solo + água (g)	Pws	87,3	90,58	88,63
Solo seco (g)	Ps	10,80	11,64	9,62
Água deslocada $Ps + Pw - Pws$ (g)		4,16	4,50	3,72
Fator de correção	K	0,9977	0,9977	0,9977
Densidade real dos grãos	Gs	2,590	2,581	2,580
$PsK / (Ps + Pw - Pws)$	Média	2,584		

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

PROJETO:	Aterro Sanitário de Rio das Ostras	AMOSTRA:	01
LOCAL:	Rio das Ostras		
DATA DE ENSAIO:	08/03/2005		

Molde N°	52		52		52		52		52	
Água adicionada (g)	830		950		1070		1190		1310	
Am. úmida+molde (g)	8578		8722		8853		8905		8868	
Peso do molde (g)	4689		4689		4689		4689		4689	
Peso am. úmida (g)	3889		4033		4164		4216		4179	
Vol. molde (cm ³)	2151		2151		2151		2151		2151	
Mas.esp.úm.(g/cm ³)	1,808		1,875		1,936		1,960		1,943	
Cápsula N°	502	580	546	599	512	563	544	559	342	572
Am. úmida+tara (g)	83,37	86,54	73,67	75,92	87,99	86,37	81,66	82,13	81,95	95,23
Am. seca+tara (g)	72,60	75,46	63,42	62,82	74,21	73,07	67,91	68,35	68,49	77,96
Tara (g)	12,71	11,26	12,19	12,64	12,44	12,94	11,95	12,05	15,54	12,39
Peso da água (g)	10,77	11,08	10,25	10,10	13,78	13,30	13,75	13,78	13,46	17,27
Peso am.seca (g)	59,89	64,20	51,23	50,18	61,77	60,13	55,96	56,30	52,95	65,57
Umidade (%)	17,98	17,26	20,01	20,13	22,31	22,12	24,57	24,48	25,42	26,34
Umidade média (%)	17,60		20,1		22,2		24,5		25,9	
Mas.esp.sec.(g/cm ³)	1,537		1,562		1,584		1,574		1,543	

Golpes por camada (5 camadas)	12
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1,585
Umidade ótima (%)	22,7

