



MARIANE ALVES DE GODOY LEME

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLO UTILIZADO NO
SISTEMA DE BARREIRA IMPERMEABILIZANTE
DE BASE DE UMA CÉLULA EXPERIMENTAL DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**CAMPINAS
2013**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

MARIANE ALVES DE GODOY LEME

**CARACTERIZAÇÃO DE SOLO UTILIZADO NO
SISTEMA DE BARREIRA IMPERMEABILIZANTE
DE BASE DE UMA CÉLULA EXPERIMENTAL DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Orientadora: Prof^ª Dr^ª MIRIAM GONÇALVES MIGUEL

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO PELA ALUNA
MARIANE ALVES DE GODOY LEME E
ORIENTADA PELA PROFA. DRA. MIRIAM
GONÇALVES MIGUEL.**

Assinatura da orientadora

**CAMPINAS
2013**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizângela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

L542c Leme, Mariane Alves de Godoy, 1988-
Caracterização de solo utilizado no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos / Mariane Alves de Godoy Leme. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Miriam Gonçalves Miguel.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Aterro sanitário. 2. Solos - Compactação. 3. Solos tropicais. 4. Resíduos sólidos. 5. Saneamento. I. Miguel, Miriam Gonçalves, 1970-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Characterization of a soil used as sanitary landfill liner at an experimental cell of municipal solid waste

Palavras-chave em inglês:

Sanitary landfill

Compacted soils

Tropical soils

Municipal solid waste

Environmental sanitation

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Miriam Gonçalves Miguel [Orientador]

Edson Aparecido Abdul Nour

Sueli Yoshinaga Pereira

Data de defesa: 12-12-2013

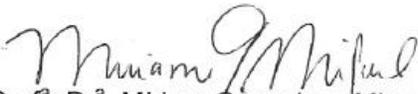
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

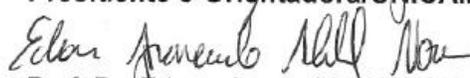
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

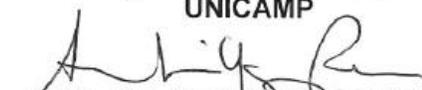
**CARACTERIZAÇÃO DE SOLO UTILIZADO NO SISTEMA DE
BARREIRA IMPERMEABILIZANTE DE BASE DE UMA CÉLULA
EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Mariane Alves de Godoy Leme

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Prof.^a. Dr.^a. Miriam Gonçalves Miguel
Presidente e Orientadora/UNICAMP


Prof. Dr. Edson Aparecido Abdul Nour
UNICAMP


Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira
UNICAMP

Campinas, 12 de Dezembro de 2013

RESUMO

LEME, M. A. G. **Caracterização de Solo Utilizado no Sistema de Barreira Impermeabilizante de Base de uma Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2013. 208 p. Campinas, SP. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2013.

A geração dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma ocorrência diária que deve ser gerenciada. Os aterros sanitários são os empreendimentos para disposição adequada desses resíduos. Dentre os constituintes estruturais dos aterros sanitários, há as barreiras impermeabilizantes de base, que podem ser de vários tipos, sendo as constituídas por solo argiloso compactado amplamente utilizadas. Este trabalho objetivou-se caracterizar o solo utilizado como camada mineral compactada no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de RSU, no Aterro Delta A, em Campinas/SP. As amostras de solo foram coletadas em uma jazida localizada nas proximidades do aterro e caracterizadas por ensaios físicos, químicos, mineralógicos, geotécnicos e papel filtro para determinação das curvas de retenção do solo à água e ao lixiviado. Acompanhou-se a execução da camada mineral compactada em campo, obtendo-se grau de compactação de 100% e desvio de umidade de -3,8%. O solo apresentou resultados potenciais para ser utilizado como camada mineral compactada do sistema de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários, visto sua classificação pelo SUCS como CL, porcentagem de fração de finos maior que 30% e IP entre 10 e 30%, os quais atendem aos valores sugeridos pela literatura como requisitos a proporcionar valores de coeficientes de permeabilidade inferiores a 10^{-9} m/s, exigidos para solos utilizados com esta finalidade. Além da predominância à adsorção de cátions devido seu pH em estado natural encontrar-se acima do valor de Ponto de Carga Zero e sua fração sólida mineral apresentar argilominerais que oferecem propriedades coloidais como afinidade pelo lixiviado e elementos químicos nele dissolvidos. Da análise comparativa das curvas de retenção à água destilada e ao lixiviado, tem-se que o lixiviado provoca uma redução do valor da sucção para a umidade de campo, aumentando o coeficiente de permeabilidade da barreira impermeabilizante de base. Assim, a sucção osmótica foi um fator importante nas diferenças de comportamento dessas curvas.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro sanitário, Solos – Compactação, Solos tropicais, Resíduos sólidos, Saneamento.

ABSTRACT

LEME, M. A. G. **Characterization of a Soil Used as Sanitary Landfill Liner at an Experimental Cell of Municipal Solid Waste.** 2013. 208 p. Campinas, SP. Master's Thesis. Faculty of Civil Engineering, Architecture and Urbanism. State University of Campinas, 2013.

The generation of municipal solid waste (MSW) is a daily occurrence that must be managed. Sanitary landfills are the enterprises for proper disposal of MSW. Among the structural constituents of sanitary landfill, are the liners, which can be made of different kinds, being the compacted clay liner widely used. This study aimed to characterize the soil used as mineral compacted layer at a liner of an experimental cell of MSW, located in Sanitary Landfill called Delta A, in Campinas city, São Paulo, Brazil. Soil samples were collected in a field reservoir located near the sanitary landfill, previously prepared and characterized by physic, chemical, mineralogical, geotechnical and filter paper tests, this latter test to determinate soil water (and leachate too) retention curves. The liner construction in field was followed, obtaining 100% of compaction degree of the soil and gravimetric moisture content of 3.8% below optimum. The soil presented potential to use as mineral compacted layer of sanitary landfill, since it was classified as CL by USCS, fine fraction percentage value greater than 30% and PI value between 10 and 30%, fitting with the values suggested by literature technical, as requirements to provide coefficient permeability values less than 10^{-9} m/s, which are required for soils used as sanitary landfill liners. In addition to the cations adsorption the soil presented predominance because of the natural pH value above the Load Point Zero value and the presence of clay minerals on solid fraction of the soil, showing colloidal properties that offer affinity for leachate and chemical elements dissolved in it. A comparative analysis of the retention curve to distilled water and leachate showed that leachate causes a reduction of the amount of suction at moisture field, increasing the permeability coefficient of the liner for leachate. Thus, the osmotic suction was one of the main factors responsible for the retention curves differences behavior.

KEYWORDS: Sanitary landfill, Compacted soils, Tropical soil, Municipal solid waste, Environmental sanitation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Aterros Sanitários.....	5
3.1.1 Componentes e Funções.....	6
3.2 Barreira Impermeabilizante de Base.....	10
3.2.1 Tipos de Barreiras Impermeabilizantes de Base.....	11
3.2.1.1 Barreiras de Argilas Naturais.....	12
3.2.1.2 Barreiras de Solos Argilosos Compactados.....	12
3.2.1.2.1 Construção de Barreiras de Solos Argilosos Compactados.....	14
3.2.1.3 Barreiras de Material Sintético.....	16
3.3 Células Experimentais de Grandes Dimensões.....	19
3.4 Contaminantes no Solo.....	20
3.5 Solos Não Saturados.....	22
3.5.1 Fases dos Solos Não Saturados.....	24
3.5.1.1 Potenciais do Solo.....	24
3.5.1.2 Sucção do Solo.....	26
3.5.2 Curva de Retenção de Água nos Solos.....	26
3.5.2.1 Determinação das Curvas de Retenção em Laboratório.....	33
3.5.2.1.1 Determinação das Curvas de Retenção pelo Método do Papel Filtro.....	34
3.5.2.2 Influência da Compactação nas Curvas de Retenção do Solo.....	37
3.5.2.3 Influência do Lixiviado nas Curvas de Retenção do Solo.....	42
4 LOCAL DE ESTUDO.....	49
4.1 Sistema Impermeabilizante de Base.....	51
4.2 Sistema de Drenagem do Lixiviado.....	52
4.3 Camada de Resíduo Sólido Urbano (RSU).....	54

4.4 Sistema de Drenagem de Gases	55
4.5 Sistema de Cobertura	56
4.6 Sistema de Drenagem de Água Superficial	56
4.7 Instrumentação e Monitoramento	56
5 METODOLOGIA.....	59
5.1 Concepção da Barreira de Solo Compactado da Célula Experimental.....	59
5.2 Caracterização do Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental.....	61
5.2.1 Ensaio de Caracterização Geotécnica	64
5.2.1.1 Análise Granulométrica	64
5.2.1.2 Determinação da Massa Específica dos Sólidos.....	64
5.2.1.3 Determinação dos Limites de Consistência	64
5.2.1.4 Compactação na Energia Proctor Normal.....	64
5.2.1.5 Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão	65
5.2.2 Ensaio de Caracterização Químico-Mineralógica	67
5.2.2.1 Difração de Raio-X.....	67
5.2.2.2 Fluorescência de Raio-X.....	68
5.2.3 Caracterização Físico-Química	69
5.2.4 Permeabilidade à Carga Variável	71
5.2.5 Curvas de Retenção	72
5.2.6 Porosimetria.....	80
5.2.7 Coeficientes de Permeabilidade Não Saturada.....	81
5.3 Controle de Compactação da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental.....	82
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	83

6.1	Caracterização do Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental.....	83
6.1.1	Caracterização Geotécnica	83
6.1.1.1	Análise Granulométrica	83
6.1.1.2	Massa Específica dos Sólidos	85
6.1.1.3	Limites de Consistência	86
6.1.1.4	Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão	88
6.1.2	Caracterização Químico-Mineralógica.....	99
6.1.3	Caracterização Físico-Química	103
6.2	Controle de Compactação da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental.....	108
6.2.1	Teor de Umidade de Compactação das Camadas de Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental	108
6.2.2	Massa Específica Seca das Camadas de Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental.....	109
6.2.3	Curvas de Compactação (Energia Proctor Normal).....	111
6.2.4	Valores e Resultados de Compactação das Camadas de Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental	112
6.3.	Coeficiente de Permeabilidade Saturada	114
6.4	Curvas de Retenção pelo Método do Papel Filtro	119
6.4.1	Alterações nos Corpos-de-prova da Trajetória de Umedecimento	141
6.4.2	Alterações nos Corpos-de-prova da Trajetória de Secagem	143
6.4.3	Coeficiente de Permeabilidade Não Saturada	145
7	ANÁLISE GERAL.....	151
8	CONCLUSÕES.....	157
9	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	159
	REFERÊNCIAS	161

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu noivo, pelas palavras e gestos de amor, confiança e incentivo em todos os momentos desta minha jornada.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me deu forças e conhecimento nos momentos em que mais precisei, sendo meu eterno guia.

À Prof^a Dr^a Miriam Gonçalves Miguel, pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal. Foi a sua dedicada orientação que me permitiu concluir mais este trabalho.

Aos meus pais, Francisco Carlos Leme e Lucélia Alves de Godoy Leme, por simplesmente serem a razão da minha vida.

Ao meu noivo, José Paulo Diogo Junior, meu eterno amigo, consultor, professor particular, editor de gráficos, técnico de computador e psicólogo.

Ao Julio César Beltrame Benatti, que me ajudou em 99% deste trabalho, mostrando-se um exímio mestre e exemplo de inteligência e companheirismo.

Aos colegas do “Grupo Aterro”, Bruno Cesar Mortatti, Giuliano Gabrielli, Jorge Luiz da Paixão Filho, Julio César Beltrame Benatti e Marcelo Leite Conde Elaiuy, pela amizade, momentos de sabedoria, confiabilidade e alegria.

Às amigas da pós-graduação, Adriana Moreira de Carvalho, Aparecida da Silva dos Santos Carbone (Cida) e Renata Lima Moretto, que sempre me alegraram e confienciaram meus projetos de vida.

Ao Jeferson Felito de Paula, pela disponibilidade, ajuda nos ensaios e amizade.

À minha família, pelos risos, apoio e por serem, cada um na sua particularidade, uma forma de exemplo pessoal e profissional.

Aos Prof. Dr. Edson Aparecido Abdul Nour e Profa. Dra. Eglé Novaes Teixeira, pelo tempo disponibilizado e ensinamentos compartilhados na minha Qualificação.

Ao pessoal dos laboratórios, Reinaldo B. Leite Silva, Ligia Maria Domingues, Fernando Pena Candello, Enelton Fagnani e José Benedito Cipriano, pelo auxílio.

Ao pessoal da secretaria da pós-graduação, especialmente ao Eduardo Estevam da Silva, pela ajuda e paciência em todos os momentos.

Aos colegas e professores internos e externos ao instituto ou instituição, por compartilhar do conhecimento.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.

Meus sinceros agradecimentos, de todo coração.

*“Diante de mim havia duas estradas.
Escolhi a estrada menos percorrida.
E isso fez toda a diferença”.*
(Robert Frost)

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 3.1 – Esquema simplificado das etapas construtivas de um aterro sanitário	9
Figura 3.2 – Ilustração geral de um aterro sanitário, demonstrando a localização otimizada dos setores	10
Figura 3.3 – Ilustração de um GCL (<i>Geosynthetic Clay Liner</i>) utilizado para impermeabilização de base, demonstrando a camada fina de bentonita em pó entre uma camada de geomembrana e uma de geotêxtil	17
Figura 3.4 – Típicos formatos de curvas de retenção do solo influenciados pela granulometria dos solos.....	28
Figura 3.5 – Curvas de retenção do solo, obtidas pelos processos de secagem e umedecimento, ilustrando o fenômeno de <i>histerese</i> e os principais parâmetros que definem os formatos das curvas de retenção (θ_r ou w_r , θ_s ou w_s , e ψ_a)	30
Figura 3.6 – Exemplo de curva de retenção definida pela equação de van Genuchten (1980)	32
Figura 3.7 – Curva de calibração obtida para o papel filtro Whatman n° 42 através de equações de Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992) e os dados de calibração obtidos por Oliveira (2004) para diferentes lotes do Whatman n° 42	36
Figura 3.8 – Curvas de retenção para solos compactados em teores de umidade iniciais diferentes, sob a mesma energia de compactação. O item (a) refere-se aos solos compactados em energia de 25 kPa e o item (b) refere-se aos solos compactados em energia de 100 kPa.....	38
Figura 3.9 – Curvas de retenção para solos compactados em teor de umidade inicial acima (30%) e abaixo (25%) do teor de umidade ótimo	39
Figura 3.10 – Curvas de retenção para solos compactados em energias diferentes e com mesmo teor de umidade inicial.....	39
Figura 3.11 – Relação entre valores de entrada de ar e teores de umidades iniciais de compactação diferentes	40
Figura 3.12 – Relação entre valores de entrada de ar e teores de umidades iniciais diferentes, mostrando-se constante quando próximo à saturação	40
Figura 3.13 – Relação entre valores teor de umidade e sucção matricial (curva de retenção) para solos argilo-siltosos em diferentes condições de compactação.....	41

Figura 3.14 – Típicos formatos de curvas de retenção influenciados pela estrutura dos solos (indeformado ou compactado)	42
Figura 3.15 – Curva de retenção do solo para água e lixiviado em trajetória de secagem, modelado por van Genuchten (1980)	44
Figura 3.16 – Curva de retenção do solo para água e lixiviado em trajetória de secagem, modelado por Brooks e Corey (1964)	44
Figura 3.17 – Curvas de retenção para água, gasolina e lixiviado (chorume), através da trajetória de umedecimento	46
Figura 3.18 – Curvas de retenção para água, 2% de óleo e 4% de óleo misturado ao solo .	48
Figura 4.1 – Mapas de localização do Aterro Sanitário Delta A	49
Figura 4.2 – Localização da célula experimental dentro da área do Aterro Delta A.....	50
Figura 4.3 – Detalhes construtivos da célula experimental, no Aterro Delta A: (a) Camada de solo compactado e parte do talude lateral da célula; (b) Geomembrana instalada sobre a camada de solo compactado; (c) Geotêxtil instalado acima da camada de geomembrana e (d) Camada de solo de proteção sendo depositado acima do geotêxtil	52
Figura 4.4 – Detalhe construtivo da célula experimental, no Aterro Delta A: Canaleta de drenagem de lixiviado	53
Figura 4.5 – Detalhes construtivos da célula experimental, no Aterro Delta A: (a) Colchão drenante e (b) Detalhe do material “rachão”	53
Figura 4.6 – Detalhes construtivos da célula experimental, no Aterro Delta A: (a) Sistema de medição de líquidos lixiviados, ligado à canaleta de drenagem, na saída (externo) à célula; (b) Detalhe da caixa externa.....	54
Figura 4.7 – Disposição de RSU na célula experimental: (a) Chegada e disposição dos resíduos na célula, sobre o colchão drenante e equipamento (trator esteira D6-N) efetuando compactação sobre camada de resíduos e (b) Célula preenchida com resíduos.....	55
Figura 4.8 – Drenagem dos gases na célula experimental: (a) Estrutura do tubo dreno de concreto perfurado; (b) Estrutura de tubo dreno de concreto envolto em armação de arame preenchida com rachão e (c) Drenos distribuídos pela célula antes da disposição de resíduos	55
Figura 4.9 – Sistema de cobertura da célula experimental: (a) Camada de solo e (b) Camada de solo vegetal que recebeu plantio de grama.....	56

- Figura 5.1 – Detalhes da concepção da barreira de solo compactado do sistema impermeabilizante de base da célula experimental: (a) Equipamento compactando as camadas de solo; (b) Detalhe do rolo “pé-de-carneiro”; (c) Detalhe do solo logo após compactação por rolo “pé-de-carneiro” e (d) Detalhe da camada de solo livre de irregularidades do terreno..... 59
- Figura 5.2 – Detalhes dos ensaios de campo (“in situ”) para medição de dados de compactação da barreira de base da célula experimental: (a) Frasco de areia e (b) Equipamento “*Speedy Moisture*” 60
- Figura 5.3 – Croqui geral do sistema impermeabilizante de base da célula experimental (antes da colocação do RSU) com indicação dos pontos de coleta de amostras para ensaio de laboratório 61
- Figura 5.4 – Amostras de solo coletadas dos três horizontes da jazida: Base, Intermediário e Topo, respectivamente 62
- Figura 5.5 – Horizontes do solo exposto no talude da Jazida que forneceu material para concepção da camada de solo compactado da barreira impermeabilizante de base da célula experimental – Sem escala..... 63
- Figura 5.6 – Gráfico da classificação MCT..... 66
- Figura 5.7 – Detalhes das etapas dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão: (a) Amostras de solo preparadas e homogêneas em distintos teores de umidade; (b) Equipamento compactador; (c) Equipamento extensômetro (0,01 mm) usado para medição da altura An dos corpos-de-prova e (d) corpos-de-prova em fase final de ensaio de perda de massa por imersão 67
- Figura 5.8 – Geomanta utilizada em ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade saturada: (a) Geomanta cortada em dimensões a caber dentro do cilindro utilizado no ensaio e (b) Geomanta já dentro do cilindro sobre o corpo-de-prova 72
- Figura 5.9 – Corpos-de-prova submetidos à saturação ao lixiviado da célula experimental 73
- Figura 5.10 – Umedecimento com lixiviado das superfícies secas dos corpos-de-prova submetidos ao processo de secagem para obtenção das curvas de retenção... 74

Figura 5.11 – Detalhes do procedimento inicial do ensaio de papel filtro (curva de retenção) à água destilada: (a) Pesagem do conjunto anel e solo; (b) Locação de ¼ (um quarto) de papel filtro Whatmann ^o 42 sobre contato direto em um dos lados do corpo-de-prova; (c) Embrulho do conjunto anel, solo e papel filtro em filme plástico PVC transparente; (d) Emprego de uma sobrecarga sobre o papel filtro; (e) Embrulho com papel alumínio; (f) Conjunto inserido dentro de um saco plástico fechado do tipo Ziploc; (g) Armazenamento dentro de uma caixa plástica e (h) Caixa plástica vedada	75
Figura 5.12 – Detalhes do procedimento inicial do ensaio de papel filtro (curva de retenção) ao lixiviado: (a) Tela de material inerte cortada nas dimensões necessárias e (b) Locação de ¼ (um quarto) de papel filtro Whatmann ^o 42 sobre tela inerte em contato indireto com um dos lados do corpo-de-prova...	76
Figura 5.13 – Adição de fluido (água destilada ou lixiviado) no solo: (a) Adição das gotas no corpo-de-prova, com auxílio do conta-gotas e (b) Corpos-de-prova com as gotas adicionadas à superfície	78
Figura 5.14 – Procedimentos de secagem dos corpos-de-prova: (a) Corpos-de-prova secando sob calor do sol e (b) Corpos-de-prova secando em estufa de solos (100°C)	79
Figura 6.1 – Curvas granulométricas das amostras dos solos com o uso de defloculante (CD) e sem o uso de defloculante (SD).....	84
Figura 6.2 – Carta de plasticidade do Sistema Unificado de Classificação dos Solos e a classificação das amostras de solo B, I, T e M.....	87
Figura 6.3 – Curva Mini-MCV para amostra de solo Base	89
Figura 6.4 – Curva Mini-MCV para amostra de solo Intermediário	89
Figura 6.5 – Curva Mini-MCV para amostra de solo Topo	90
Figura 6.6 – Curva Mini-MCV para amostra de solo Mistura	90
Figura 6.7 – Curva de Compactação para amostra de solo Base.....	91
Figura 6.8 – Curva de Compactação para amostra de solo Intermediário.....	91
Figura 6.9 – Curva de Compactação para amostra de solo Topo	92
Figura 6.10 – Curva de Compactação para amostra de solo Mistura	92
Figura 6.11 – Curva de Perda de Massa por Imersão para amostra de solo Base	93

Figura 6.12 – Curva de Perda de Massa por Imersão para amostra de solo Intermediário .	93
Figura 6.13 – Curva de Perda de Massa por Imersão para amostra de solo Topo	94
Figura 6.14 – Curva de Perda de Massa por Imersão para amostra de solo Mistura	94
Figura 6.15 – Posição das amostras na Carta de Classificação MCT.....	96
Figura 6.16 – Dados empíricos do ensaio de determinação do ponto de carga zero do solo M	106
Figura 6.17 – Curvas de compactação dos solos B, I, T e M, realizadas em energia Proctor Normal.....	111
Figura 6.18 – Curvas de retenção das trajetórias de secagem e umedecimento à água destilada, plotadas por dados empíricos e por ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980).....	122
Figura 6.19 – Curvas de retenção das trajetórias de secagem e umedecimento ao lixiviado, plotadas por dados empíricos e por ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980)	123
Figura 6.20 – Distribuição percentual dos poros dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de curva de retenção e um corpo-de-prova controle	130
Figura 6.21 – Logaritmo diferencial de volume de mercúrio introduzido nas amostras <i>versus</i> diâmetro dos poros dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de curva de retenção e um corpo-de-prova controle	130
Figura 6.22 – Sequência de aparecimento de micro-organismos na superfície dos corpos-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de umedecimento ao lixiviado: (a) aparecimento dos micro-organismos, (b) aumento dos micro-organismos, (c) camada de micro-organismos e (d) gotas de lixiviado sobre a camada de micro-organismos, tornando o solo menos permeável	138
Figura 6.23 – Microorganismos na superfície dos corpos-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de secagem ao lixiviado	139
Figura 6.24 – Mudança de coloração e microorganismos na superfície do papel filtro que ficava em contato indireto com o solo no ensaio de papel filtro (curva de retenção) ao lixiviado, na trajetória de umedecimento	140

- Figura 6.25 – Corpo-de-prova inicial do ensaio de papel filtro (curva de retenção), tanto pela água, quanto pelo lixiviado, apresentando contração do solo dentro do anel metálico após 5 dias exposto à secagem em temperatura ambiente (Trajetória de Umedecimento) 141
- Figura 6.26 – Expansão do solo na semana 19^a nos corpos-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de umedecimento à água 142
- Figura 6.27 – Contração do solo do corpo-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de umedecimento após secagem em estufa para aquisição de massa seca 142
- Figura 6.28 – Diferença de coloração inicial e final no corpo-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de umedecimento à água destilada, devido às reações químicas das moléculas de água com os componentes mineralógicos do solo..... 143
- Figura 6.29 – Expansão do solo dentro do anel metálico do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de secagem para início de ensaio: (a) ensaio à água e (b) ensaio ao lixiviado 144
- Figura 6.30 – Contração do solo dentro do anel do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de secagem, aproximadamente na 11^a semana dos ensaios 144
- Figura 6.31 – Contração do solo do corpo-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de secagem após estufa para aquisição de massa seca 145
- Figura 6.32 – Curvas de coeficiente de permeabilidades não saturada *versus* sucção, à água e ao lixiviado 145
- Figura 6.33 – Curvas de coeficiente de permeabilidades não saturada *versus* teor de umidade gravimétrico, à água e ao lixiviado..... 146

LISTA DE TABELAS

	PÁG.
Tabela 3.1 – Principais equações matemáticas discutidas na literatura para expressar as curvas de retenção do solo	31
Tabela 3.2 – Técnicas de medição de sucção (obtenção de dados para a curva de retenção)	34
Tabela 3.3 – Resultados de dados experimentais (valores de sucção matricial e respectivo teor de umidade volumétrica) do solo em trajetória de secagem	43
Tabela 3.4 – Valores de teor de umidade volumétrica saturada (θ_{sat}) e umidade volumétrica residual (θ_r) das curvas de retenção para quantidades de 2% e 4% de óleo mineral.....	48
Tabela 5.1 – Quantidade de solo, HCl, NaOH, CaCl ₂ e água destilada em cada recipiente do ensaio de determinação do ponto de carga zero do solo M	70
Tabela 6.1 – Valores das frações granulométricas dos solos, com o uso de defloculante (CD) e sem o uso de defloculante (SD).....	84
Tabela 6.2 – Valores de massa específica dos sólidos das amostras de solo B, I, T e M.....	86
Tabela 6.3 – Valores dos limites de consistência das amostras de solo B, I, T e M	86
Tabela 6.4 – Resultados obtidos em ensaios de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão e Classificação MCT das amostras estudadas.....	96
Tabela 6.5 – Principais minerais constituintes das amostras de solo B, I, T e M.....	100
Tabela 6.6 – Porcentagem dos principais compostos químicos presentes nas amostras de solo B, I, T e M	101
Tabela 6.7 – Resultados de pH, saturação em bases (Sb) e soma de bases (S) dos solos B, I, T e M.....	103
Tabela 6.8 – Valores de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) das amostras de solo B, I, T e M e porcentagens de seus referidos complexos adsorventes	103
Tabela 6.9 – Valores dos macronutrientes carbono (C), fósforo (P), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) e relação cálcio/magnésio (Ca/Mg) dos solos B, I, T e M.....	105
Tabela 6.10 – Dados de pH _{0,002} e pH _{00,ti} obtidos do ensaio de determinação do ponto de carga zero do solo M.	107

Tabela 6.11 – Médias e desvios padrões dos valores de teor de umidade (w) dos 12 pontos amostrados de cada camada compactada (1 ^a , 2 ^a e 3 ^a camada) e as médias e desvios padrões das 3 camadas que compõem a barreira de solo compactado da barreira impermeabilizante de base da célula experimental.....	108
Tabela 6.12 – Médias e desvios padrões dos valores de massa específica seca (γ_d) dos 12 pontos amostrados de cada camada compactada (1 ^a , 2 ^a e 3 ^a camada) e as médias e desvios padrões das 3 camadas que compõem a barreira de solo compactado da barreira impermeabilizante de base da célula experimental	110
Tabela 6.13 – Valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo obtidos em ensaio de compactação (energia Proctor Normal) para os solos B, I, T e M	111
Tabela 6.14 – Valores de graus de compactação das 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a camadas de solo da barreira impermeabilizante de base da célula experimental, utilizando a média de valores de massa específica seca (γ_d) de cada uma das camadas e os valores de massa específica seca máxima dos solos B, I, T e M obtidas nas curvas de compactação	112
Tabela 6.15 – Valores de desvio de umidade da compactação das 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a camadas de solo da barreira impermeabilizante de base da célula experimental, utilizando a média de valores de teor de umidade (w) de cada uma das camadas e os valores de teor de umidade ótimo dos solos B, I, T e M obtidos nas curvas de compactação	113
Tabela 6.16 – Parâmetros dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios à água destilada e ao lixiviado para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada do solo M compactado nas mesmas condições da barreira impermeabilizante de base da célula experimental.....	114
Tabela 6.17 – Resultados do ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada à água destilada.....	116
Tabela 6.18 – Resultados do ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada ao lixiviado.....	116
Tabela 6.19 – Caracterização físico-química do lixiviado utilizado no ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada do solo ao lixiviado	117
Tabela 6.20 – Características iniciais dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de papel filtro (curva de retenção) do solo à água destilada, por trajetória de secagem e umedecimento	119

Tabela 6.21 – Características iniciais dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de papel filtro (curva de retenção) do solo ao lixiviado, por trajetória de secagem e umedecimento	120
Tabela 6.22 – Caracterização físico-química dos lixiviados utilizados no ensaio de papel filtro para determinação das curvas de retenção do solo ao lixiviado (semanas 1 a 7) – Trajetória de Umedecimento ao Lixiviado	121
Tabela 6.23 – Caracterização físico-química dos lixiviados utilizados no ensaio de papel filtro para determinação das curvas de retenção do solo ao lixiviado (semanas 8 a 13) – Trajetória de Umedecimento ao Lixiviado	121
Tabela 6.24 – Caracterização físico-química dos lixiviados utilizados no ensaio de papel filtro para determinação das curvas de retenção do solo ao lixiviado – Trajetória de Secagem ao Lixiviado.....	122
Tabela 6.25 – Análise comparativa dos dados experimentais – Trajetória Secagem.....	127
Tabela 6.26 – Análise comparativa dos dados experimentais – Trajetória Umedecimento	128
Tabela 6.27 – Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) de ajuste das curvas de retenção à água destilada para os corpos-de-prova à trajetória de secagem e umedecimento	136
Tabela 6.28 – Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) de ajuste das curvas de retenção ao lixiviado para os corpos-de-prova à trajetória de secagem e umedecimento	136
Tabela 6.29 – Valores de coeficiente de permeabilidade não saturada e sucção, correspondentes ao teor de umidade de campo (16,4%).....	148
Tabela 7.1 – Classificações texturais, SUCS e MCT e os valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo (curvas de compactação) das amostras de solo B, I, T e M	151
Tabela 7.2 – Principais resultados das caracterizações químico-mineralógica e físico-química para as amostras de solo B, I, T e M e o valor do Ponto de Carga Zero para o solo M.....	152
Tabela 7.3 – Valores dos coeficientes de permeabilidade saturada e os coeficientes de permeabilidade não saturada referente ao teor de umidade de campo (w=16,4%) à água e ao lixiviado, para o solo M.....	152

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

a – Área interna da bureta de vidro [cm²]

A – Área inicial do corpo-de-prova [cm²]

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

An – Altura do corpo de prova do ensaio de Mini-MCV

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Ensaios e Materiais)

atm – Atmosfera (unidade de pressão)

B – Horizonte da jazida denominado por Base (horizonte mais próximo da superfície)

bar – Bar (unidade de pressão)

CaCl₂ – Cloreto de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

CEMPRE – Compromisso Empresarial Para a Reciclagem

CEPIS – Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (Centro para Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais)

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH – Argila de alta compressibilidade

C_k – Relação entre a massa específica da água na temperatura de ensaio e a massa específica da água a 20°C

CL – Argila de baixa compressibilidade

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

Cu – Cobre

c' – Coeficiente angular da reta de deformação referente ao Mini-MCV

D – Diâmetro dos grãos do solo [mm]

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DRX – Difração de Raio-X

d' – Coeficiente relativo à inclinação do ramo seco da curva de compactação obtida pelo método Mini-MCV

e – Índice de vazios do solo [adimensional]

EPA – Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental)

e' – Índice de classificação Mini-MCV

FEPASA – Ferrovia Paulista S.A.

Fe₂O₃ – Óxido de ferro ou Hematita

FRX – Fluorescência de Raio-X

GC – Grau de Compactação [%]

GCL – Geosynthetic Clay Liner

HCl = Ácido clorídrico

h_i – Carga hidráulica inicial no ensaio de permeabilidade à carga variável [cm]

h_f – Carga hidráulica final no ensaio de permeabilidade à carga variável [cm]

H₂O – Água

I – Horizonte da jazida denominado por Intermediário

IP – Índice de Plasticidade do solo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

k – Coeficiente de permeabilidade saturada do solo [m/s]

K – Potássio

k_t – Coeficiente de permeabilidade saturada do solo na temperatura da água durante o ensaio [m/s]

kPa – Quilopascal (unidade de pressão)

k₂₀ – Coeficiente de permeabilidade saturada do solo referido à água na temperatura de 20°C [m/s]

K₂O – Óxido de potássio

L – Comportamento Laterítico

LA' – Solo Arenoso Laterítico

LiB₄O₇ – Tetraborato de lítio

LG' – Solo Argiloso Laterítico

LL – Limite de Liquidez do solo

LMSE – Laboratório de Solos e Estradas “Luiz Eduardo Meyer”

LP – Limite de Plasticidade do solo

m – parâmetro responsável pela rotação da porção inclinada da curva de retenção. Está relacionado à assimetria da curva (equação de van Genuchten, 1980)

M – Mistura de solos dos horizontes B, I e T da jazida

MCT – Miniatura, Compactado, Tropical

MCV – Moisture Condition Value

Mg – Massa de uma gota [g]

MgO – Óxido de magnésio

MnO – Óxido de manganês

M_{sol} – Massa de sólidos do solo [g]

M_s – Massa do corpo-de-prova seco [g]

mS – milisiemens (medida de condutividade elétrica)

MPa – Megapascal (unidade de pressão)

M_w – Massa de água presente no solo [g]

M_{2%} – Massa correspondente 2% de umidade do corpo-de-prova, nos ensaios de curva de retenção (trajetória de umedecimento) [g]

n – parâmetro que controla a inclinação da curva de retenção. Está relacionado com a distribuição do tamanho dos poros (equação de van Genuchten, 1980)

ng – número de golpes no Ensaio de Mini-MCV

n_{gotas} – número de gotas correspondente ao aumento de 2% de umidade do corpo-de-prova, nos ensaios de curva de retenção (trajetória de umedecimento)

n_t – Porosidade do solo [m³/m³]

N – Comportamento Não Laterítico

NaO₂ – Óxido de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

NA' – Solo Arenoso Não Laterítico

NBR – Norma Brasileira

Ni – Níquel

ng – Número de gotas correspondente ao aumento de 2% de umidade do corpo-de-prova [g]

NG' – Solo Argiloso Não Laterítico

OH – Solo orgânico de alta compressibilidade

Pa – Pascal (unidade de pressão)

PAHO – Pan American Health Organization

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PCZ – Ponto de Carga Zero do solo

pH – Potencial hidrogeniônico

pH_{PCZ} – valor de pH referente ao valor de ponto de carga zero do solo

pH_{0,01} – valor de pH da solução CaCl₂ 0,1M + CaCl₂ 2,0M + HCl 0,1M ou NaOH 0,1M em contato com a amostra de solo

pH_{0,002} – valor de pH da solução CaCl₂ 0,1M + HCl 0,1M ou NaOH 0,1M em contato com a amostra de solo

Pi – Coeficiente que caracteriza a perda de massa por imersão, na classificação MCT

PMC – Prefeitura Municipal de Campinas

psi – unidade de pressão

Pt-Au (99,5%) – Liga de platina

P₂O₅ – Pentóxido de fósforo

R_d – Fator de retardamento

RSU – Resíduo(s) Sólido(s) Urbano(s)

s – coeficiente de sorção

S – Soma de bases

Sb – Saturação em bases

SC – Areia argilosa

Si-Al-Fe-Mg-O – Montmorillonita

SiO₂ – Óxido de silício ou Quartzo

SMP – Shoemaker, Mac lean e Pratt

SNSA – Secretaria Nacional de Saneamento Básico

Sr – Grau de saturação [%]

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos

T – Horizonte da jazida denominado por Topo (horizonte mais distante da superfície)

Temp – Temperatura [°C]

TiO₂ – Óxido de titânio

TECAM – Grupo Tecnologia Ambiental

u – Velocidade específica ou de fluxo da água [m/s]

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UNESP – Universidade Estadual de São Paulo

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UNITHAL – Tecnologia e Comércio de Produtos Agropecuários Ltda

USEPA – United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

v – Velocidade de percolação [m/s]

V – Volume total do solo [cm³]

V_w – Volume de água presente no solo [cm³]

w – Teor de umidade gravimétrico [g/g ou %]

w_{médio} – Teor de umidade gravimétrico médio [g/g ou %]

w_{ótimo} – Teor de umidade gravimétrico ótimo [%]

w_{pf} – Teor de umidade gravimétrico do papel filtro [%]

w_r – Teor de umidade gravimétrica residual [g/g ou %]

w_s – Teor de umidade gravimétrica em condições saturadas [g/g ou %]

α – parâmetro de otimização, é inversamente relacionado ao valor da sucção de entrada de ar (equação de van Genuchten, 1980)

γ – Massa específica natural do solo ou massa específica do solo [g/cm³]

γ_d – Massa específica seca do solo [g/cm³]

$\gamma_{d\text{ máx}}$ – Massa específica seca máxima [g/cm³]

$\gamma_{d\text{ média}}$ – Massa específica seca de campo média [g/cm³]

γ_{nat} – Massa específica natural do solo ou massa específica do solo [g/cm³]

γ_s – massa específica dos sólidos [g/cm³]

γ_w – Massa específica da água [g/cm³]

ΔpH – Diferença do valor do pH_{00,ti} e pH_{0,002}

Δt – Diferença entre os instantes t_2 e t_1 [T]

Δw – Desvio de Umidade (diferença de erro de teor de umidade medida em campo e em laboratório) [%]

θ – Teor de umidade volumétrico [cm³/cm³]

θ_r – Teor de umidade volumétrica residual [cm³/cm³]

θ_s – Teor de umidade volumétrico em condições saturadas [cm³/cm³]

μm – Micrômetro (unidade de medida)

ψ – Sucção do solo [kPa]

ψ_a – Valor de entrada de ar [kPa] para a curva em trajetória de secagem

ψ_g – Energia Potencial Gravitacional

ψ_m – Energia Potencial Matricial

ψ_{os} – Energia Potencial Osmótica

ψ_p – Energia Potencial de Pressão

1 INTRODUÇÃO

A geração dos resíduos sólidos urbanos é uma ocorrência diária que deve ser gerenciada em razão dos prejuízos socioambientais que derivam dessa atividade. Faz-se então necessária a destinação correta desses resíduos, requerendo um elevado custo tecnológico e econômico para os municípios. Uma das formas que mostram mais adequadas para a disposição desses resíduos são os aterros sanitários, os quais são obras que utilizam de princípios de engenharia para otimizar o confinamento e os fatores operacionais diários que emanam dele.

Dentre todos os aspectos que devem ser conferidos em um aterro sanitário, desde o preparo da área e construção até sua operação e monitoramento, ressalta-se o sistema de impermeabilização de base. O sistema impermeabilizante de base tem a finalidade de fornecer proteção ao ambiente contra a contaminação pelos líquidos gerados dos resíduos dispostos, denominados por chorume ou lixiviados, potenciais de atingir solos, águas subterrâneas e de superfície adjacentes ao local de disposição.

A composição do sistema impermeabilizante de base pode dar-se por materiais naturais ou sintéticos, sendo influenciado pelas características dos resíduos e da área de contorno, como as condições climáticas e geológicas (PIEDADE JÚNIOR, 2003). O desempenho satisfatório dessas obras de engenharia dá-se em maior parte pela compatibilidade com o lixiviado gerado durante toda a vida do aterro, fornecendo propriedades de durabilidade, e aos baixos valores de coeficientes de permeabilidade (inferior a 10^{-9} m/s), característico de materiais de estanque.

Os recursos artificiais utilizados nas barreiras de base provêm de materiais geossintéticos, desenvolvidos industrialmente com o propósito para utilização em obras geotécnicas. Já os principais instrumentos naturais são os solos que apresentam naturalmente baixos coeficientes de permeabilidade ou materiais minerais compactados, com a finalidade de atingir esses baixos valores de permeabilidade, como as argilas, argilas siltosas e siltes argilosos, quando isentos de fissuras ou trincas.

Embora os mecanismos artificiais demonstrem funcionalidade e praticidade, são considerados custosos e muitas vezes excedem o orçamento municipal, logo os meios naturais de impermeabilização de base de aterros sanitários comprovam-se como vantajosos em questão de

custo-benefício. No entanto, os materiais naturais para funcionalidade de uso em sistema impermeabilizante de base devem ter suas características intrínsecas (geológicas) e/ou de compactação cuidadosamente analisadas, de modo a assegurar as funcionalidades da barreira. Faz-se necessário também que a demanda de materiais naturais esteja localizada relativamente próximo ao local da concepção do sistema de impermeabilização de base, visto que o custo de transporte de material natural adequado pode-se tornar inviável à obra.

Diante do exposto sobre o uso de materiais naturais em sistema impermeabilizante de base, torna-se importante realizar estudos científicos para caracterização de solos localizados nas proximidades de aterros sanitários a fim de avaliar suas propriedades como barreira impermeabilizante de base, em especial ao município de Campinas/SP, no qual há uma jazida de solo localizada dentro da área de seu próprio aterro, o Aterro Sanitário Delta A.

Dessa maneira, pode-se gerar ponderações sobre o uso de solo (material natural) para concepção de sistemas impermeabilizantes de base de aterros sanitários da região, visando melhorias ambientais, além de redução de custos.

2 OBJETIVOS

Pretendeu-se com essa pesquisa realizar a caracterização de um solo utilizado como camada compactada mineral no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos (RSU), localizada no Aterro Delta A, do município de Campinas/SP.

Desse modo, procurou-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar a caracterização geotécnica do solo e classificá-lo de acordo com as classificações geotécnicas tradicionais e com a classificação MCT;
- b) Realizar e analisar a caracterização físico-química do solo;
- c) Realizar e analisar a caracterização químico-mineralógica do solo;
- d) Obter e analisar as curvas de retenção à água e ao lixiviado do solo, a fim de verificá-las e compará-las;
- e) Obter e analisar os coeficientes de permeabilidade saturada do solo à água e ao lixiviado;
- f) Obter e analisar as curvas de permeabilidade não saturada à água e ao lixiviado do solo;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aterros Sanitários

A CETESB (2013) define aterro sanitário como uma obra de engenharia que tem por objetivo acomodar, no solo, resíduo no menor espaço prático possível, gerando assim reduzidos danos ao ambiente e à saúde pública.

Aterro sanitário tem sido o método mais econômico e ambientalmente aceitável para a disposição de resíduo sólido em qualquer país do mundo (IWAI, 2005). Segundo Iwai (2005), mesmo com o implemento de tecnologias de redução, reciclagem e transformação de resíduo, a disposição final de resíduo sólido em aterro sanitário permanece como um componente importante no manejo integrado do resíduo sólido.

As desvantagens do aterro sanitário são pelo fato deste ser uma obra que ocupa áreas relativamente grandes, requerem alto custo de operação e é uma alternativa de apenas disposição de resíduo, ausente de ações de possíveis tratamentos e reciclagem do material ali depositado.

No entanto, segundo a CETESB (2013), não se pode desprezar a realidade dos países em desenvolvimento, como o Brasil, que atualmente é um país com elevada escassez técnica nos setores de coleta seletiva, reciclagem e principalmente, mercado aos produtos reciclados. Desta forma, o aterro sanitário não deve ser considerado como uma obra prejudicial ou como uma técnica ultrapassada dentro dos processos de proteção ambiental, mas como a solução atualmente empregada para o descarte de resíduo no solo.

O princípio do aterro sanitário é controlar a migração de contaminantes para o ambiente através da contenção do resíduo. Logo, os elementos estruturais são projetados com a finalidade de evitar emissões poluentes não permitidas (BOSCOV, 2008).

A técnica empregada em um aterro sanitário consiste basicamente na compactação do resíduo no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com solo ou outro material inerte. Ainda que, sendo o método sanitário mais simples de destinação final de resíduos

sólidos urbanos, o aterro sanitário exige cuidados especiais e técnicas específicas a serem seguidas, desde a seleção e preparo da área até sua operação e monitoramento (CETESB, 2013).

O aterro sanitário deve constituir-se, fundamentalmente, de sistemas de: drenagem superficial, drenagem e tratamento de lixiviados, impermeabilização inferior (de base) e superior e de drenagem e tratamento de gases (PESSIN et al., 2002).

3.1.1 Componentes e Funções

O aterro sanitário deve operar de modo a fornecer proteção ao ambiente, evitando, por exemplo, a contaminação da água subterrânea pelo lixiviado (líquido de elevado potencial poluidor, de cor escura e de odor desagradável, gerado do resíduo disposto) e evitando o acúmulo do biogás resultante da decomposição anaeróbia do resíduo no interior do aterro. O biogás pode atravessar o interior do aterro de forma descontrolada ou infiltrar pelo solo e atingir redes de esgotos, fossas e poços rasos podendo causar explosões (CETESB, 2013).

Fundamentando-se na NBR 8419 (ABNT, 1992) e NBR 13896 (ABNT, 1997), pode-se estabelecer os componentes necessários para a construção de um aterro sanitário.

Para assegurar o projeto, instalação e operação adequadas de um aterro de resíduo não perigoso são estabelecidas exigências relativas à localização, segregação e análise de resíduo, monitoramento, inspeção, fechamento da instalação e treinamento de pessoal (ABNT, 1997).

Agências ambientais responsáveis pelo desenvolvimento de manuais de instalação, operação e monitoramento de aterro sanitário de diversos países têm mostrado semelhanças aos fundamentos impostos para aterro sanitário no Brasil. Países estes, exemplificando, como os localizados na América Latina (CEPIS/PAHO, 2003), América do Norte (USEPA, 1993) e Europa (EPA, 2000).

Basicamente, o aterro sanitário deve compreender:

• Sistema de impermeabilização de base

O Sistema de impermeabilização de base evita o contato do lixiviado com o ambiente (solo, água subterrânea e de superfície), através de ações de controle da migração do contaminante para esses meios. O sistema de revestimento selecionado deve compreender desempenho satisfatório e ser compatível com o lixiviado gerado durante toda a vida do aterro em questão (EPA, 2000).

A impermeabilização de base pode ser composta por argila e/ou geomembranas sintéticas (CETESB, 2013);

• Sistema de cobertura

Tem por propósito a minimização da infiltração de água pluvial, que resulta no aumento do volume do lixiviado, bem como evitar o vazamento dos gases gerados na degradação da matéria orgânica para a atmosfera. Este sistema de cobertura, geralmente, tem no mínimo 60 cm de espessura de solo argiloso compactado e é executada quando o aterro atingir sua conformação geométrica final (SNSA, 2008).

Os materiais empregados no sistema de cobertura devem ser resistentes a processos erosivos e possuir características de fertilidade adequadas ao estabelecimento de vegetação (SNSA, 2008);

• Sistema de drenagem de água superficial

O sistema de captação e drenagem de água superficial tem por função coletar a água superficial (chuva) da região de operação do aterro e arredores e direcioná-la aos drenos localizados em porção periférica a este. Os canais de drenagem devem estar localizados de modo que a água de escoamento superficial seja interceptada e desviada antes de atingir os resíduos (EPA, 2000).

Segundo a CETESB (2013), o sistema de captação e drenagem de água superficial visa drenar a água por locais apropriados para evitar a infiltração na massa de resíduos, a qual gera o lixiviado;

• Sistema de drenagem, remoção e tratamento do lixiviado

As funções primárias do sistema de drenagem do lixiviado são coletar e transportar o lixiviado para fora da unidade de disposição de resíduo com o propósito de controlar a altura da camada de lixiviado acima da barreira de base, prevenindo o alojamento de elevadas cargas hidráulicas (USEPA, 1993).

A coleta do lixiviado deve ser feita pela base do aterro. O lixiviado coletado é enviado a lagoas previamente preparadas com impermeabilização do seu contorno ou enviados para tanques de armazenamento fechados (CETESB, 2013).

Após coletado e armazenado em local apropriado, o lixiviado deve ser tratado antes de ser descartado no curso de um rio ou em uma lagoa. O tratamento pode ser feito no próprio local ou o lixiviado coletado pode ser transportado para um local apropriado (geralmente uma Estação de Tratamento de Esgotos). Os tipos de tratamento convencionais são o tratamento biológico (lagoas anaeróbias, aeróbias e lagoas de estabilização), tratamento por oxidação (evaporação e queima) ou tratamento químico (adição de substâncias químicas ao lixiviado) (CETESB, 2013);

• Sistema de drenagem de gás

A formação de gases em aterro deve-se, em geral, à decomposição da matéria orgânica em meio anaeróbio, gerando principalmente gás carbônico e metano (CETESB, 1993).

O sistema de drenagem de gás é empregado para evitar a migração dos gases através dos meios porosos que constituem o subsolo (IPT/CEMPRE, 2000).

É o canal de saída do gás do interior do aterro. Os drenos podem ser construídos de concreto ou material Polietileno de Alta Densidade (PEAD), podendo receber uma conexão final de aço-inox quando a célula for fechada. O gás pode ser recolhido para o aproveitamento energético através da ligação de todos os drenos verticais com um ramal central (CETESB, 2013).

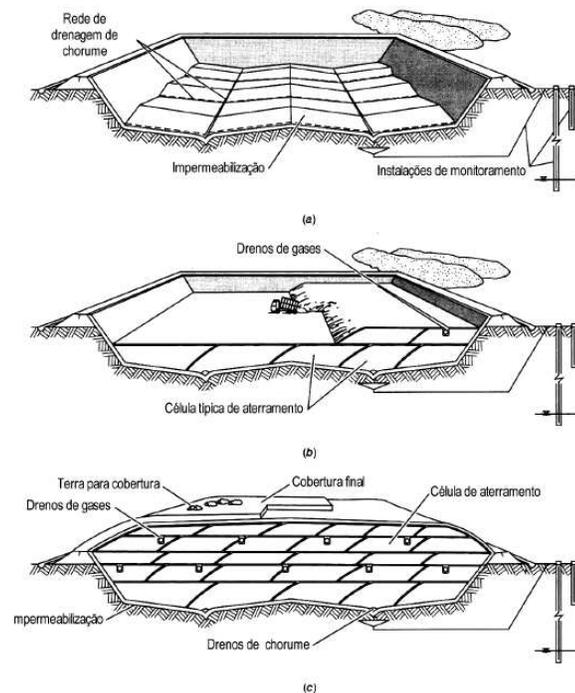
Existem dois métodos para execução dos drenos de gás: subindo o dreno à medida que o aterro vai progredindo ou escavar a célula encerrada para a implantação do dreno, deixando uma guia para quando se aterrar em um nível mais acima (IPT/CEMPRE, 2000);

- **Unidades de apoio**

Além da operação, o aterro deve contar com unidades de apoio, como acessos internos que permitam a interligação entre as localizações do aterro, portaria para controle de entrada e saída de pessoas e caminhões e isolamento da área para organização e segurança da operação (CETESB, 2013).

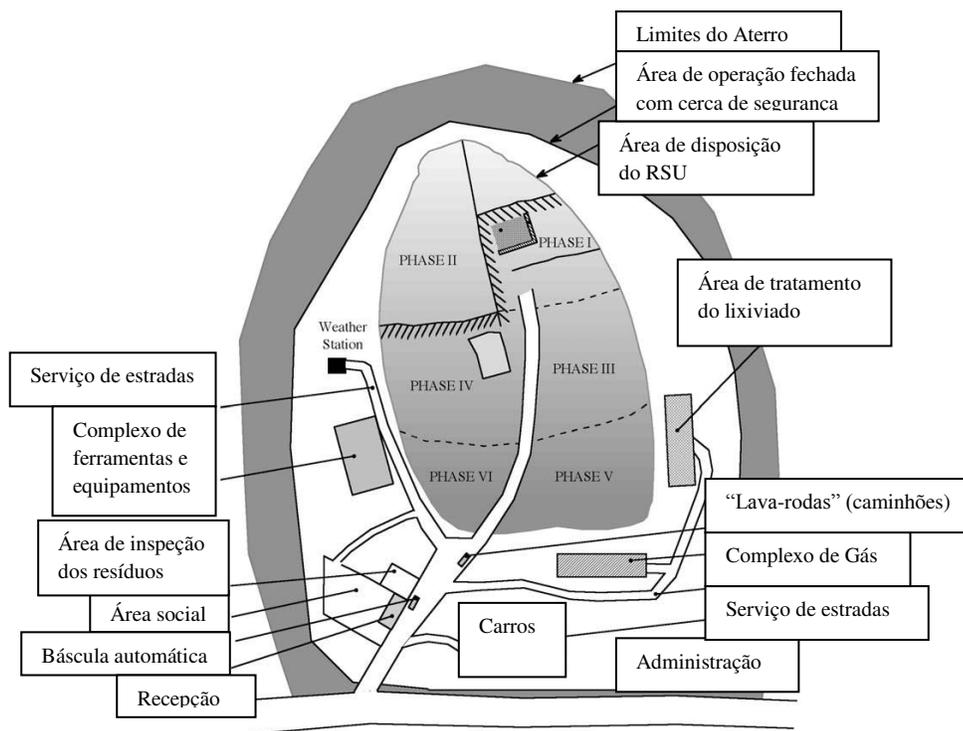
Na Figura 3.1 apresenta-se um esquema simplificado das etapas construtivas de um aterro sanitário e na Figura 3.2, uma ilustração geral demonstrando a localização otimizada dos setores dentro de um aterro sanitário.

Figura 3.1 – Esquema simplificado das etapas construtivas de um aterro sanitário



Fonte: Iwai, 2005.

Figura 3.2 – Ilustração geral de um aterro sanitário, demonstrando a localização otimizada dos setores



Fonte: Adaptado de EPA, 2000.

3.2 Barreira Impermeabilizante de Base

A impermeabilização de base é definida como a deposição de camadas de materiais artificiais e/ou naturais com o propósito de impedir ou reduzir a infiltração dos lixiviado no solo (ABNT, 1987).

Para garantir as condições de segurança de um aterro sanitário frente aos seus veículos de contaminação (lixiviados e gases) foram elaboradas distintas estruturas para proteger o ambiente que o envolve. Entre as infraestruturas de proteção, destacam-se aqueles relacionados à impermeabilização do solo subjacente ao aterro, isto é, o sistema impermeabilizante de base (OLIVEIRA, PRIM e JUNIOR, 2002).

Segundo Obladen, Obladen e Barros (2009) e Boscov et al. (2001), o revestimento de base dos locais de disposição de resíduos tem como função evitar a contaminação do subsolo e do

lençol freático através da imposição de uma barreira artificial contra a percolação do lixiviado proveniente da decomposição de resíduos e também da ação das águas pluviais, bem como garantir as condições mecânicas necessárias para a manutenção do sistema.

Em vista o Estado de São Paulo ser altamente industrializado e populoso, a questão do projeto de aterros de resíduos seguros e sanitários, do ponto de vista ambiental, é bastante relevante nesta região (BOSCOV et al., 2001).

O projeto da impermeabilização para contenção de resíduo é influenciado pelo tipo de resíduo, pelas condições climáticas e pelas condições geológicas do local em questão, logo podem se ter barreiras de vários tipos, sendo as principais: argila natural, materiais sintéticos e/ou solo argiloso compactado (PIEADADE JÚNIOR, 2003).

Devido suas funcionalidades, a barreira impermeabilizante de base deve apresentar características como durabilidade, resistência (mecânica e ao intemperismo), estanqueidade, compatibilidade com o resíduo a ser disposto, entre outros (CARVALHO, 1999; PIEADADE JÚNIOR, 2003).

3.2.1 Tipos de Barreiras Impermeabilizantes de Base

Segundo Piedade Junior (2003), a impermeabilização de base de aterro sanitário pode ser simples quando constituída por um único elemento de impermeabilização e dupla ou composta quando a é executada alternando camadas de solo natural e geomembrana, por exemplo.

A escolha do tipo de impermeabilização de base depende da agressividade química do lixiviado, do coeficiente de permeabilidade do meio e da economia com relação ao empréstimo de material natural (PIEADADE JÚNIOR, 2003).

Os tipos mais utilizados e citados na literatura são as barreiras de argilas naturais, as barreiras de solos argilosos compactados e as barreiras compostas por materiais sintéticos.

3.2.1.1 Barreiras de Argilas Naturais

Barreiras de argilas naturais são constituídas por solo que apresenta naturalmente alto teor de fração argila e conseqüentemente, baixo coeficiente de permeabilidade. Deste modo, são considerados solos com potencial para receber o resíduo disposto diretamente sobre eles.

Baseado nas normas nacionais e internacionais de aterros, valores de espessura e permeabilidade de camadas de solo natural dependem fundamentalmente do tipo de resíduo que será disposto no aterro e das próprias condições do local em questão.

Alguns órgãos ambientais, como a CETESB (1993) e USEPA (1993) e autores da área, como Macambira (2002), Piedade Junior (2003) e Souza (2009) recomendam solos com coeficiente de permeabilidade igual ou inferior a 10^{-9} m/s. Ressalta-se que, além dos baixos valores de permeabilidade, estes solos devem estar livres de imperfeições como falhas, trincas, fraturas, juntas, fissuras, perfurações, entre outros.

No entanto, é difícil e de custo elevado a determinação “in situ” do coeficiente de permeabilidade dos materiais de revestimento natural. Por esta razão, recomenda-se a construção de barreiras de revestimento ao invés da utilização singular do solo natural da área (EPA, 2000).

Piedade Júnior (2003) argumenta que é difícil garantir que a barreira natural possua um baixo e uniforme coeficiente de permeabilidade, por isso seu uso não é normalmente recomendado.

3.2.1.2 Barreiras de Solos Argilosos Compactados

As barreiras de solos argilosos compactados são construídas com material mineral compactado, predominantemente de solos argilosos compactados ou argilas que receberam beneficiamento industrial (SOUZA, 2009). Segundo o autor, a fração de finos do material (inferior a 0,074 mm) possui as funções de impermeabilização e atenuação dos contaminantes, enquanto a fração granulométrica mais grossa funciona como barreira física aos rejeitos dispostos.

Solos naturais de baixo coeficiente de permeabilidade, como argilas, argilas siltosas e siltes argilosos, quando compactados possuem potencial para serem boas barreiras impermeabilizantes (EPA, 2000).

A EPA (2000) considera alguns parâmetros que influenciam na eficiência de barreiras de solos compactados, e que por isso são motivos de preocupação no projeto de construção dessas barreiras. As considerações básicas são o tipo de material a ser utilizado (teor de argila e tamanho das partículas), a eficiência de construção (grau de compactação, método de compactação, teor de umidade, etc) e as propriedades do fluido a ser lixiviado. Todas essas considerações estão ligadas ao coeficiente de permeabilidade da barreira de solo compactado, sendo este o fator considerado mais importante para obras deste tipo.

Com relação aos solos compactados de barreiras impermeabilizantes de base, os argilominerais, que são os minerais secundários existentes na fração argila do solo, também são importantes constituintes, visto sua grande superfície específica dotada de excesso de cargas elétricas negativas que permitem reter cátions, formando ligações estáveis com a matéria orgânica do solo. Os argilominerías também oferecem propriedades coloidais como afinidade pela água e pelos elementos químicos nela dissolvidos. Logo, são capazes de reter uma grande quantidade de água, tornando-se expansivos com a absorção desta ou de outros líquidos (LEPSCH, 2002; SAMPAIO, 2006).

Dentre os principais argilominerías, a caulinita é um mineral de baixa eletronegatividade e baixa capacidade de troca catiônica, resultando em fraco potencial de retenção de água (ou outros líquidos orgânicos) e expansibilidade. Torna-se plástica para teores de umidade relativamente baixos. Já os argilominerais do grupo esmectitita, como as montmorillonitas, possuem elevadas cargas negativas e capacidade de troca catiônica, logo fornecem alto potencial de retenção de água e expansibilidade devido à introdução de moléculas de água ou de outros líquidos orgânicos em sua estrutura a fim de diminuir a deficiência de carga. Torna-se plástica para teores de umidade superiores aos da caulinita. Já as ilitas são minerais de moderadas eletronegatividade, capacidade de troca catiônica e plasticidade, logo são pouco expansíveis na presença de água ou líquidos orgânicos (SAMPALIO, 2006). A neotocita e a baumita também são minerais característicos pela adsorção de água e íons.

Segundo Piedade Júnior (2003), caso ainda o solo aceitável para compor barreiras de solos compactados não seja encontrado no local onde será realizada a impermeabilizante de base, o solo local existente pode ser melhorado com a adição de argilas comerciais como a bentonita, com a finalidade de obter baixos valores de coeficiente de permeabilidade. No entanto, o autor adverte sobre a precaução perante o uso de materiais de alta plasticidade, visto que é potencial de formação de torrões duros quando o solo está seco e torrões gomados (pegajosos) quando o solo está úmido, tornando difícil o manejo destes solos em campo.

3.2.1.2.1 Construção de Barreiras de Solos Argilosos Compactados

A construção da barreira de solo argiloso compactado depende basicamente do grau de compactação a fim de obter valores de coeficiente de permeabilidade mínimos. Fatores como tipo e número de passadas do equipamento, energia de compactação, espessura das subcamadas compactadas da barreira, teor de umidade do solo, entre outros, podem influenciar o grau da compactação e o valor do coeficiente de permeabilidade requeridos (USEPA, 1993; EPA, 2000).

As etapas e técnicas principais para efetuar a construção das barreiras de solo compactado consistem basicamente em:

- **Preparo do solo**

Alguns materiais precisam ser processados para o esfacelamento dos torrões de solo e peneirados para a separação da fração grossa do solo e posterior umedecimento ou adição de aditivos (DANIEL, 1993; USEPA, 1993; EPA, 2000 e PIEDADE JÚNIOR, 2003).

Os torrões podem ser fragmentados com equipamento adequado ou apto a realizar essa ação, as rochas podem ser peneiradas com peneiras vibratórias ou catadores mecânicos passados sobre uma camada solta de solo. O solo pode ser seco ou umedecido cerca de 2 a 3% além da umidade natural, sendo que o tempo necessário para o umedecimento do solo pode ser de 1 a 3 dias. O solo após a adição de água pode ser homogeneizado e seco com equipamento hábil,

como grades de disco, até atingir uma umidade desejada e uniforme (DANIEL, 1993; PIEDADE JÚNIOR, 2003).

Segundo as especificações da USEPA (1988; 1993), barreiras constituídas com macroporos entre os torrões podem fornecer condições de coeficiente de permeabilidade inaceitáveis. Já solos livres de grandes torrões promovem a uniformidade do teor de umidade. São sugeridas barreiras livres de torrões ou, quando existentes, que estes apresentem no máximo 76 mm de diâmetro.

• Escolha do tamanho das subcamadas e equipamentos de compactação

Para assegurar a eficiência de compactação, deve-se levar em conta a espessura das subcamadas da barreira a serem compactadas. Logo, a espessura delas são dependentes sobretudo das características do solo e equipamentos de compactação. A espessura das subcamadas lançadas e do número de passadas do equipamento compactador são inversamente proporcionais, isto é, subcamadas finas necessitam menores passadas, e vice-versa. Em sua disposição o solo é lançado em camadas de até 25 cm ou, usualmente, de 13 a 23 cm. O número de passadas varia de 5 a 12 (USEPA, 1989; DANIEL, 1993; USEPA, 1993; EPA, 2000; PIEDADE JÚNIOR, 2003).

O equipamento maquinário favorito para compactação em campo é o de rolo “pé-de-carneiro”, o qual é capaz de providenciar altos valores de compactação ao acoplar as partículas de argila umas às outras e efetuar, simultaneamente, a quebra dos torrões duros de solo (DANIEL, 1993; USEPA, 1993; PIEDADE JÚNIOR, 2003).

• Proteção da camada compactada contra o ressecamento

A realização de proteção da superfície após a compactação da camada mostra-se vantajosa, visto seu potencial de prevenção contra o ressecamento, que pode causar trincas no solo e formar caminhos preferenciais de lixiviação. O ressecamento pode interferir negativamente no coeficiente de permeabilidade da barreira de solo compactado (DANIEL, 1993; PIEDADE JÚNIOR, 2003).

O ressecamento pode ser evitado cobrindo a barreira com uma lona plástica ou uma geomembrana flexível (desde que não absorva calor e resseque o solo), ou umedecendo o solo periodicamente (DANIEL, 1993; EPA, 2000; PIEDADE JÚNIOR, 2003).

• Controle de qualidade da camada compactada

Para assegurar a segurança da barreira, após construção, é importante a realização de ensaios para controle de qualidade da obra, a fim de verificar se o grau de compactação e coeficiente de permeabilidade foram atendidos.

Após construída, são requeridos para essas barreiras, tipicamente valores de coeficiente de permeabilidade entre 10^{-10} a 10^{-9} m/s (USEPA, 1993).

No Estado de São Paulo, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) solicita que a camada de solo compactado da barreira impermeabilizante de base de aterros resíduos Classe II (Não Perigosos) tenha uma camada de solo argiloso compactado com 0,6 m de espessura e coeficiente de permeabilidade inferior a 1×10^{-9} m/s (BOSCOV, 2008).

A CETESB (1993) sugere algumas características de materiais como requisitos para proporcionar valores de coeficientes de permeabilidade inferiores 10^{-9} m/s para solos utilizados em barreiras impermeabilizantes de base. Essas características são: uso de material classificado pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) como CL (argila de baixa compressibilidade), CH (argila de alta compressibilidade), SC (areia argilosa) ou OH (solo orgânico de alta compressibilidade); porcentagem de fração de finos (material que passa na peneira #200) maior que 30%; LP (limite de plasticidade) igual ou maior à 30%; IP (índice de plasticidade) igual ou maior à 15%; e pH (potencial hidrogeniônico) igual ou maior à 7.

3.2.1.3 Barreiras de Material Sintético

Barreiras impermeabilizantes de base podem ser constituídas por material sintético produzido para a função de prevenir contaminações em aterros sanitários. Os materiais mais

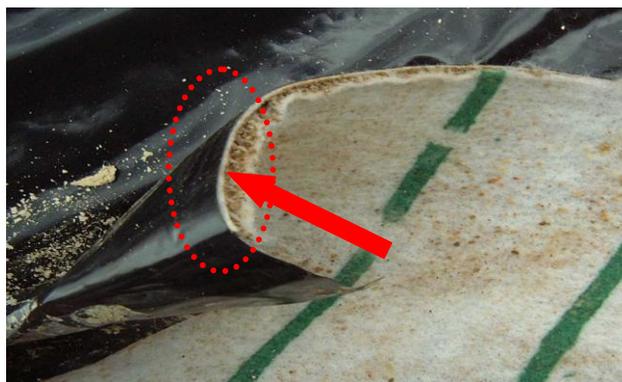
citados na literatura e os mais utilizados em obras de engenharia com esta finalidade são as geomembranas e os GCL (*Geosynthetic Clay Liner*).

Segundo Boscov (2008), é crescente a substituição do solo por material geossintético devido à eficiência dos geossintéticos em atender as mesmas funcionalidades, além da sua fácil disponibilidade quando comparado ao material natural (jazidas com características adequadas), que nem sempre é presente nas proximidades das obras.

- **GCL (*Geosynthetic Clay Liner*)**

O GCL é um material sintético formado pela associação de solo e geossintéticos e consistem, tipicamente, em uma camada fina de bentonita granular ou em pó (camada de 6 mm de espessura, aproximadamente) associada a uma ou mais camadas de geossintéticos (geotêxtil, geomembranas, etc). E esta junção pode ser efetuada por costura (agulhamento) ou colagem (resina adesiva) (USEPA, 1993, MACAMBIRA, 2002 e GUYONNET et al., 2009) (Figura 3.3.).

Figura 3.3 – Ilustração de um GCL (*Geosynthetic Clay Liner*) utilizado para impermeabilização de base, demonstrando a camada fina de bentonita em pó entre uma camada de geomembrana e uma de geotêxtil



Fonte: Officine Maccaferri, 2013.

A bentonita é um material capaz de ocupar todos os espaços vazios entre os grãos, tornando praticamente impermeável (OBLADEN, OBLADEN e BARROS, 2009).

O GCL é um conjunto de materiais designados para aplicações em barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários, uma vez que são econômicos, de fácil instalação

e possuem baixo coeficiente de permeabilidade. O coeficiente de permeabilidade do GCL é controlado pela fina camada de bentonita (5-10 mm) situada entre as duas camadas de geotêxtil (HAN et al., 2009). Segundo Boscov (2008), há a tendência em substituir a camada de solo pelo GCL nos casos para quando faltam jazidas com características adequadas na proximidade do aterro.

O coeficiente de permeabilidade da bentonita constituinte do GCL pode ter valores variados entre 10^{-10} e 10^{-12} m/s (MACAMBIRA, 2002 e SOUZA, 2009).

Apesar das vantagens do GCL, existem problemas potenciais de fissuras, rompimentos e fragmentações associados com a exposição dele às soluções químicas, tais como soluções de sais inorgânicos, líquidos não aquosos, lixiviados e outros líquidos permeáveis (HAN et al., 2009).

• Geomembranas

As geomembranas são folhas relativamente finas de termoplástico ou material polimérico que são fabricados em indústrias especializadas e transportados para o local de interesse do seu uso (USEPA, 1993).

Segundo a norma internacional padrão para terminologia de geossintéticos D4439 (ASTM, 2000), a geomembrana é uma membrana impermeável utilizada em conjunto a fundação, solo, rocha ou qualquer outro material relacionado em projetos, sistemas ou estruturas de engenharia geotécnica.

As geomembranas se caracterizam por serem produtos flexíveis, contínuos, fabricadas com espessuras de 0,5 a 3,0 mm (de acordo com as especificações de projeto) e coeficientes de permeabilidade entre 10^{-12} e 10^{-15} m/s (BOSCOV, 2008 e OBLADEN, OBLADEN e BARROS, 2009).

Existem muitos tipos de geomembranas disponíveis. A geomembrana com finalidade de uso como um componente de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários deve possuir baixa permeabilidade, resistência capaz de suportar cargas mecânicas e ser quimicamente compatível com os resíduos dispostos na célula do aterro (EPA, 2000). Segundo Needham, Smith e Gallagher (2006) e Boscov (2008), as geomembranas mais utilizadas atualmente em aterros de

resíduos são as de polietileno de alta densidade (PEAD), por serem bastante resistentes a substâncias químicas corrosivas como os hidrocarbonetos clorados.

Devido a suas características de fabricação, o PEAD é impermeável ao fluxo de líquidos, e os transportes através do PEAD em estado intacto é limitado aos processos difusivos, os quais são normalmente muito lentos (NEEDHAM, SMITH e GALLAGHER, 2006).

No entanto, é importante o cuidado de projeto, instalação e operação da geomembrana, visto que fatores como danos causados pela instabilidade de taludes e contato com produtos químicos agressivos podem afetar as propriedades dela, ocasionando defeitos ou falhas que prejudicarão a funcionalidade da camada impermeabilizante de base do aterro (NEEDHAM, SMITH e GALLAGHER, 2006).

3.3 Células Experimentais de Grandes Dimensões

As células experimentais de grandes dimensões têm como objetivo obter parâmetros mais representativos dos comportamentos de aterros sanitários ao invés de estimativas obtidas em ensaios de laboratório (pequena escala).

Autores como Marques (2001), Catapreta (2008) e Shariatmadari et al. (2009) já desenvolvem a concepção e construção de células experimentais de grandes dimensões a fim de estudo comportamental de aterros sanitários (BENATTI, LEME e MIGUEL, 2012).

A obtenção de critérios e de parâmetros comportamentais dos aterros sanitários e seus resíduos é difícil durante a operação de um aterro sanitário, logo as células experimentais, operando em escala real e desde que bem controlados, apresentam-se como uma alternativa viável para a obtenção desses parâmetros (CATAPRETA et al., 2005).

As células de grandes dimensões, segundo Marques (2001), apresentam-se como procedimentos bastante representativos e adequados para avaliação do comportamento geomecânico do material, tendo em vista a dificuldade de reprodução em laboratório de todos os aspectos inerentes aos aterros sanitários.

Geralmente, utiliza-se uma célula do próprio aterro ou se constrói uma especificamente. Nessas células, são controladas e monitoradas as condições de construção e operação, bem como as condições ambientais (BENATTI, LEME e MIGUEL, 2012).

Segundo Benatti, Leme e Miguel (2012), as células experimentais permitem avaliar aspectos inerentes ao comportamento direto dos RSU, como a compactação, compressibilidade, resistência ao cisalhamento, ou mesmo sistemas que as compõem como, por exemplo, o sistema de impermeabilização de base ou mesmo a camada de cobertura.

3.4 Contaminantes no Solo

A disposição de resíduo sólido é uma das principais fontes de introdução de contaminantes ao contato do solo, tornando proeminente meio de poluição ambiental (BOSCOV, 2008). Portanto, em uma barreira impermeabilizante de base, além de investigar as propriedades hidráulicas e mecânicas destes materiais quando em contato com a água, é importante também estudar o comportamento quando em contato com o lixiviado gerado pelo resíduo (SOUZA, 2009).

Os principais mecanismos de interação solo e lixiviado são a adsorção, precipitação e complexação, os quais estão relacionados com os processos de transferência dos contaminantes presentes no lixiviado para as partículas sólidas do solo (Ritter, Leite e Machado, 2001 e Boscov, 2008).

Segundo Lange et al. (2002), o movimento de contaminantes contidos no lixiviado pelo solo não dependem apenas do fluxo do fluido no qual essas substâncias estão dissolvidas, mas sim de mecanismos que dependem de processos físicos, químicos e biológicos aos quais as substâncias são submetidas. Sendo esses mecanismos físicos de transporte de contaminantes: a advecção, a dispersão e a difusão.

Para Chalermyanont, Arrykul e Charoenthaisong (2009), o transporte de substâncias químicas no solo depende principalmente dos processos de transporte advectivo, difusivo e adsorção química.

- **Advecção**

Advecção é o processo pelo qual o soluto é carregado pela água em movimento, mantendo-se constante a concentração da solução. É o transporte de massa, ou o movimento de soluto dissolvido. Este movimento é dado pela direção e taxa de transporte coincidentes com a da água. Solutos não reativos são transportados a uma velocidade média igual à velocidade específica ou de fluxo da água, $u = v/n$, sendo v [m/s] a velocidade de percolação e n [m³/m³] a porosidade do solo. A velocidade de transporte é igual à velocidade linear da água (ROWE, 2000; BOSCOV, 2008; SOUZA, 2009).

- **Dispersão**

Dispersão mecânica ou hidráulica é a mistura mecânica que ocorre durante a advecção, é causada inteiramente pelo movimento do fluido. É o processo pelo qual ocorrem misturas do contaminante devido à velocidade de percolação nos canais e nos poros individuais por eles interligados. Nestes espaços, as moléculas de contaminante se deslocam com velocidades diferentes da trajetória principal. Isto é decorrente do atrito exercido sobre o fluido, pela rugosidade e pelo tamanho dos poros presentes ao do fluxo e seguidos pelas moléculas da solução (ROWE, 2000; BOSCOV, 2008; SOUZA, 2009).

- **Difusão**

Difusão é o movimento das moléculas do fluido de acordo com um gradiente de concentração (SOUZA, 2009). É um fenômeno de transporte de massa, simultâneo à dispersão mecânica, que resulta de variações na concentração de soluto na fase líquida. É o processo pelo qual os constituintes iônicos ou moleculares se movem na direção do gradiente de concentração e em sentido oposto a este. A difusão molecular causa um fluxo de partículas de soluto no nível microscópico das regiões de maior para as de menor concentração (BOSCOV, 2008).

- **Adsorção**

O fenômeno da adsorção caracteriza-se pela concentração espontânea das moléculas presentes no lixiviado sobre uma superfície sólida (neste caso, as partículas de solo). Esse

fenômeno pode ocorrer como resultado de cargas elétricas desequilibradas presentes na superfície dos sólidos, atraindo moléculas quando em contato com o lixiviado (SOUZA, 2009).

Os fenômenos de sorção em solos são quantificados pelo fator de retardamento, R_d , usado para avaliar a capacidade de retenção do solo. Logo, o fator de retardamento é uma característica do solo em relação à determinada substância e depende basicamente, entre outros fatores, da atividade do solo, da concentração inicial da substância na solução contaminada, do pH da solução, da temperatura e da velocidade de percolação (LANGE et al., 2002).

Segundo Souza (2009), a complexação e a precipitação são processos também parte da adsorção, sendo a complexação o processo pelo qual um cátion metálico reage com um ânion que funciona como ligante inorgânico. Já o fenômeno da precipitação em contaminantes na fase aquosa ocorre quando há formação de novas substâncias, de maneira a ser uma nova fase insolúvel. A precipitação, segundo a autora, é responsável pela maioria da retenção dos metais pesados.

A grande dificuldade na compreensão científica dos mecanismos (físicos, biofísicos, bioquímicos e geoquímicos) do solo capazes de reter elementos poluentes que o permeiam é identificar quais reações ocorrem com os diferentes poluentes, por quanto tempo ou, até mesmo, como se pode melhorar o poder atenuador (OLIVEIRA, PRIM e JUNIOR, 2002).

Atualmente confirma-se também que a interação entre solo e substâncias químicas (distintas da água) proporcionam, em certos solos, mudanças de comportamento mecânico, podendo por este fato explicar alguns fenômenos geotécnicos. Essas substâncias químicas, ao infiltrar nos solos, são capazes de provocar alterações nas propriedades físico-químicas desses solos, alterando características estruturais (NOBRE e FERREIRA, 2006).

3.5 Solos Não Saturados

Os solos não saturados estão presentes na maioria das obras geotécnicas, em especial naquelas localizadas em regiões de clima tropical, como é o caso do Brasil (GITIRANA JÚNIOR, MASCARENHA e CAMAPUM de CARVALHO, 2011).

O comportamento de solos não saturados é de grande importância em muitas das aplicações geoambientais, como na determinação de fluxo de contaminantes pela superfície do solo e na infiltração de água por meio de camadas de contenção de resíduos (MALAYA e SREEDEEP, 2010). Segundo Scott (2000), a água no solo influencia em muitos aspectos do comportamento físico do solo, como a permeabilidade e o transporte de solutos.

No entanto, Silva (2005) destaca que as análises e a prática da engenharia de grande parte dos problemas geotécnicos repousam sobre os conceitos da Mecânica dos Solos Clássica, a qual considera o solo totalmente seco ou saturado e aplica características desses solos na avaliação dos problemas geotécnicos rotineiros, recusando a diferença de que se deve atentar para o fato de que a pressão atuante no ar presente nos poros do solo altera o seu comportamento. Isto é, os problemas da Mecânica dos Solos Clássica não representam o comportamento dos sistemas multifásicos solo-ar-água com a mesma consistência.

Segundo Fredlund (2006) e Silva (2005), os principais desafios para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia geotécnica podem ser expressos por:

- (1) a dificuldade de compreender o comportamento teórico do solo não saturado;
- (2) a formulação de equações e ensaios adequados para representar a singularidade de relações;
- (3) equipamentos “in situ” e de laboratório para a avaliação de uma grande variedade de sucções no solo, e
- (4) prolongado período de tempo e alto custo dos ensaios necessários para conhecer as propriedades desses solos;

Fredlund (2006) explica a natureza de cada um desses desafios e descreve as soluções que surgiram a partir de pesquisas e estudos aprofundados.

Para Catana, Vanapalli e Carga (2006), a razão pela dificuldade em implementar os avanços técnicos sobre solos não saturados na prática, dá-se pelo custo excessivo associado às medições das propriedades de solo não saturados, tanto em campo, quanto em laboratório.

Segundo Wada e Futai (2007), há a necessidade de mais estudos sobre o comportamento desses solos, de modo que se possa prever com mais segurança seu comportamento em obras dos mais variados tipos.

3.5.1 Fases dos Solos Não Saturados

Os solos não saturados consistem de três fases em interação: sólido, líquido e gasoso, sendo que os líquidos e os gasosos estão armazenados nas estruturas porosas deste solo.

Segundo Scott (2000), campos de força existem dentro das próprias fases e entre as interfaces delas (sólido-líquido, sólido-gasoso e líquido-gasoso), influenciando fortemente o comportamento da água no solo e também as propriedades físicas do próprio solo.

Esse estado de comportamento da água no solo apresenta-se sob várias formas, chamados de potenciais (LEPSCH, 2011). Os potenciais são forças categorizadas por pressões e tensões oriundas das: membranas das moléculas de água (tensão superficial), pontes de hidrogênio, ligações covalentes e forças de van der Waals, as quais são responsáveis pela coesão entre moléculas de água e adesão entre as superfícies da água e dos sólidos, por forças osmóticas causadas por diferenças de concentração de íons ou sais através de uma membrana, além da força gravitacional (SCOTT, 2000).

3.5.1.1 Potenciais do Solo

O movimento de massas na natureza se dá de pontos de energia livres mais altos para pontos de energia mais baixos. Na física clássica, duas formas principais de energia são reconhecidas: a cinética e a potencial. A energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade e geralmente desprezível para o caso da água dentro do solo que se move em velocidades muito pequenas. Já a energia potencial é uma função da condição e da posição da água, sendo de grande importância na caracterização de seu estado de energia. Logo, o potencial total da água (ψ) é uma medida de sua energia potencial (LEPSCH, 2011).

O potencial total da água (ψ) dá-se pela combinação dos componentes da Equação (3.1).

$$\psi = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m \quad (3.1)$$

em que ψ é a energia potencial total do solo; ψ_p é a energia potencial de pressão do solo; ψ_g é a energia potencial gravitacional do solo; ψ_{os} é a energia potencial osmótica do solo; ψ_m é a energia potencial matricial do solo.

- **Energia Potencial de Pressão (ψ_p)**

É a componente pressão no solo. Este componente aparece toda vez que a pressão que atua sobre a água do solo é maior que a pressão que atua sobre a água livre tomada como referência (na superfície, em que $\psi = \text{zero}$). Esse potencial não inclui os efeitos da matriz do solo (LEPSCH, 2011).

- **Energia Potencial Gravitacional (ψ_g)**

É o componente gravitacional no solo. Este componente aparece em razão da presença do campo gravitacional terrestre. Ele pode ser definido em função da densidade da água, aceleração da gravidade e altura de um corpo d'água (LEPSCH, 2011).

Segundo Lepsch (2011), a energia potencial gravitacional é a quantidade de trabalho que pode ser efetuado por uma quantidade unitária de água movendo-se de certa localidade (z) até um corpo d'água idêntico em um nível de referência.

- **Energia Potencial Osmótica (ψ_{os})**

É o componente osmótico do solo, o qual aparece pelo fato de a água do solo ser uma solução de sais minerais e outros solutos, enquanto a água padrão é pura (LEPSCH, 2011).

- **Energia Potencial Matricial (ψ_m)**

É o componente matricial, soma de todas as outras energias que envolvem a interação entre a matriz sólida do solo e sua água, tais como as forças capilares e de adesão que ocorrem nas interfaces sólidos-água (LEPSCH, 2011).

Segundo Lepsch (2011), o conceito de potencial matricial é muito útil porque permite classificar os diferentes estados da água no solo, expressando a energia de retenção em unidades quantitativas.

Os potenciais podem ser expressos de várias maneiras. Na literatura, encontram-se mais comumente os potenciais expressos por unidade de volume, como pascal (Pa) e seu múltiplo, o quilopascal (kPa).

3.5.1.2 Sucção do Solo

A sucção do solo é descrita como a energia com que o solo (elemento poroso) absorve água quando está livre para se mover. Esta avidéz por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo. A sucção é normalmente expressa como pressão, em unidades de kPa, atm ou bar (MARINHO, 2005).

Segundo Hillel (1980), Gerscovich e Sayão (2002) e Marinho (2005), a sucção em solos é composta de duas partes, considerada a soma dos valores da sucção matricial e sucção osmótica, referidos aos potenciais matricial (ψ_m) e osmótico (ψ_{os}) do solo.

Nas aplicações práticas de engenharia, para valores de sucção do solo acima de 1500 kPa, pode-se assumir que a sucção total é igual à sucção osmótica (GERSCOVICH e SAYÃO, 2002).

Assim, o movimento, sucção ou retenção da água no solo envolve transferências energéticas ou de forças oriundas da interação com os sólidos, podendo ser medidas através do trabalho necessário realizado para remover uma quantidade de água do solo quando em algum estado de equilíbrio (água-solo) (SCOTT, 2000 e LEPSCH, 2011).

3.5.2 Curva de Retenção de Água nos Solos

Propriedades de retenção de água no solo podem ser expressas através da relação entre os valores de sucção e a quantidade de água armazenada no solo, representadas pelo teor de

umidade ou pelo grau de saturação. Esta relação é chamada de curva de retenção de água no solo, representando, então, a capacidade que o solo tem de armazenar água (SILVA, 2005).

O formato da curva de retenção depende da mineralogia e granulometria do solo, os quais são parâmetros intrínsecos em relação à distribuição dos tamanhos dos poros (GERSCOVICH e SAYÃO, 2002).

O teor de umidade do solo, isto é, a quantidade de água presente no solo, é um parâmetro importante que pode ser representado pelo teor de umidade gravimétrico (w) [g/g ou %], que é a relação entre a massa de água presente no solo (M_w) [g] e a massa de sólidos (M_{sol}) [g] ou pelo teor de umidade volumétrico (θ) [cm^3/cm^3], definido como a razão entre o volume de água presente no solo (V_w) [cm^3] e o volume total de solo (V) [cm^3] (SILVA, 2005).

A compreensão da curva de retenção de um solo tornou-se a principal chave das propriedades dos solos não saturados (FREDLUND, 2006). Segundo Fredlund (2006), com a compreensão da curva de retenção, as propriedades do solo tomam a forma de extensões das propriedades clássicas do solo saturado com uma porção adicional que é uma função da sucção do solo.

A curva de retenção, representativa da capacidade de que o solo tem de armazenar água, tem sido também ampliada para a previsão e quantificação de diversos parâmetros de grande interesse na solução dos problemas geotécnicos, como a determinação do coeficiente de permeabilidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento (SILVA, 2005).

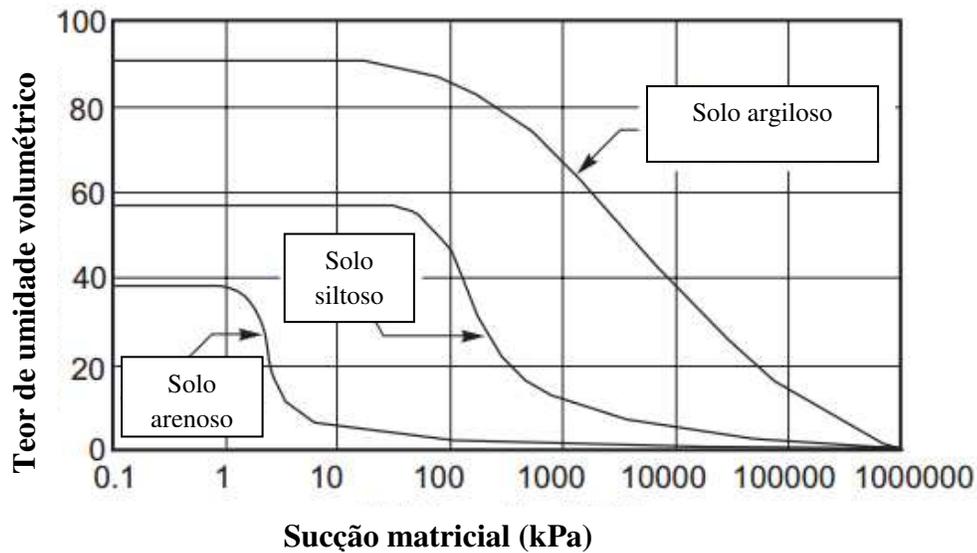
Para Catana, Vanapalli e Carga (2006), a prática da engenharia interessa-se particularmente pela avaliação da sucção matricial em campo referente à faixa de 100 a 1000 kPa.

Solos arenosos demonstram uma perda acentuada de teor de umidade para valores de sucção relativamente baixos, enquanto solos argilosos geralmente mostram um formato mais suave de curva de retenção. Já os solos siltosos, apresentam um comportamento intermediário aos dois citados anteriormente. Para solos com granulometria uniforme, suas curvas apresentam-se

semelhantes às curvas geradas por solos arenosos, enquanto solos bem graduados apresentam curvas comparativas às referentes aos solos argilosos (GERSCOVICH e SAYÃO, 2002).

Na Figura 3.4 são ilustradas as diferenças e os formatos típicos das curvas de retenção de um solo argiloso, um solo siltoso e um solo arenoso.

Figura 3.4 – Típicos formatos de curvas de retenção do solo influenciados pela granulometria dos solos



Fonte: Fredlung e Xing, 1994.

A obtenção da curva de retenção pode dar-se pelo processo de secagem da amostra previamente saturada ou por umedecimento gradual da amostra de solo seca ao ar. As curvas obtidas por esses dois processos podem apresentar distinções, relativas ao fenômeno da *histerese* (COSTA, OLIVEIRA e KATO, 2008). Isto é, para uma mesma sucção do solo, o teor de umidade correspondente na trajetória de secagem é maior do que aquele para a trajetória de umedecimento.

Histerese é denominado o fenômeno que distingue as curvas de retenção obtidas pela trajetória de umedecimento das obtidas pela trajetória de secagem, para uma mesma amostra (UBALDO, BORMA e BARBOSA, 2007) e envolve fenômenos de superfície, associada com a forma de absorção ou perda de água (MARINHO, 2005).

Dentre outros aspectos, o fenômeno da *histerese* atribui-se a diversas causas como: a diferença do ângulo de contato da água que recua e avança no espaço poroso do solo, função do tipo de partículas minerais e orgânicas que favorecem a maior ou menor expansão ou contração dos colóides do solo; à desuniformidade dos raios dos poros capilares presentes no solo; às bolhas de ar capturadas nos vazios do solo durante a fase de umedecimento; à alteração na estrutura do solo devido às ações de contração e expansão relativas às trajetórias de secagem e umedecimento (HILLEL, 1971; BONDER, 2008; COSTA, OLIVEIRA e KATO, 2008).

Segundo Merayyan e Hope (2009) e Gerscovich e Sayão (2002), os parâmetros principais que definem os formatos das curvas de retenção de água de solos podem ser considerados por: o teor de umidade volumétrico em condições saturadas (θ_s) [cm^3/cm^3] ou teor de umidade gravimétrica em condições saturadas (w_s) [g/g ou %], teor de umidade volumétrica residual (θ_r) [cm^3/cm^3] ou teor de umidade gravimétrica residual (w_r) [g/g ou %] e valor de entrada de ar (ψ_a) [kPa] para a curva pela trajetória de secagem.

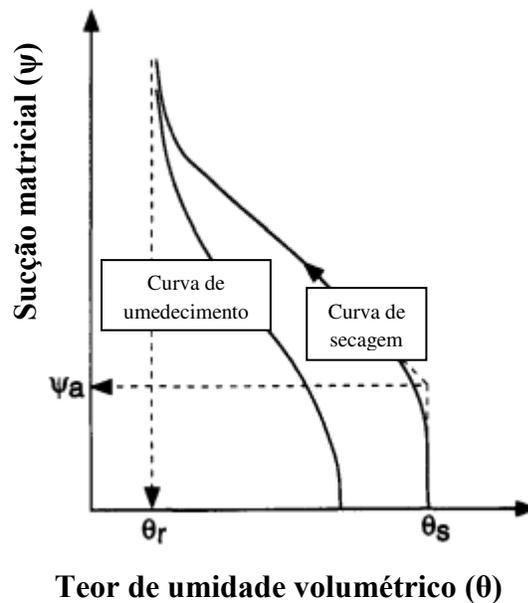
O teor de umidade volumétrico em condições saturadas (θ_s) [cm^3/cm^3] ou teor de umidade gravimétrica em condições saturadas (w_s) [g/g ou %] descrevem o teor de umidade em que o solo está completamente saturado. É ele quem representa o estado inicial da trajetória de secagem (MALAYA e SREEDEEP, 2012).

O teor de umidade volumétrica residual (θ_r) [cm^3/cm^3] ou teor de umidade gravimétrica residual (w_r) [g/g ou %] é um parâmetro de valor baixo, no qual o aumento da sucção matricial já não afeta (reduz) significativamente o teor de umidade do solo. O valor do teor de umidade residual (θ_r ou w_r) é obtido graficamente (GERSCOVICH e SAYÃO, 2002).

Conceitualmente, o valor de entrada de ar (ψ_a) [kPa] na trajetória de secagem representa a sucção matricial necessária para causar a dessaturação dos poros maiores do solo não saturado e é obtido pela extensão da constante de declividade da curva de retenção até interceptar a linha de saturação de 100%, em que o correspondente valor de sucção é tomado como o valor de sucção de entrada de ar do solo (MARTÍNEZ, 2003). É também obtido graficamente. Segundo a autora, a determinação deste valor de entrada de ar é mais utilizada quando se deseja utilizar modelos de previsões de comportamento de resistência ao cisalhamento em função a curva de retenção dos solos.

Na Figura 3.5, têm-se duas curvas de retenção do solo, obtidas pelos processos de secagem e umedecimento. Nela é apresentado o fenômeno de *histerese* e os principais parâmetros que definem os formatos das curvas de retenção (θ_r ou w_r , θ_s ou w_s , e ψ_a).

Figura 3.5 – Curvas de retenção do solo, obtidas pelos processos de secagem e umedecimento, ilustrando o fenômeno de *histerese* e os principais parâmetros que definem os formatos das curvas de retenção (θ_r ou w_r , θ_s ou w_s , e ψ_a)



Fonte: Tinjum, Benson e Blotz, 1997.

A modelagem das curvas de retenção são realizadas através de equações que fornecem as representações matemáticas relativas à representação dessas curvas baseadas em parâmetros empíricos. Dependendo das propriedades do solo em questão, estas funções variam em capacidade para poder descrever as curvas, e podem ter suas aplicabilidades modificadas (MERAYYAN e HOPE, 2009).

Segundo Gerscovich e Sayão (2002), muitas equações para representação matemática do comportamento das curvas de retenção estão disponíveis na literatura, sendo que algumas equações são baseadas no conceito de que o formato da curva é dependente da distribuição dos

tamanhos dos poros no solo, e outras assumem concordância em relação à distribuição do tamanho das partículas do solo e suas propriedades físicas.

Devido ao formato diferente das curvas de retenção para vários tipos de solo, é essencial encontrar uma equação matemática geral para uso prático. Muitos pesquisadores têm buscado desenvolver equações apropriadas (YANG, ZHANG e WANG, 2011).

Na Tabela 3.1 encontram-se 3 dessas equações matemáticas mais comumente apresentadas na literatura e a citação de algumas bibliografias que utilizam dessas equações para expressar as curvas de retenção.

Tabela 3.1 – Principais equações matemáticas discutidas na literatura para expressar as curvas de retenção do solo

Autores	Equação	Bibliografia Discutida
Brooks Corey (1964)	$Sr = B - D\psi^m$	Tinjum, Benson e Blotz (1997); Merayyan e Hope (2009); Sousa et al. (2011);
van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^m}$	Tinjum, Benson e Blotz (1997); Khattab e Al-Taie (2006); Merayyan e Hope (2009); Malaya e Sreedeeep (2010); Fernandes e Vilar (2011); Ferreira, Gerscovich e Soeiro (2011); Miguel et al. (2011); Sousa et al. (2011); Yang, Zhang e Wang (2011);
Fredlund e Xing (1994)	$Sr = \frac{1}{(\ln(e + (\psi/\alpha)^n))^m}$	Khattab e Al-Taie (2006); Ferreira, Gerscovich e Soeiro (2011); Yang, Zhang e Wang (2011);

NOTA: θ é o teor de umidade, o qual pode ser calculado utilizando o teor de umidade residual (θ_r) ou teor de umidade em condições saturadas (θ_s); ψ é a sucção e Sr é o grau de saturação. Os outros símbolos não definidos e que se encontram na Tabela 3.1 são variáveis determinadas experimentalmente (ZHOU e YU, 2005).

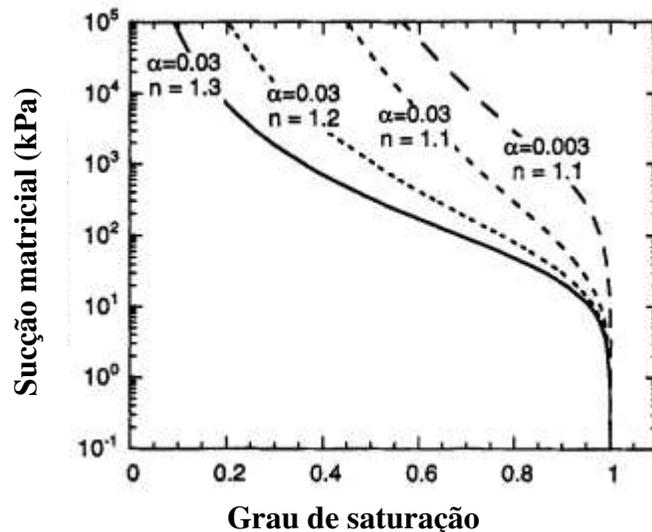
Diversos autores como Merayyan & Hope (2009), Malaya e Sreedeeep (2010), Miguel et al. (2011) e Sousa et al. (2011) têm utilizado a equação de van Genuchten (1980), representada pela Equação (3.2) para ajuste da curva de retenção de água no solo:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^m} \quad (3.2)$$

em que θ é o teor de umidade volumétrico (cm^3/cm^3); θ_s é o teor de umidade volumétrico em condições saturadas (cm^3/cm^3); θ_r é o teor de umidade volumétrico residual (cm^3/cm^3); ψ é a sucção (kPa); α é o parâmetro de otimização, e é inversamente relacionado ao valor da sucção de entrada de ar; n é o parâmetro que controla a inclinação da curva de retenção. Está relacionado com a distribuição do tamanho dos poros; m é o parâmetro responsável pela rotação da porção inclinada da curva de retenção. Está relacionado à assimetria da curva.

Ao colocar os valores paramétricos na equação de van Genuchten (1980), uma relação é estabelecida entre a sucção e teor de umidade, obtendo assim as curvas de retenção do solo (MALAYA e SREEDEEP, 2010) (Figura 3.6).

Figura 3.6 – Exemplo de curva de retenção definida pela equação de van Genuchten (1980)



Fonte: Tinjum, Benson e Blotz, 1997.

3.5.2.1 Determinação das Curvas de Retenção em Laboratório

O processo de exercer energia para remover a água de um solo pode ser simulado em laboratório por meio da aplicação de uma tensão de sucção em uma amostra de solo com determinado teor de umidade. A energia requerida para remover essa água é denominada de “potencial matricial da amostra de solo em certas condições de umedecimento” (LEPSCH, 2011).

Procedimentos diretos e indiretos foram desenvolvidos para a determinação das curvas de retenção. As medidas diretas da curva de retenção são obtidas utilizando equipamentos de pressão que fornecem medidas de teores de água através de uma série de valores de sucção aplicados. Os procedimentos indiretos envolvem banco de dados ou estimativa da curva de retenção, conforme granulometria de um solo (FREDLUND, 2006).

Modelos interpretativos de solo não saturado com base no modelo capilar têm fornecido um modelo conceitual útil para a compreensão dos efeitos da textura do solo, índice de vazios e compactação na curva de retenção. O modelo capilar também forneceu a base para técnicas desenvolvidas para prever a relação funcional entre o grau de saturação e coeficiente de permeabilidade, coeficiente de difusão e adsorção para solos não saturados (BARBOUR, 1998).

Técnicas utilizadas de laboratório e medição “in situ” da sucção matricial proporcionam um meio de monitoração do comportamento e verificação de teorias dos solos não saturados (FREDLUND, 2006).

Segundo Malaya e Sreedeeep (2010), os procedimentos experimentais adotados para a determinação das curvas de retenção são demorados e onerosos, no entanto comprovam em sua pesquisa, comparando dados obtidos experimentalmente com dados estimados, que modelos de estimativa de dados, como o software ROSETTA, não geram resultados eficientes. Logo, pesquisas ainda dependem de dados obtidos experimentalmente.

Para determinados valores de sucção, a curva de retenção do solo estimada pelo software ROSETTA subestima o valor de teor de água volumétrico, indicando que as curvas obtidas por estimativa não correspondem satisfatoriamente com os as curvas obtidas por meio de dados

experimentais. Portanto, é necessária ainda uma melhoria e avaliação cuidadosa no procedimento de estimativas de curvas de retenção do solo (MALAYA e SREEDEEP, 2010).

Bonder (2008) apresenta uma tabela com o resumo de algumas técnicas de medidas de sucção (obtenção de dados para a curva de retenção) em laboratório, adaptada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Técnicas de medição de sucção (obtenção de dados para a curva de retenção)

Técnica	Sucção medida	Faixa de medida (kPa)
Tensiômetro	Matricial	0 – 90
Psicrômetro	Total e Osmótica	100 – 8000
Condutividade Elétrica	Matricial e Osmótica	20 – 1500
Condutividade Térmica	Matricial	0 – 400
Papel Filtro	Matricial e Total	0 – 29000

Fonte: Adaptado de Bonder, 2008.

3.5.2.1.1 Determinação das Curvas de Retenção pelo Método do Papel Filtro

O método do papel filtro é certamente a mais simples de todas as técnicas para se medir sucção (MARINHO, 2005) e tem sido bastante utilizada para obtenção da curva de retenção por ser um método de fácil aplicação, baixo custo e por cobrir uma faixa de sucção relativamente ampla (BONDER, 2008).

Esse método pode ser utilizado tanto em laboratório como em campo, no entanto são mais comuns ensaios com papel filtro em laboratório devido à maior dificuldade de controle das condições de manuseio do papel filtro em campo. Ensaios em campo também requererem um tempo de equilíbrio de sucção, entre o papel filtro e o solo, relativamente alto quando consideradas as constantes mudanças climáticas (SILVA JÚNIOR, GARCIA e GITIRANA JÚNIOR, 2011).

O método do papel-filtro é padronizado pela norma D5298 (ASTM, 2003), a qual é responsável pela descrição da calibração do papel-filtro e pelo procedimento de medição (LUCAS et al., 2011).

Segundo a D5298 (ASTM, 2003), o método do papel filtro consiste de um ensaio indireto e de laboratório para avaliar o potencial matricial (matriz) e o potencial total (sucção) do solo. Este método de ensaio compreende o emprego de um papel filtro em contato com uma amostra de solo dentro de um recipiente hermeticamente fechado até que o equilíbrio seja estabelecido, isto é, até que a pressão parcial de vapor de água do ar esteja em equilíbrio com a pressão de vapor da água dos poros, na amostra de solo (ASTM, 2003).

Para Silva Júnior, Garcia e Gitirana Júnior (2011), o método baseia-se no princípio que um papel filtro quando colocado em contato num mesmo ambiente que uma amostra de solo, com alguma umidade e sucção, atinge após um determinado período de tempo, um estado de equilíbrio de sucção com ela.

O tempo de equilíbrio abrange o período de tempo necessário para que ocorra o equilíbrio de potencial entre o papel filtro e a amostra de solo (MARTÍNEZ, 2003).

Segundo Marinho (2005), a condição de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém com umidades diferentes. Para o autor, ainda, esse equilíbrio é um fator de extrema importância para obtenção da sucção correta.

O fluxo de umidade entre o papel e o solo pode ocorrer através de fluxo capilar ou fluxo de vapor. O fluxo capilar dá-se através do contato direto dos poros do solo com as fibras do papel, sem ocasionar a interrupção da água. Neste caso, a sucção medida é a parcela matricial. Já o fluxo de vapor ocorre quando as moléculas de água necessitam vencer as forças osmótica e capilar para sair dos poros. Assim, para ocorrência deste fluxo, é necessário que não exista contato direto entre o papel filtro e o solo, impedindo o fluxo de sais presentes na água. Neste caso, é medida a sucção total (SILVA JÚNIOR, GARCIA e GITIRANA JÚNIOR, 2011).

Pesquisadores como Chandler e Gutierrez (1986), Marinho (1994), Martínez (2003), Miguel et al. (2011) utilizam há um tempo em suas pesquisas de laboratório para obtenção da

curva de retenção, o papel filtro Whatman n° 42. Para a calibração das curvas a fim de obter o valor da sucção do solo a partir da umidade do papel filtro Whatman n° 42, os autores utilizam a curva de calibração desenvolvida por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992).

Segundo Silva Júnior, Garcia e Gitirana Júnior (2011), as Equações (3.3) e (3.4) da curva de calibração desenvolvida por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992) são descritas como:

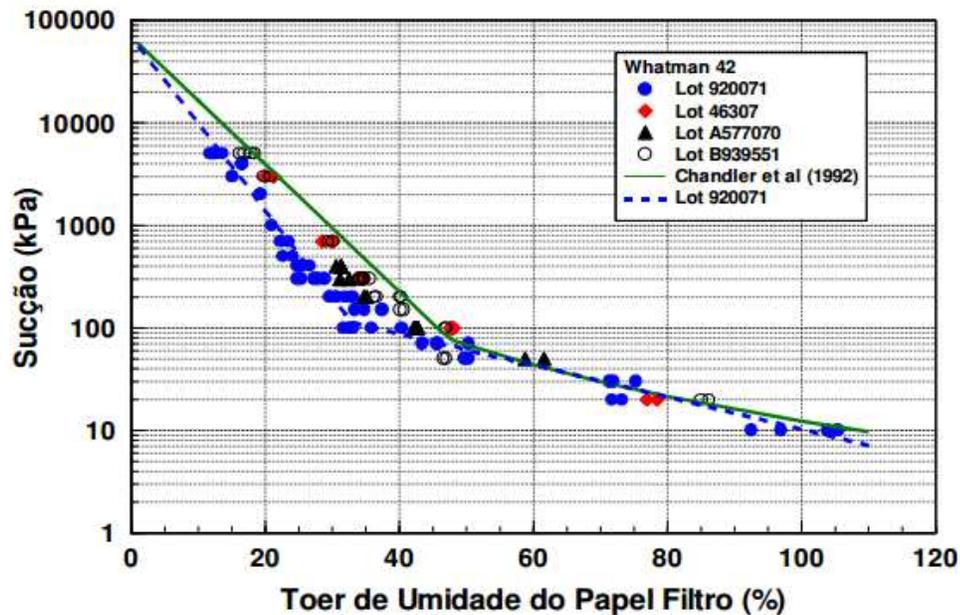
- Para umidade do papel filtro $> 47\%$, $\psi = 10^{(6,05-2,48.\log w_{pf})}$ (3.3)

- Para umidade do papel filtro $\leq 47\%$, $\psi = 10^{(4,84-0,0622.\log w_{pf})}$ (3.4)

em que ψ é a sucção do solo (kPa); w_{pf} é a umidade gravimétrica do papel filtro (%).

Na Figura 3.7 estão ilustrados a curva de calibração obtida para o papel filtro Whatman n° 42 através de equações de Chandler, Crilly e Montgomery-Smith. (1992) e os dados de calibração obtidos por Oliveira (2004), mostrando a diferenças entre lotes desse mesmo papel filtro.

Figura 3.7 – Curva de calibração obtida para o papel filtro Whatman n° 42 através de equações de Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992) e os dados de calibração obtidos por Oliveira (2004) para diferentes lotes do Whatman n° 42



Fonte: Marinho, 2005.

Segundo Marinho (2005), para o ensaio de determinação da curva de retenção utilizando papel filtro, sempre deve ser utilizado papel filtro "quantitativo" usado diretamente da caixa.

O papel filtro Whatman nº 42 possui umidade inicial no estado seco de aproximadamente 6%, permitindo que sejam determinadas sucções no solo não saturado de 0 até 29 MPa (máxima sucção que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do mesmo) (MARTÍNEZ, 2003 e MARINHO, 2005).

A precisão do método de determinação da curva de retenção utilizando papel filtro está diretamente relacionada com a pesagem para obtenção do teor de umidade do papel filtro, logo uma variação na quarta casa decimal do grama pode induzir a diferenças de 50 kPa no valor da sucção. Por este motivo, para sucções muito baixas, esse método pode se tornar impreciso (MARTÍNEZ, 2003).

Quando retirado do solo para ser levado à estufa para determinação do teor de umidade, o manuseio do papel deve ser rápido ou o papel deve ser colocado em um recipiente selado, visto que este absorve água do ar. A absorção da umidade do ar pelo papel filtro ocorre principalmente para as baixas umidades (altas sucções), em que a evaporação é menor (MARINHO, 2005).

Assim, um dos aspectos mais importantes para a obtenção de uma adequada medida da sucção é garantir que o papel filtro, após atingir o tempo de equilíbrio, seja removido do ambiente de equilíbrio sem perda significativa de umidade (MARINHO, 2005). Segundo o autor, a perda de umidade é da ordem de 1.5% por minuto para uma umidade de aproximadamente 35% e esta perda depende da umidade do papel.

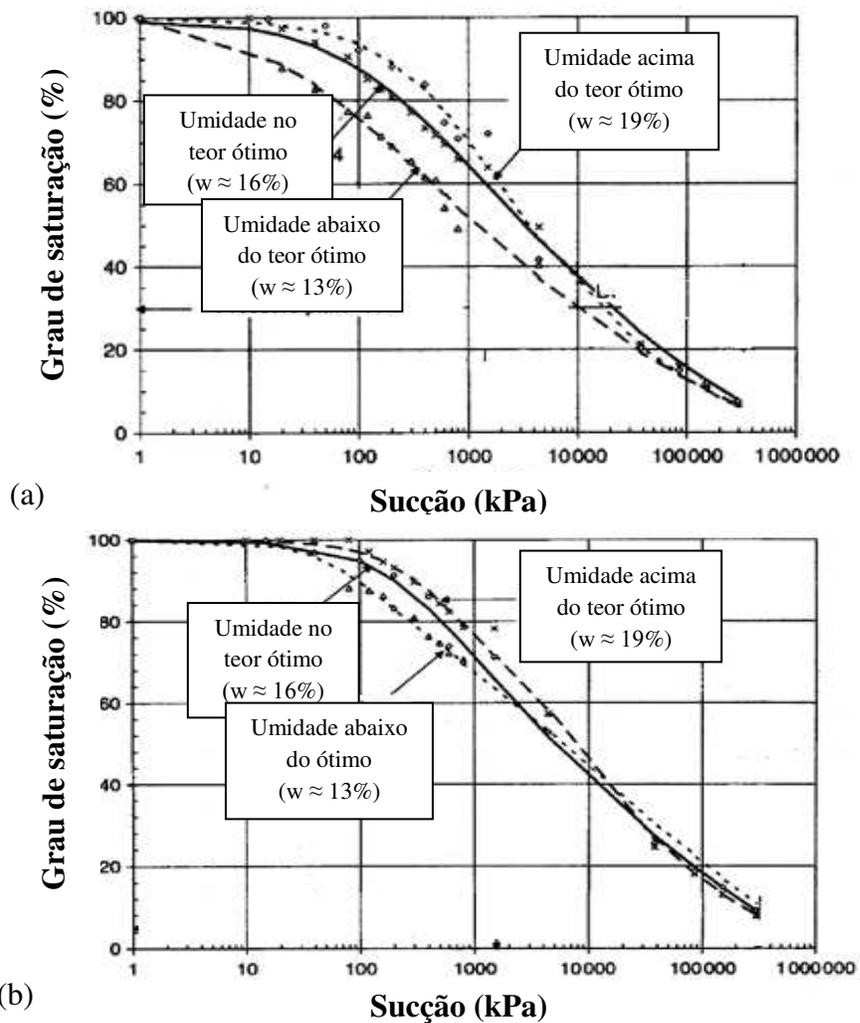
3.5.2.2 Influência da Compactação nas Curvas de Retenção do Solo

Para Fleureau et al. (2002) e Catana, Vanapalli e Carga (2006), parâmetros do solo como o índice de vazios, porosidade, atividade superficial, propriedades químicas, teor de umidade inicial de compactação, estrutura e mineralogia influenciam diretamente as propriedades geotécnicas de solos compactados, os solos compostos por fração de finos, os solos não saturados e suas respectivas curvas de retenção.

Autores como Tinjum, Benson e Blotz (1997), Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999), Fleureau et al. (2002) e Catana, Vanapalli e Carga (2006) estudaram ensaios de curva de retenção para solos de granulometria fina compactados e observaram especificações como:

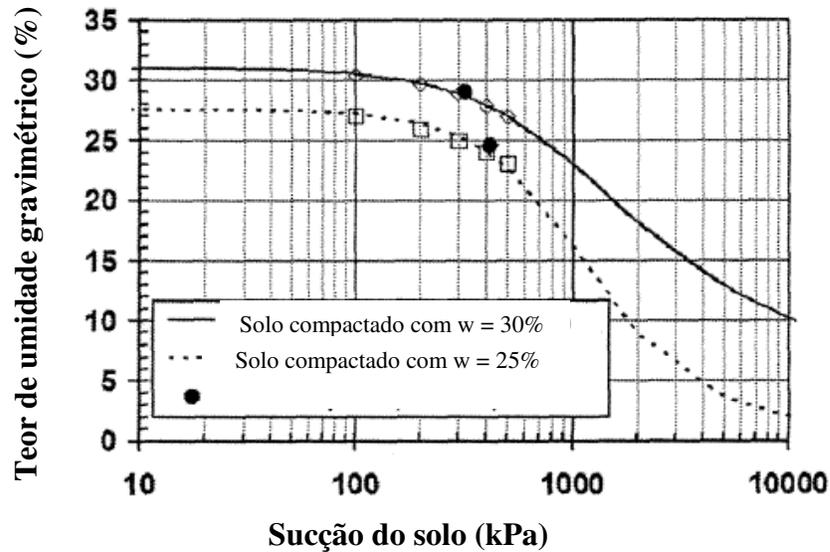
- Solos compactados em teores de umidade iniciais diferentes apresentam curvas de retenção distintas. Os solos compactados abaixo da umidade ótima, retém menor quantidade de água quando comparados aos solos compactados no ramo úmido (teor de umidade inicial acima do ótimo) (Figuras 3.8 e 3.9).

Figura 3.8 – Curvas de retenção para solos compactados em teores de umidade iniciais diferentes, sob a mesma energia de compactação. O item (a) refere-se aos solos compactados em energia de 25 kPa e o item (b) refere-se aos solos compactados em energia de 100 kPa



Fonte: Vanapalli, Fredlund e Pufahl, 1999.

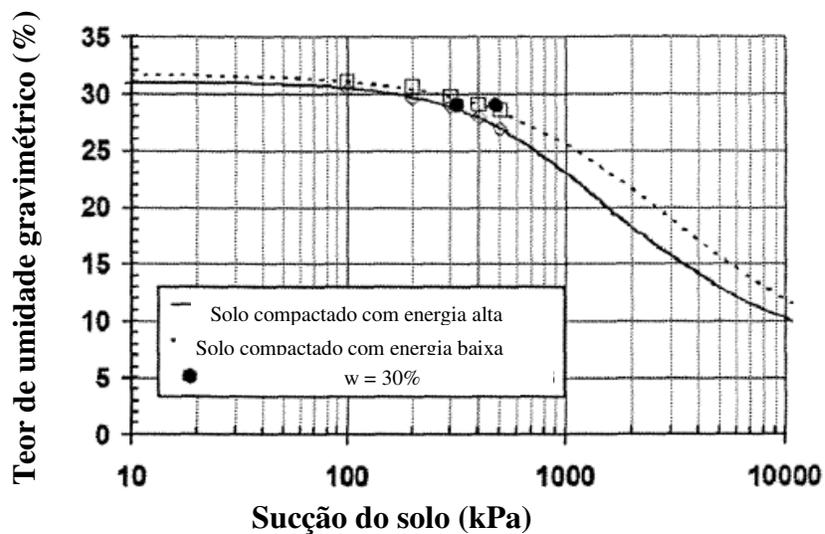
Figura 3.9 – Curvas de retenção para solos compactados em teor de umidade inicial acima (30%) e abaixo (25%) do teor de umidade ótimo



Fonte: Catana, Vanapalli e Carga, 2006.

• Solos compactados com mesmo teor de umidade, mas em energias de compactação diferentes, apresentam curvas bastante semelhantes (Figura 3.10).

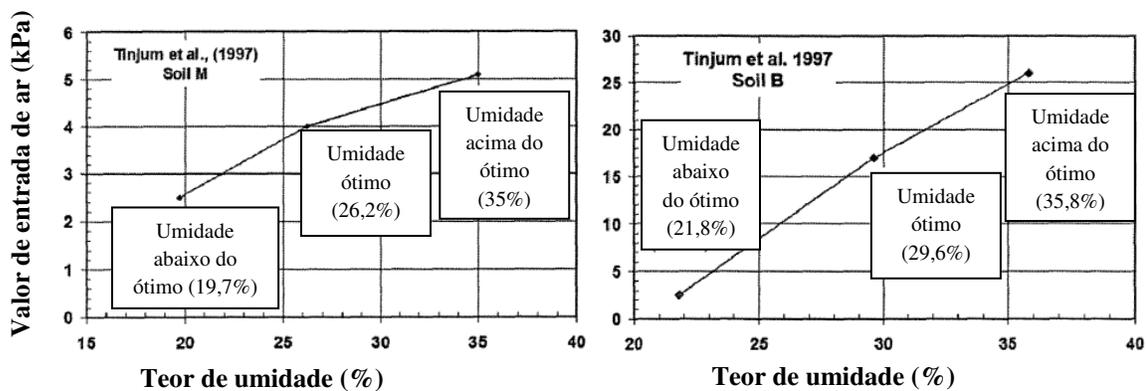
Figura 3.10 – Curvas de retenção para solos compactados em energias diferentes e com mesmo teor de umidade inicial



Fonte: Catana, Vanapalli e Carga, 2006.

- Os valores de entrada de ar em solos compactados abaixo do teor de umidade ótimo apresentam visivelmente menores do que os valores de entrada de ar em solos compactados acima do teor de umidade ótimo. Quando comparadas curvas de solos compactados no teor de umidade ótimo e acima dele, há pouca diferença nos valores de entrada de ar. Além disso, o valor de entrada de ar aumenta proporcionalmente ao aumento de teor de umidade inicial de compactação (Figuras 3.11).

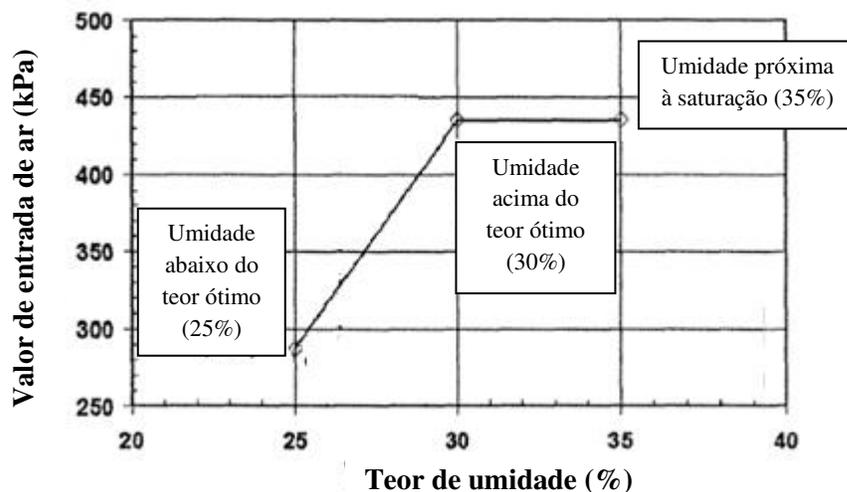
Figura 3.11 – Relação entre valores de entrada de ar e teores de umidade iniciais de compactação diferentes



Fonte: Catana, Vanapalli e Carga, 2006.

- O valor de entrada de ar mostra-se relativamente constante quando o solo for compactado próximo à saturação (Figura 3.12).

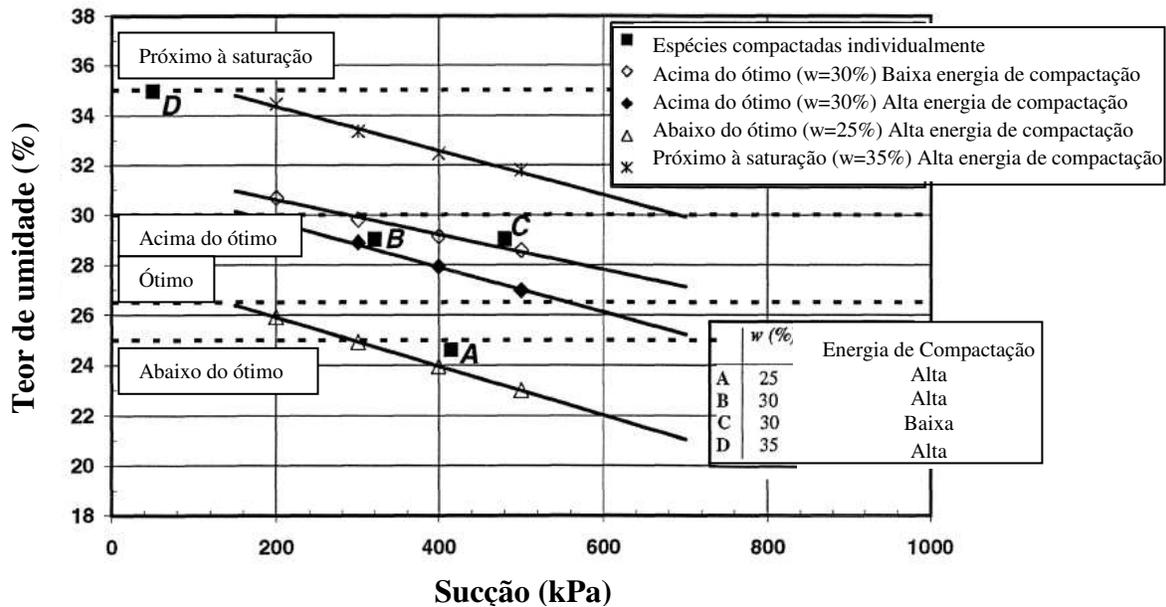
Figura 3.12 – Relação entre valores de entrada de ar e teores de umidade iniciais diferentes, mostrando-se constante quando próximo à saturação



Fonte: Catana, Vanapalli e Carga, 2006.

Em estudo das relações entre o teor de umidade e a sucção matricial para solos argilosos compactados em diferentes teores de umidade inicial e energia de compactação, Catana, Vanapalli e Carga (2006) mostraram que solos abaixo do teor de umidade ótima retêm menor quantidade de água; seguidos por solos de mesmo teor de umidade inicial de compactação, só que com maior energia de compactação; seguidos por solos de menor energia de compactação e por fim, solos compactados próximos a saturação são os que mais retêm. Segundo os autores, a influência da energia de compactação pode ser considerada insignificante, visto que as curvas para estas condições mostram-se bastante semelhantes (Figura 3.13).

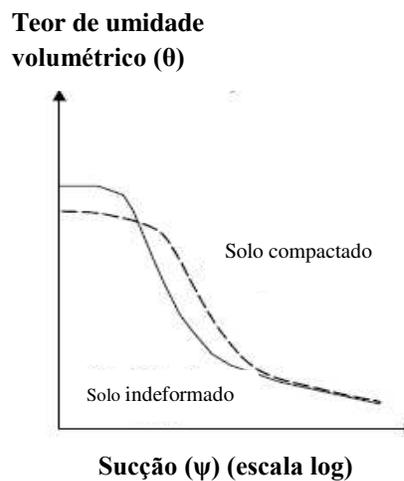
Figura 3.13 – Relação entre valores teor de umidade e sucção matricial (curva de retenção) para solos argilo-siltosos em diferentes condições de compactação



Fonte: Catana, Vanapalli e Carga, 2006.

Gerscovich (1994) e Gerscovich e Sayão (2002) comparam curvas de retenção de solos em estado natural e solos compactados, demonstrando que a compactação gera uma redução no volume dos poros maiores (macroporos) e pouco ou nenhum efeito nos poros menores (microporos) (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Típicos formatos de curvas de retenção influenciados pela estrutura dos solos (indeformado ou compactado)



Fonte: Gerscovich e Sayão, 2002.

Uma das diferenças de formato entre as curvas de solo compactado e não compactado (indeformado) pode ser explicado, segundo Perdomo (2010), devido ao fato que solos com maior quantidade de macroporos demoram mais a estabilizar e portanto apresentam curvas de retenção menos uniformes ou de maior declividade. Já os solos com microporos apresentam tendências de comportamentos mais estáveis. O autor atribui este fato à água escoar mais rapidamente entre os macroporos e relaciona a distribuição entre micro e macro porosidade diretamente com a curva de retenção.

3.5.2.3 Influência do Lixiviado nas Curvas de Retenção do Solo

A crescente contaminação do solo e água subterrânea pelo lixiviado gerado pelos resíduos sólidos produzidos e dispostos diariamente nas cidades ascende à necessidade de estudos que elaborem diagnósticos para determinar a retenção desses contaminantes no solo, visto que o conhecimento do comportamento desses passivos ambientais auxilia no gerenciamento e controle das contaminações e no projeto de barreiras de contenção (KORF et al., 2007).

Autores como Merayyan e Hope (2009) utilizam métodos diferenciados para estudo da determinação dos possíveis efeitos químicos e físicos que o lixiviado pode causar no solo de

aterros sanitários. O trabalho foca no ensaio para obtenção da curva de retenção do solo ao invés de utilizar métodos geotécnicos, como permeâmetros de parede rígida e flexível.

Segundo Merayyan e Hope (2009), o lixiviado tem potencialidade para mudar drasticamente a química dos fluidos nos poros do solo.

Merayyan e Hope (2009) estudaram curvas de retenção com sucção matricial na trajetória de secagem para dois fluidos diferenciados: lixiviado e água, com a finalidade de comparar possíveis diferenças nos resultados das curvas para cada fluido e, conseqüentemente, comparar os diferentes efeitos que o lixiviado provoca ao permear a barreira impermeabilizante de base de um aterro sanitário. Os autores utilizaram amostras de solo argiloso coletadas da área do aterro e compactados em umidade 3 a 4% acima da ótima. Os modelos matemáticos ensaiados para desempenhar o ajuste dos dados experimentais foram o de van Genuchten (1980) e Brooks Corey (1964), sendo que ambos forneceram resultados eficientes para esse propósito. Ambos os modelos apresentaram ajustes bastante próximos.

A Tabela 3.3 fornece os valores de sucção e respectivo teor de umidade gravimétrica medida no solo.

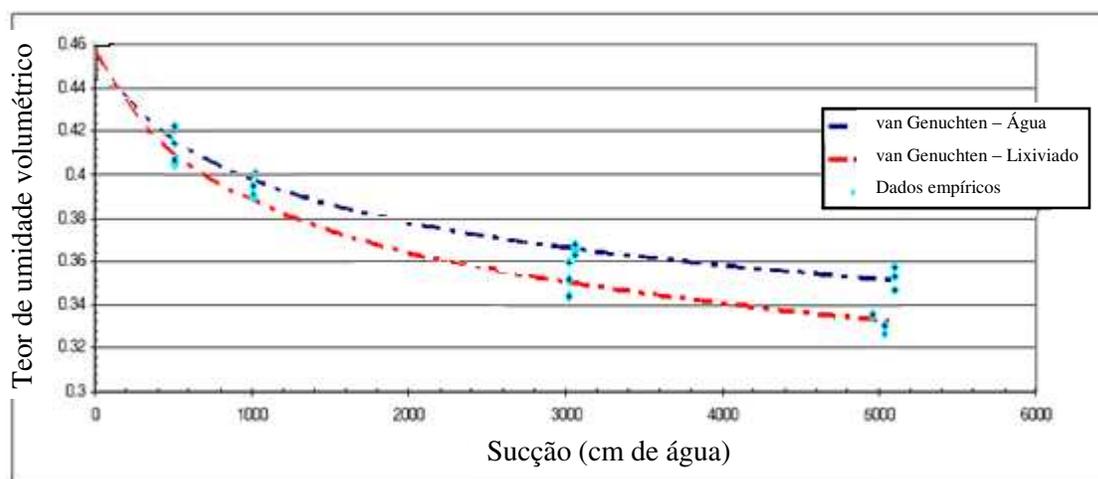
Tabela 3.3 – Resultados de dados experimentais (valores de sucção e respectivo teor de umidade volumétrica) do solo em trajetória de secagem

	Água	Lixiviado	
Sucção (kPa)	Teor de umidade gravimétrica	Teor de umidade gravimétrica	Diferenças de teor de umidade
50	0,2886	0,2792	0,0094
100	0,2729	0,2699	0,0031
300	0,2525	0,2423	0,0102
500	0,2436	0,2284	0,0152

Fonte: Merayyan e Hope, 2009.

A Figuras 3.15 ilustra as curvas de retenção do solo à água e ao lixiviado, em trajetória de secagem, a partir de modelos de van Genuchten (1980), obtidos por Merayyan e Hope (2009).

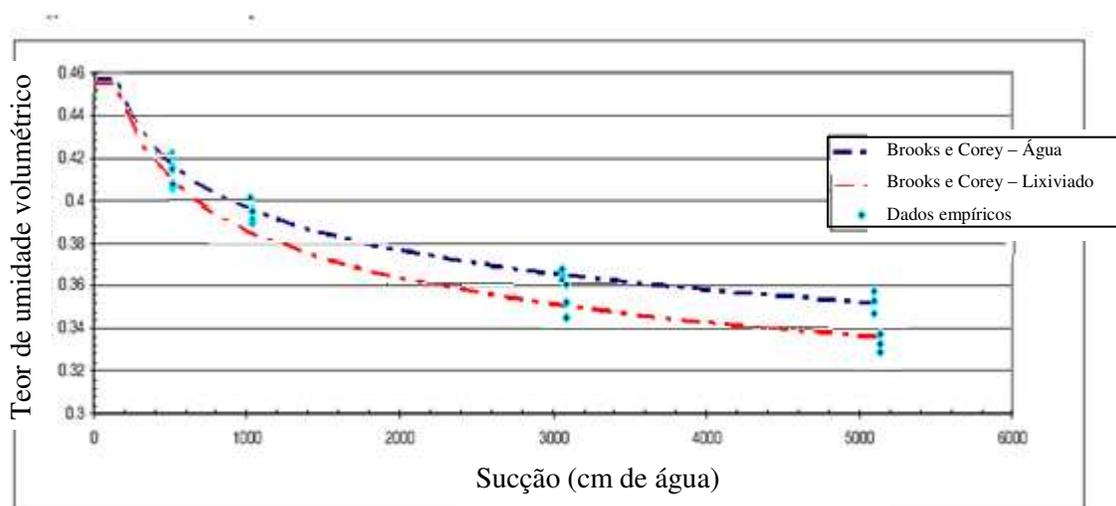
Figura 3.15 – Curva de retenção do solo para água e lixiviado em trajetória de secagem, modelado por van Genuchten (1980)



Fonte: Merayyan e Hope, 2009.

A Figura 3.16 ilustra as curvas de retenção do solo à água e ao lixiviado, em trajetória de secagem, a partir de modelos de Brooks e Corey (1964), obtidos por Merayyan e Hope (2009).

Figura 3.16 – Curva de retenção do solo para água em trajetória de secagem, modelado por Brooks e Corey (1964)



Fonte: Merayyan e Hope, 2009.

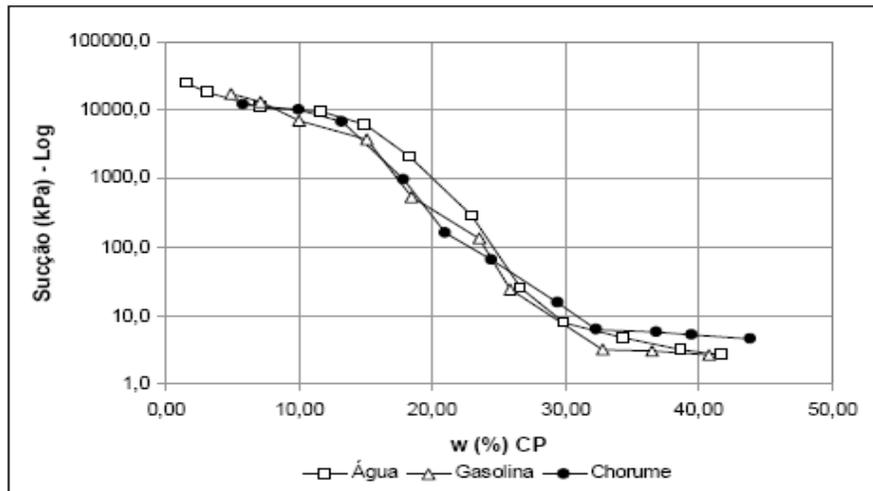
Como resultados da comparação entre os dados obtidos para curva de retenção do solo à água e para curva de retenção do solo ao lixiviado, em trajetória de secagem, Merayyan e Hope (2009) obtiveram que:

- As amostras permeadas com lixiviado resultaram em menores valores de teor de umidade em equilíbrio no solo;
- A diferença entre os valores de retenção no solo torna-se evidentemente distinta a partir da sucção matricial em valor de 400 cm de água (40 kPa);
- Maiores valores de sucção exibem maiores diferenças percentuais de retenção de teor umidade nos solos submetidos à água e ao lixiviado;
- O lixiviado causa aproximadamente 25% de diferenças nas curvas;
- Os efeitos do lixiviado afetam características individuais como: valores de entrada de ar, declividade e inflexão;
- O lixiviado provoca uma redução da sucção para um determinado teor de umidade e, conseqüentemente, causa um aumento do coeficiente de permeabilidade de uma comum barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários;

Descritos por Merayyan & Hope (2009), Ichola e Gaidi (2006), em estudo similar, também obtiveram resultados de que o lixiviado causa aumento do coeficiente de permeabilidade dos solos de barreiras de base de aterros.

Silva, Murrieta e Cardim (2007) estudaram as influências dos contaminantes gasolina e lixiviado (chorume) na sucção de um silte de baixa plasticidade (classificação SUCS) e de uma argila-arenosa laterítica (classificação MCT). Os autores obtiveram curvas de retenção pelo umedecimento dos contaminantes e à água, para fins comparativos. As curvas de retenção (Figura 3.17) e os seus respectivos resultados foram:

Figura 3.17 – Curvas de retenção para água, gasolina e lixiviado (chorume), através da trajetória de umedecimento



Fonte: Silva, Murrieta e Cardim, 2007.

- As curvas apresentam poucas variações de sucção para valores de umidade até 12%, aproximadamente;
- Com o aumento do grau de saturação, percebe-se uma queda dos valores de sucção de forma suave, se acentuando entre 18 e 30% de teor de umidade;
- A influência do aumento da umidade na sucção vai sendo reduzida a partir de 30%, verificando novamente pequenas variações da sucção com o aumento da saturação;
- No teor de umidade natural (22%), o valor da sucção para a água é de, aproximadamente, 500 kPa. Na presença de gasolina, nesse mesmo teor de umidade, a sucção do solo reduziu em aproximadamente 400 kPa passando para o valor de 100kPa. Já na presença de lixiviado, reduziu-se para o valor de 90 kPa;

Provavelmente, a redução dos valores de sucção na presença dos contaminantes (gasolina e lixiviado) ocorreu devido à alteração do raio do menisco entre os grãos e/ou atuação das propriedades hidráulicas dos líquidos, como a viscosidade e a velocidade de fluxo (SILVA, MURRIETA e CARDIM, 2007).

- O lixiviado causou variações um pouco maiores do que a gasolina;

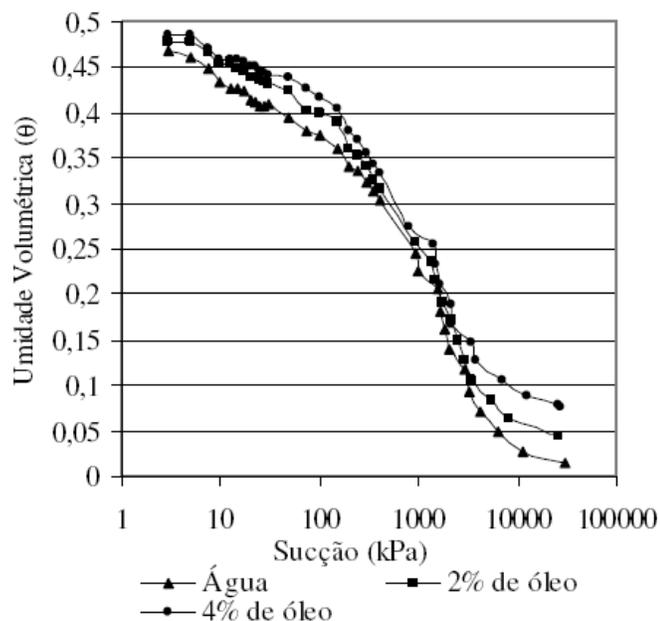
Silva, Murrieta e Cardim (2007) explicam esse fato devido à ação do lixiviado frente à alteração do arranjo entre os grãos e agregações do solo, rompendo os agentes cimentantes que os interliga. Segundo os autores, o lixiviado ocasiona ação dispersiva nos agentes cimentantes do solo.

A alteração da matriz (estrutura) do solo, pelo fluxo de gasolina e de lixiviado no solo, pode contribuir para modificações nos níveis de sucção e também modificar o coeficiente de permeabilidade do mesmo, podendo até influenciar nas propriedades de retenção dos contaminantes no meio poroso (SILVA, MURRIETA e CARDIM, 2007).

Wada e Futai (2007) não realizaram estudos com lixiviado diretamente, mas estudaram a compactação do solo (areia siltosa) misturado a distintas concentrações de óleo mineral, o qual também é um contaminante, a fim de avaliar os valores de sucção. O ensaio foi realizado com a trajetória de secagem e utilizou-se o modelo de van Genuchten (1980) para obtenção da curva de retenção.

Nas curvas de retenção para quantidades de 2% e 4% de óleo mineral (Figura 3.18), os autores observam o aumento da sucção de acordo com a redução do teor de umidade, o que é esperado, e também que quanto maior a concentração de óleo contida na amostra, maior é o teor de umidade volumétrica residual. Segundo Wada e Futai (2007), a causa provável para isso é a presença do óleo que não evapora na secagem do corpo de prova ao ar.

Figura 3.18 – Curvas de retenção para água, 2% de óleo e 4% de óleo misturado ao solo



Fonte: Wada e Futai, 2007.

Os valores dos parâmetros de teor de umidade volumétrica saturada (θ_{sat}) e umidade volumétrica residual (θ_r) das curvas de retenção para quantidades de 2% e 4% de óleo mineral, obtidos por Wada e Futai (2007) são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores de teor de umidade volumétrica saturada (θ_{sat}) e umidade volumétrica residual (θ_r) das curvas de retenção para quantidades de 2% e 4% de óleo mineral

Amostras			
Parâmetro	Água	2% óleo	4% óleo
θ_{sat}	0,470	0,480	0,485
θ_r	0,000	0,040	0,065

Fonte: Wada e Futai, 2007.

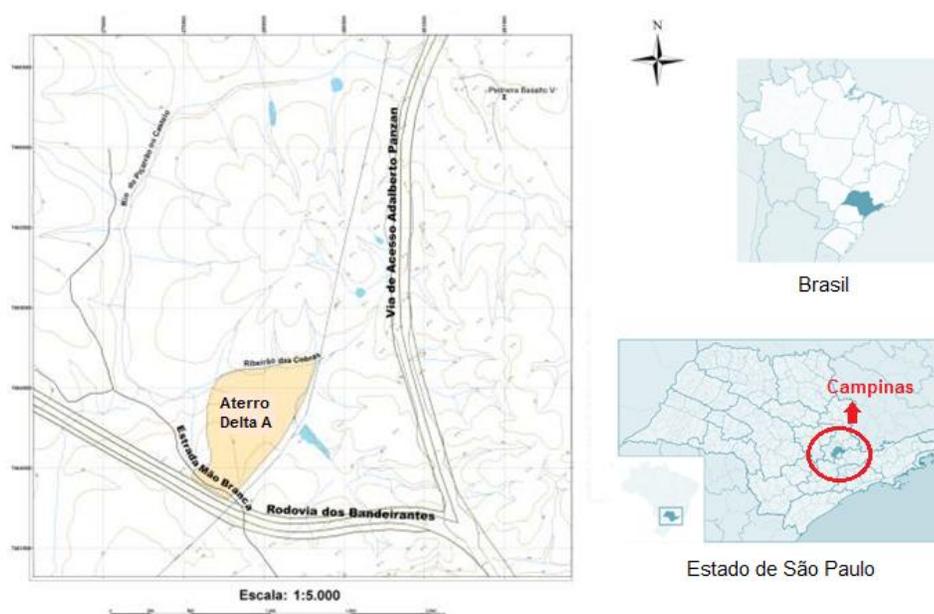
Pelas curvas ajustadas, Wada e Futai (2007) concluíram que: os valores de entrada de ar são baixos e próximos uns aos outros (cerca de 7 a 8 kPa), a retenção de água é maior quando o teor de óleo presente no corpo-de-prova é maior e que existe uma diferença no teor de umidade residual θ_r [cm^3/cm^3], o que indica a possível retenção de óleo.

4 LOCAL DE ESTUDO

O solo estudado nesta pesquisa refere-se ao solo da camada mineral compactada que é parte do sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental construída dentro da área do Aterro Sanitário Delta A.

O Aterro Sanitário Delta A está localizado no município de Campinas, no Estado de São Paulo, próximo à Rodovia dos Bandeirantes e a uma distância aproximada de 20 km do centro urbano da cidade. Seus limites físicos são a Estrada “Mão Branca”, um ramal ferroviário da Ferrovia Paulista S.A. (FEPASA) e o córrego Rio das Cobras no bairro Jardim Campo Grande (SANTOS, 2011) (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Mapas de localização do Aterro Sanitário Delta A



Fonte: Adaptado de Santos, 2011.

A disposição de resíduos no Aterro Delta A iniciou em 1992 e desde então recebe resíduos Classe IIA (Não Perigoso Não Inerte) e IIB (Não Perigoso Inerte), os quais compreendem os resíduos residenciais, dos serviços de poda de árvores e capinação do município, materiais diversos como entulhos de construção civil, resíduos sólidos de serviços de saúde após tratamento por micro-ondas, entre outros (CEPEA e FEALQ, 2005). Atualmente, a

cidade de Campinas gera aproximadamente 750,1 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos, destinados ao Aterro Delta A (CETESB, 2012).

Já a célula experimental foi construída a partir da cota 630 m do Aterro Delta A, localizando-se acima de um maciço de resíduos já depositados no aterro. Suas dimensões laterais são de aproximadamente 70m x 80m e suas características construtivas e de disposição dos resíduos foram iguais às já utilizadas correntemente na operação do aterro Delta A, de modo a ser representativa desse empreendimento. Segundo Bennati, Leme e Miguel (2012), o objetivo da célula não era obter características operacionais otimizadas ou propor modificações nas rotinas operacionais do Aterro, uma vez que este empreendimento já se encontra em fase de encerramento.

Na Figura 4.2 observa-se a localização da célula experimental dentro da área do Aterro Delta A, representada na ilustração pelo polígono vermelho indicado pela seta.

Figura 4.2 – Localização da célula experimental dentro da área do Aterro Delta A



Fonte: Adaptado de Benatti, Leme e Miguel, 2012.

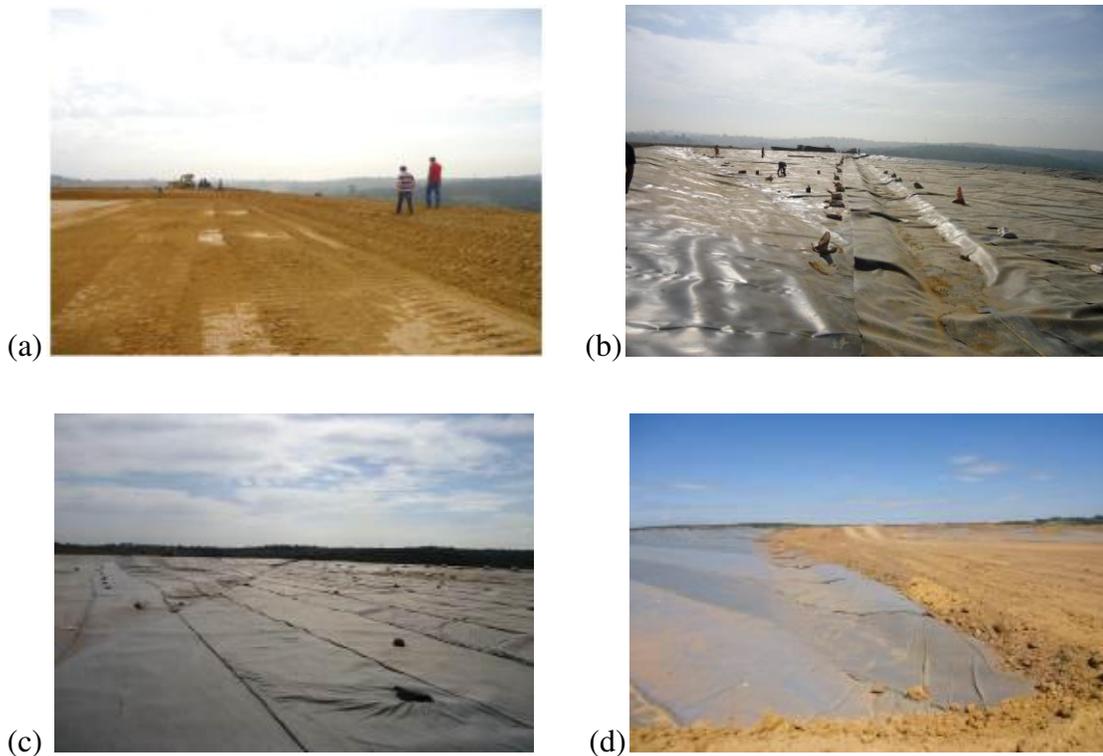
A célula, em estrutura, compreende um sistema impermeabilizante de base, sistema de drenagem do lixiviado, camada de resíduo sólido urbano (RSU), sistema de drenagem de gases, sistema de cobertura, sistema de drenagem de água superficial, instrumentação e monitoramento. Essas estruturas são detalhadas a seguir:

4.1 Sistema Impermeabilizante de Base

Consiste de uma barreira de 50 cm de espessura de solo compactado, coletado de uma jazida localizada nas proximidades do aterro, e taludes que cercam a célula, com altura de 1 m e inclinações de 3:1 (Horizontal:Vertical), com a finalidade tanto para confinar o RSU disposto, quanto a fornecer suporte aos maquinários responsáveis pela compactação desses RSU (Figura 4.3 item (a)). Visto que a barreira de solo compactado é foco deste trabalho, sua concepção é descrita detalhadamente no Item 5.1.

Sobre a barreira de solo compactado nivelado e os taludes, há uma camada de geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura (Figura 4.3 item (b)). Acima da geomembrana, arranja-se uma camada de geotêxtil (300g/m^2) (Figura 4.3 item (c)) e sobre este, uma camada de proteção de solo compactado de 10 cm (Figura 4.3 item (d)), com a finalidade de proteção termomecânica da geomembrana.

Figura 4.3 – Detalhes construtivos da célula experimental, no Aterro Delta A: (a) Camada de solo compactado e parte do talude lateral; (b) Geomembrana instalada sobre a camada de solo compactado; (c) Geotêxtil instalado acima da camada de geomembrana e (d) Camada de solo de proteção depositado acima do geotêxtil



Fonte: Própria autora, 2012.

4.2 Sistema de Drenagem do Lixiviado

Consiste de uma canaleta de 1 m de largura e 30 cm de profundidade, construída na barreira de 50 cm de espessura de solo compactado (Item 4.1) e em sentido diagonal da célula. Sua inclinação mínima é de 1,5%, o que permite recolher o lixiviado gerado pelo RSU disposto na célula e conduzi-lo para o exterior desta (Figura 4.4).

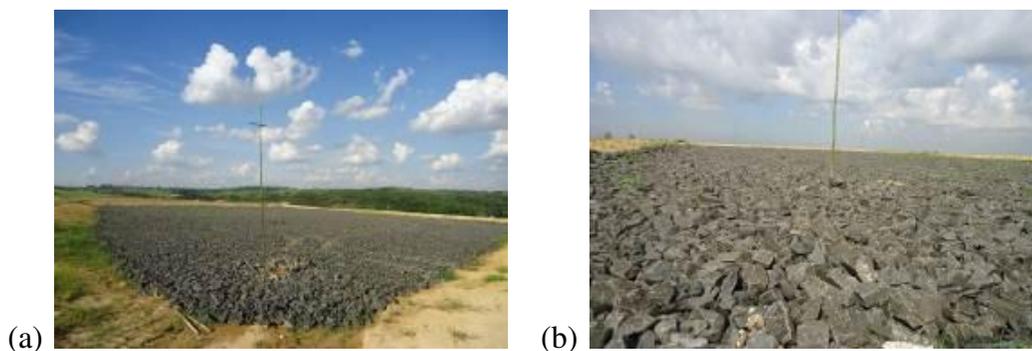
Figura 4.4 – Detalhe construtivo da célula experimental, no Aterro Delta A: Canaleta de drenagem de lixiviado



Fonte: Própria autora, 2012.

Acima da camada de solo de proteção termomecânica da geomembrana (Item 4.1), em complemento à canaleta de lixiviado, há disposta uma camada de 30 cm de “rachão”, denominada de colchão drenante (Figura 4.5), com finalidade de proporcionar uma drenagem eficiente do lixiviado produzido.

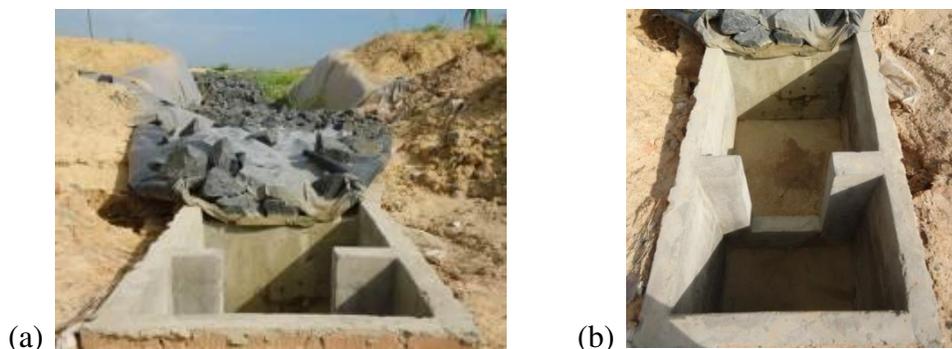
Figura 4.5 – Detalhes construtivos da célula experimental, no Aterro Delta A: (a) Colchão drenante e (b) Detalhe do material “rachão”



Fonte: Própria autora, 2012.

Externo à célula e na extremidade da canaleta de drenagem do lixiviado, há um sistema de medição de vazão de líquidos lixiviados, constituído por uma caixa externa (Figura 4.6). Após o lixiviado gerado da célula passar pela caixa externa e ter sua vazão medida, ele é conduzido para um dreno vertical de gás do aterro Delta A, onde se une ao lixiviado produzido dentro do maciço principal.

Figura 4.6 – Detalhes construtivos da célula experimental, no Aterro Delta A: (a) Sistema de medição de líquidos lixiviados, ligado à canaleta de drenagem, na saída (externo) à célula; (b) Detalhe da caixa externa



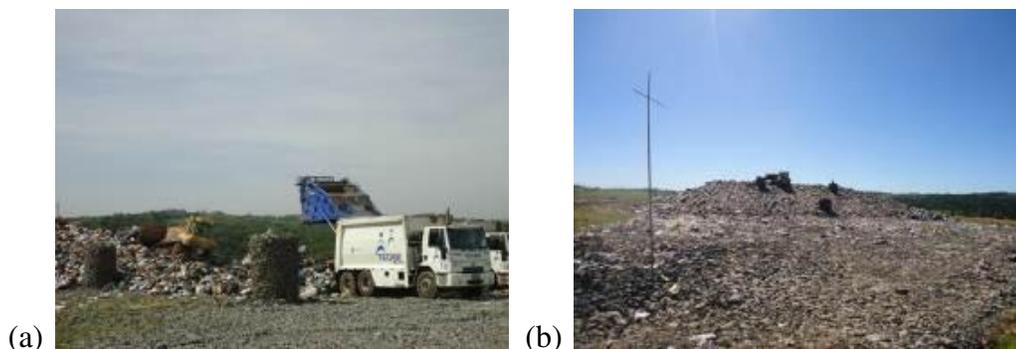
Fonte: Própria autora, 2012.

4.3 Camada de Resíduo Sólido Urbano (RSU)

O RSU disposto e compactado na célula compreende uma camada inicial de 5 m de altura e volume aproximado de 16100 m³, localizados acima do colchão drenante (Item 4.2). Esses resíduos são provenientes de bairros residenciais e comerciais, enquadrados nas categorias de resíduos Classe IIA (Não Perigoso Não Inerte) e IIB (Não Perigoso Inerte), assim como os recebidos pelo Aterro.

Os procedimentos para compactação do RSU foram os mesmos utilizados correntemente no aterro Delta A, que consistem em 3 passadas de trator esteira do tipo D6-N sobre uma camada de 20 a 30 cm de resíduos. Na Figura 4.7 demonstra-se a disposição e compactação do RSU na célula experimental.

Figura 4.7 – Disposição de RSU na célula experimental: (a) Chegada e disposição dos resíduos na célula, sobre o colchão drenante e equipamento (trator esteira D6-N) efetuando compactação sobre camada de resíduos e (b) Célula preenchida com resíduos



Fonte: Própria autora, 2012.

4.4 Sistema de Drenagem de Gases

Compreende 5 drenos verticais distribuídos pela célula. Cada dreno é composto por um tubo dreno de 30 cm de diâmetro de concreto perfurado por toda parede (Figura 4.8 item (a)), envolto por “rachão” contido por uma armação de seção circular de diâmetro de 1,5 m constituída por telas com malha de 10 x 10 cm soldadas (Figura 4.8 item (b)).

Figura 4.8 – Drenagem dos gases na célula experimental: (a) Estrutura do tubo dreno de concreto perfurado; (b) Estrutura de tubo dreno de concreto envolto em armação de arame preenchida com rachão e (c) Drenos distribuídos pela célula antes da disposição de resíduos

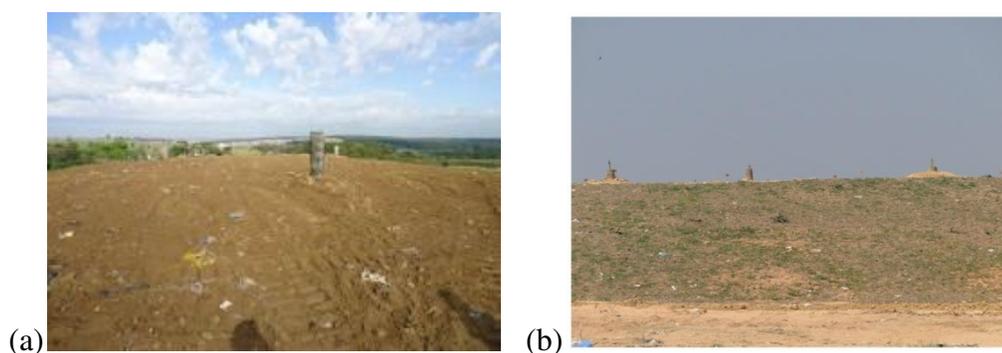


Fonte: Própria autora, 2012.

4.5 Sistema de Cobertura

Consiste de uma camada de 60 cm de espessura de solo (Figura 4.9 item (a)) proveniente da mesma jazida que forneceu material para a concepção da barreira de solo compactado do sistema impermeabilizante de base da célula (Item 4.1). E acima dela, uma camada de 20 cm de solo vegetal que recebeu plantio de grama (Figura 4.9 item (b)).

Figura 4.9 – Sistema de cobertura da célula experimental: (a) Camada de solo e (b) Camada de solo vegetal que recebeu plantio de grama



Fonte: Própria autora, 2012.

4.6 Sistema de Drenagem de Água Superficial

Este sistema é composto por drenos superficiais, de material “rachão”, interligados ao sistema de drenagem de águas superficiais do aterro Delta A. Ele tem por função a captação e desvio das águas pluviais, reduzindo a infiltração dessa águas no maciço de resíduos.

4.7 Instrumentação e Monitoramento

O sistema de instrumentação e monitoramento da célula experimental compreende 5 piezômetros para acompanhamento dos níveis de pressão líquido (lixiviado) dentro da célula, 5 placas de recalque instaladas na base da célula, em nível ao colchão drenante, para acompanhamento do deslocamento do maciço subjacente e 40 marcos superficiais distribuídos

entre as camadas de cobertura e camada externa à célula, a fim de acompanhar os deslocamentos da própria célula.

A instalação da instrumentação realizou-se em duas etapas: uma antes do início da disposição do resíduo, na qual foram instaladas as placas de recalque na base da célula e os marcos superficiais na região externa, e outra após a conclusão da célula, na qual foram instalados os marcos superficiais sobre a cobertura final.

5 METODOLOGIA

5.1 Concepção da Barreira de Solo Compactado da Célula Experimental

O solo utilizado na barreira impermeabilizante de base foi coletado e transportado de uma jazida localizada nas proximidades do Aterro Delta A, dentro da área do próprio empreendimento.

A compactação do solo da barreira impermeabilizante de base, em campo, foi realizada pelo lançamento de 3 camadas subsequentes de solo, denominadas como 1^a, 2^a e 3^a camadas, de acordo com a ordem de deposição na célula. Cada camada recebeu 8 “passadas” de equipamento compactador do tipo “pé-de-carneiro”, de rolo SPV 84 fabricado pela Tema Terra Equipamentos Ltda. As alturas finais dessas camadas, após compactação, foram de 20, 20 e 10 cm, respectivamente (Figura 5.1).

Após compactada a 3^a camada, a barreira foi finalizada com a passagem de um equipamento do tipo “rolo liso” para eliminação de irregularidades no terreno.

Figura 5.1 – Detalhes da concepção da barreira de solo compactado do sistema impermeabilizante de base da célula experimental: (a) Equipamento compactando as camadas de solo; (b) Detalhe do rolo “pé-de-carneiro”; (c) Detalhe do solo logo após compactação por rolo “pé-de-carneiro” e (d) Detalhe da camada de solo livre de irregularidades do terreno



Fonte: Própria autora, 2012.

Os dados de compactação foram medidos por ensaios de campo (in situ) e em laboratório. Os ensaios “in situ” realizados foram: Determinação da massa específica do solo (γ) [g/cm^3], com emprego do frasco de areia (ABNT, 1986c) e Determinação do teor de umidade (w) [%] através de equipamento “Speedy Moisture” (DNER, 1994) (Figura 5.2). Já os ensaios de laboratório compreenderam: Determinação da massa específica do solo (γ) [g/cm^3], com emprego de balança hidrostática (ABNT, 1988) e Determinação de teor de umidade (w) [%] por método da Estufa (ABNT, 1986a).

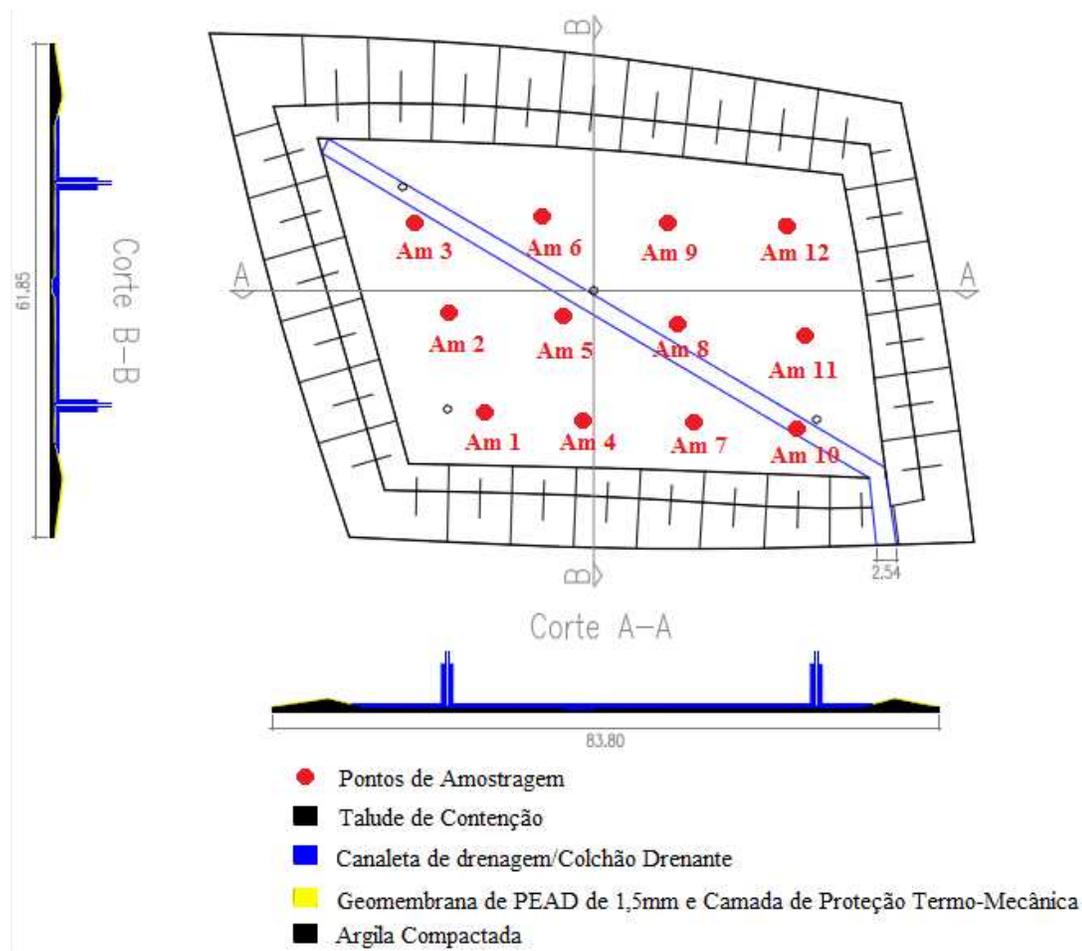
Figura 5.2 – Detalhes dos ensaios de campo (“in situ”) para medição de dados de compactação da barreira de base da célula experimental: (a) Frasco de areia e (b) Equipamento “Speedy Moisture”



Fonte: Própria autora, 2012.

Para os ensaios de laboratório, amostras de solo eram coletadas imediatamente após a compactação de cada subcamada e armazenadas em recipientes herméticos para serem transportadas ao Laboratório de Solos e Estradas “Luiz Eduardo Meyer” – LMSE, pertencente à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP. As amostras foram retiradas de pontos dispersos por toda a célula, totalizando 12 pontos por subcamada, como demonstra a Figura 5.3.

Figura 5.3 – Croqui geral do sistema impermeabilizante de base da célula experimental (antes da colocação do RSU) com indicação dos pontos de coleta de amostras para ensaio de laboratório



Fonte: Adaptado de Benatti, Leme e Miguel, 2012.

5.2 Caracterização do Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental

A caracterização do solo da barreira compactada do sistema impermeabilizante de base da célula experimental foi fundamentada em ensaios geotécnicos, físico-químicos e mineralógicos. As amostras de solo foram coletadas da mesma jazida que forneceu material para a concepção desta barreira na célula experimental.

Observando o perfil da jazida, verificou-se que este apresentava três horizontes de solos com colorações distintas, portanto optou-se por coletar e armazenar separadamente amostras de solos de cada horizonte. Cada horizonte foi nomeado por: Base (horizonte mais distante da superfície original do terreno), Intermediário e Topo (horizonte mais próximo da superfície original do terreno). Para facilitar, no texto serão descritas as letras B para o solo ou amostras do solo do horizonte de Base, I para o Intermediário e T para o de Topo (Figura 5.4).

Figura 5.4 – Amostras de solo coletadas dos três horizontes da jazida: Base, Intermediário e Topo, respectivamente



Fonte: Própria autora, 2012.

Ressalta-se que durante a concepção da barreira de solo compactado do sistema impermeabilizante de base da célula experimental não houve segregação dos solos conforme horizontes da jazida. A separação de amostras foi efetuada apenas para realizar uma caracterização minuciosa deste solo, visto que até então nada sabia sobre as características dele.

Foi gerada em laboratório uma mistura das amostras dos solos B, I e T, com a finalidade de representar o solo utilizado na barreira de solo compactado do sistema impermeabilizante de base da célula experimental. Essa mistura baseou-se nas diferenças de extensões das profundidades de cada horizonte no talude da jazida. As medidas foram de 0,8 m para o horizonte de solo T, 1,6 m para I e 1,4 m para B. Passadas essas medidas para porcentagem, a mistura conteve 21% de solo proveniente do horizonte T, 42% de solo I e 37% de solo B, em massa seca.

A mistura de solos é denominada ao longo do trabalho como M e as diferenças nas extensões dos horizontes no talude da jazida é observado na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Horizontes do solo exposto no talude da Jazida que forneceu material para concepção da camada de solo compactado da barreira impermeabilizante de base da célula experimental – Sem escala



Fonte: Própria autora, 2012.

A mistura teve sua caracterização realizada pelos mesmos ensaios empregados nas amostras de solo B, I e T. Adicionalmente, a mistura também foi utilizada em ensaios para obtenção das curvas de retenção à água destilada e ao lixiviado, determinação do coeficiente de permeabilidade saturada, porosimetria e determinação do ponto de carga zero do solo (PCZ).

Os ensaios de caracterização realizados e seus métodos são descritos, individualmente, nos Itens seguintes.

5.2.1 Ensaios de Caracterização Geotécnica

5.2.1.1 Análise Granulométrica

Este ensaio foi realizado conforme os procedimentos contidos na NBR 7181 (ABNT, 1984d) com e sem o emprego de solução defloculante hexametáfosfato de sódio (de concentração de 45,7g do sal por 1000 cm³ de água destilada).

5.2.1.2 Massa Específica dos Sólidos

Este ensaio foi realizado conforme os procedimentos descritos na NBR 6508 (ABNT, 1984b).

5.2.1.3 Limites de Consistência

Os valores dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram obtidos seguindo os procedimentos da NBR 6459 (ABNT, 1984a) e da NBR 7180 (ABNT, 1984c), respectivamente.

Com os dados dos limites de consistência e da análise granulométrica (Item 5.2.1.1), foi obtida também a classificação das amostras de solo pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), segundo a norma D2487 (ASTM, 2011).

5.2.1.4 Compactação na Energia Proctor Normal

A compactação do solo foi realizada seguindo a descrição da NBR 7182 (ABNT, 1986b), na energia Proctor Normal.

5.2.1.5 Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão

Os ensaios de compactação Mini-MCV e de Perda de Massa por Imersão seguiram as proposições de Nogami e Villibor (1995). Esses ensaios permitem obter as classificações MCT das amostras de solos, importante para indicar o real comportamento dos solos tropicais e suas peculiaridades.

O ensaio foi realizado com no mínimo 5 porções de solos com teores de umidade diferentes. Cada porção de 200 g de solo é colocada em molde específico de ensaio e submetida a golpes crescentes sucessivos (soquete) de: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, ...n, ...4n. A cada golpe, determina-se a altura A_n do corpo-de-prova, parando-se os golpes quando as medidas sucessivas derem diferença menor que 0,1 mm, 4n atingir 256 golpes ou houver nítida expulsão de água (exsudação). Os moldes são então retirados do compactador e utilizados no ensaio de Perda de Massa por Imersão.

Das alturas A_n dos corpos-de-prova em compactação, calculam-se as massas específicas aparentes secas, obtendo as Curvas de Compactação. Dessas curvas, obtêm-se o coeficiente d' , que é a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes no ensaio Mini-MCV, medida nas adjacências da massa específica aparente seca máxima (Cozzolino e Nogami, 1993; Nogami e Villibor, 1995).

Pelos dados do ensaio, são traçadas também as curvas de n (número de golpes de referência) em função de $a_n = A_n - A_{4n}$, utilizando escala \log_{10} . Estas curvas são denominadas de Curvas Mini-MCV e a partir delas é obtido o coeficiente c' , que é o coeficiente angular de uma reta interpolada graficamente em intersecção horizontal correspondente a $a_n = 2$ mm e número de golpes = 10 ou 15. Essa reta é obtida por interpolação com base na inclinação das Curvas Mini-MCV existentes próximas a ela (Nogami e Villibor, 1995).

O ensaio de perda de massa por imersão é realizado através da extração de 10 mm dos corpos-de-prova obtidos pela compactação Mini-MCV e submersão deles em água por no mínimo 20 horas. Após passado esse tempo, são obtidas a porcentagem da porção de solo desagregada, em massa seca, obtendo assim a perda de massa por imersão em água (P_i) a ser usado para fins classificatórios. O valor de P_i é obtido por interpolação gráfica, traçando-se a

curva de variação das porcentagens das porções de solo desagregadas em função do Mini-MCV e procurando-se o valor correspondente a Mini-MCV 10 ou 15, conforme se trate de solo de baixa (altura final do corpo-de-prova for igual ou maior que 48 mm) ou elevada massa específica aparente (altura final do corpo-de-prova for menor que 48 mm), respectivamente (Nogami e Villibor, 1995).

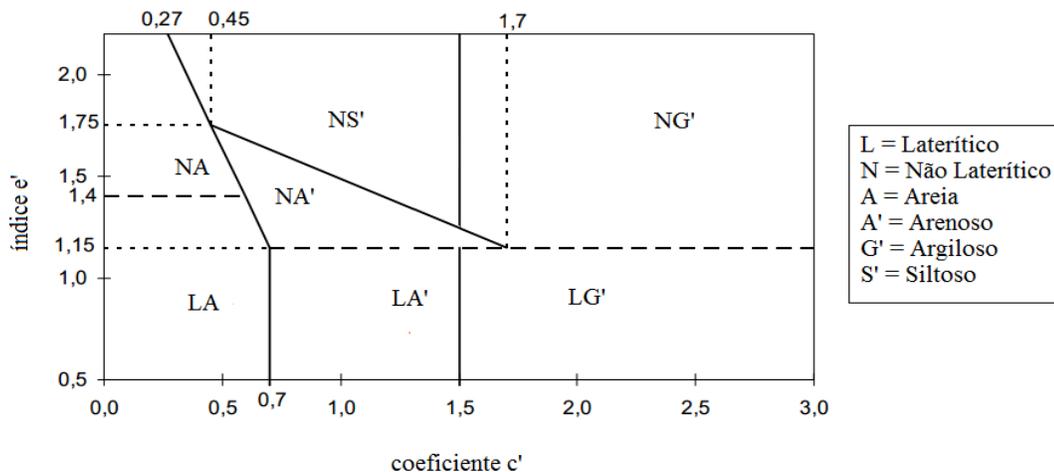
O índice e' é calculado pela Equação (5.1)

$$e' = \sqrt[3]{\frac{Pi}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (5.1)$$

em que Pi é a perda de massa por imersão em água; d' é o coeficiente que é a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes no ensaio Mini-MCV.

Através desses índices e coeficientes, a classificação MCT é obtida mediante o uso de um gráfico dado para esse propósito. Esse gráfico é ilustrado na Figura 5.6.

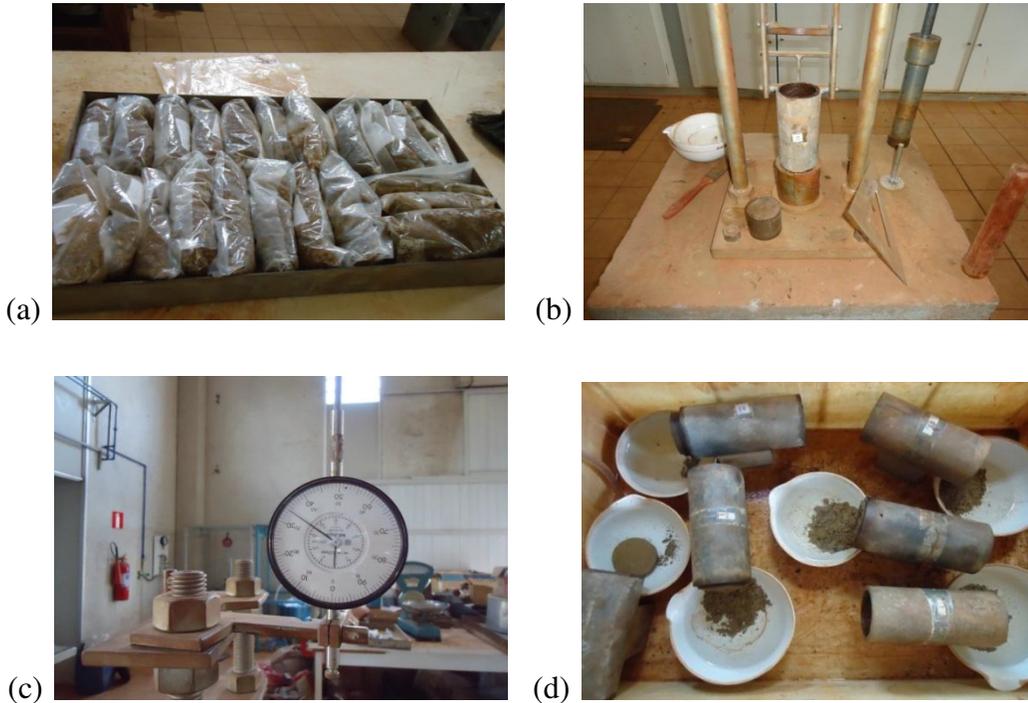
Figura 5.6 – Gráfico da classificação MCT



Fonte: Adaptado de Cozzolino e Nogami, 1993.

Etapas dos ensaios são demonstradas na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Detalhes das etapas dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão: (a) Amostras de solo preparadas e homogêneas em distintos teores de umidade; (b) Equipamento compactador; (c) Equipamento extensômetro (0,01 mm) usado para medição da altura A_n dos corpos-de-prova e (d) corpos-de-prova em fase final de ensaio de perda de massa por imersão



Fonte: Própria autora, 2013.

5.2.2 Ensaios de Caracterização Químico-Mineralógica

5.2.2.1 Difração de Raio-X

O procedimento de ensaio consistiu na desagregação da amostra de solo seca até granulometria correspondente à passada na peneira #200 (0,075 mm). Assim, foi transferido aproximadamente 1 grama dessa amostra para a porta-amostra própria do equipamento para realizar a incidência de feixes de raios-X e sua respectiva leitura.

O ensaio foi realizado em varredura de 3 a 70° (escala 2 θ) com velocidade de 1°/min (relativo à velocidade do Goniômetro) e sob radiação de fonte de raios-X do cobre (radiação CuK α).

A leitura do ensaio foi realizada através de comparações com padrões contidos em banco de dados pré-existentes. O equipamento utilizado foi um Difratorômetro de marca SIEMENS e modelo D 5000, com tubo de Cu e filtro de Ni.

5.2.2.2 Fluorescência de Raio-X

O método de análise utilizado foi o não destrutivo. Cerca de 1 a 2 g de cada amostra, separadamente, são levados a estufa a 110°C, onde permaneceram durante 12h. Após esse período, coloca-se a amostra em uma Mufla à 1000°C, onde permanecem por aproximadamente 3 horas.

Para a determinação de elementos maiores (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, NaO₂, K₂O e P₂O₅) são pesados com exatidão 0,72 g da amostra proveniente da Mufla e realizado a sua fusão com 6,5 g de tetraborato de lítio (LiB₄O₇). Os recipientes utilizados para a fusão são cadinhos especiais de platina (liga Pt-Au 99,5%). Após a fusão, as amostras são levados para leitura no porta-amostra do equipamento.

O equipamento utilizado foi um Espectrômetro sequencial, modelo PW 2400, marca PHILIPS, com porta-amostras de 102 posições. As leituras são feitas no próprio equipamento e os resultados são obtidos por curvas calibradas com cerca de 40 padrões internacionais para elementos maiores.

5.2.3 Caracterização Físico-Química

Foram avaliados o conjunto analítico básico e os macronutrientes encontrados nas amostras de solos B, I, T e M. Foi realizada também a determinação do ponto de carga zero da amostra de solo M.

Os procedimentos, aspectos de amostragem e instrumentação das análises do conjunto analítico básico e os macronutrientes seguiram as metodologias descritas no “Manual de Análises Químicas de Solos”, de Silva (2009).

A determinação do ponto de carga zero do solo foi realizada seguindo metodologia do Instituto Agrônomo de Campinas (Camargo et al, 2009).

Segundo Uehara e Gillman (1981) e Camargo et al. (2009), o ponto de carga zero (PCZ) é o valor do pH da solução em equilíbrio com o solo no qual a carga elétrica líquida da superfície é nula, logo neste pH há uma quantidade igual de cátions e ânions adsorvidos na superfície.

A metodologia consistiu no preparo da amostra de solo através de percolação de 200g de solo com 100 ml de ácido clorídrico (HCl 0,1N) por cinco vezes. Em seguida, foi feita a lavagem do solo com água deionizada até que não se detectou mais a saída de HCl. A medição da saída do HCl foi realizada pela condutividade elétrica do extrato (menor que 0,01mS/cm). O solo foi então seco em estufa de 110°C e passado em peneira de 2 mm.

Após o preparo da amostra, colocou-se 4 g de solo em 13 recipientes de 100 ml e adicionados em 7 deles solução de HCl 0,1M de 0 a 3 ml (de 0,5 em 0,5 ml) e nos outros 6 recipientes, adicionado solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,1M) de 0,5 a 3 ml (de 0,5 em 0,5 ml) e, em todos, 0,5 ml de solução de cloreto de cálcio (CaCl₂ 0,1M) e água destilada para completar 20 ml de solução (Tabela 5.1). Deixaram-se então equilibrar por quatro dias, agitando ocasionalmente duas vezes por dia. No quarto dia, foi feita a leitura do pH, sendo este valor denominado de pH_{0,002}.

Tabela 5.1 – Quantidade de solo, HCl, NaOH, CaCl₂ e água destilada em cada recipiente do ensaio de determinação do ponto de carga zero do solo M

Recipiente	Solo (g)	HCl 0,1M (ml)	NaOH 0,1M (ml)	CaCl ₂ 0,1M (ml)	Água destilada (ml)
1	4	0	-	0,5	19,5
2	4	0,5	-	0,5	19,0
3	4	1,0	-	0,5	18,5
4	4	1,5	-	0,5	18,0
5	4	2,0	-	0,5	17,5
6	4	2,5	-	0,5	17,0
7	4	3,0	-	0,5	16,5
8	4	-	0,5	0,5	19,0
9	4	-	1,0	0,5	18,5
10	4	-	1,5	0,5	18,0
11	4	-	2,0	0,5	17,5
12	4	-	2,5	0,5	17,0
13	4	-	3,0	0,5	16,5

Após leitura do pH_{0,002}, foi adicionado em cada recipiente 0,5 ml de solução de cloreto de cálcio (CaCl₂ 2,0M). Agitou-se por três horas e após esse período, fez-se a leitura do pH, designando-o de pH_{00,ti}.

Com os valores das leituras de pH_{0,002} e pH_{00,ti}, foram calculados para cada recipiente, o ΔpH pela Equação (5.2):

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{00,ti} - \text{pH}_{0,002} \quad (5.2)$$

em que ΔpH é a diferença do valor do pH_{00,ti} e pH_{0,002}; pH_{0,002} é a leitura do pH da solução CaCl₂ 0,1M + HCl 0,1M ou NaOH 0,1M em contato com a amostra de solo; pH_{00,ti} é a leitura do pH da solução CaCl₂ 0,1M + CaCl₂ 2,0M + HCl 0,1M ou NaOH 0,1M em contato com a amostra de solo;

Com os valores obtidos, foi plotado o gráfico de $\Delta\text{pH} \times \text{pH}_{0,002}$ para encontrar o $\Delta\text{pH} = 0$. Este pH foi definido como PCZ, valor independente da concentração salina da solução.

5.2.4 Permeabilidade à Carga Variável

O ensaio de permeabilidade a carga variável foi realizado com corpos-de-prova reconstituídos em laboratório, seguindo os procedimentos contidos na NBR 14545 (ABNT, 2000) para o método B, da norma. O ensaio foi realizado para a mistura (M) de solos.

Foram compactados dois corpos-de-prova, um para ensaio com água destilada e outro com o lixiviado gerado na célula experimental. Os corpos-de-prova foram compactados com os mesmos valores da compactação da barreira impermeabilizante de base da célula experimental. A amostra de lixiviado utilizado no ensaio foi caracterizada por análises físico-químicas realizadas no Laboratório de Saneamento da UNICAMP, de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA e WPCF, 1998), sendo elas: potencial hidrogeniônico – pH (método eletrométrico), alcalinidade (método titulométrico), ácidos orgânicos voláteis (método titulométrico), potencial redox (método eletrométrico), condutividade (método eletrométrico), Demanda Química de Oxigênio – DQO (método do refluxo fechado e espectrofotometria), nitrogênio amoniacal (método da destilação e titulometria) de Demanda Biológica de Oxigênio – DBO (método da diluição e incubação).

Os dois corpos-de-prova foram inicialmente saturados: um com água destilada e outro com lixiviado produzido na célula experimental de RSU. Depois da saturação por contra pressão, o primeiro corpo-de-prova foi submetido ao ensaio de permeabilidade à água destilada e o segundo ao lixiviado.

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente variando em torno de 27°C a 29°C para o ensaio à água e temperatura de 14 °C para ensaio ao lixiviado, visto que os ensaios foram realizados em épocas do ano diferentes. Para cada ensaio, foram executadas 10 medições.

Não foram utilizados materiais vedantes nas laterais e nem materiais filtrantes na base e topo dos corpos-de-prova, pois desejava-se a representação de campo, isto é, como ocorre na

barreira impermeabilizante de base da célula experimental. Apenas utilizou-se uma geomanta (material inerte) no topo dos corpos-de-prova para fins de distribuição uniforme do fluxo de água descendente, já que o uso de uma areia poderia acarretar contaminações no solo, caso esta possuísse impurezas (Figura 5.8).

Figura 5.8 – Geomanta utilizada em ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade saturada: (a) Geomanta cortada em dimensões a caber dentro do cilindro utilizado no ensaio e (b) Geomanta já dentro do cilindro sobre o corpo-de-prova



Fonte: Própria autora, 2013.

5.2.5 Curvas de Retenção

Para obtenção das curvas de retenção foi utilizado o método do papel filtro para as trajetórias de umedecimento e secagem (drenagem) à água destilada e ao lixiviado. Os procedimentos de execução do ensaio fundamentaram-se em maior parte na mesma utilizada por Bonder (2008).

Foram compactados corpos-de-prova da mistura dos solos (M) com os mesmos valores da compactação da barreira impermeabilizante de base da célula experimental. Após compactados, os corpos-de-prova foram moldados dentro de 12 anéis metálicos de altura e diâmetros médios de 2,1 e 4,9 cm, respectivamente. Os pesos dos anéis foram anotados antes da moldagem dos solos.

Os corpos-de-prova foram preparados com três repetições, sendo 3 anéis (nº 4, 8 e 13) para a técnica de umedecimento à água, 3 anéis (nº 6, 7 e 15) para técnica de secagem à água, 3

anéis (nº 17, 19 e 25) para técnica de umedecimento ao lixiviado e, por fim, 3 anéis (nº 2, 10 e 18) para técnica de secagem ao lixiviado.

Os corpos-de-prova correspondentes à secagem por água destilada foram submetidos ao processo de saturação, sendo colocados ordenadamente sobre um papel filtro cortado e ajustado às dimensões do corpo-de-prova para de reter fragmentos de solo que poderiam vir a desprender-se, e ainda sobre uma pedra porosa. Em seguida, todo esse conjunto foi alocado dentro de uma bandeja contendo água destilada. Como no processo de saturação realizado por Bonder (2008), a lâmina d'água da bandeja atingia metade da altura da pedra porosa, para que a mesma se mantivesse saturada e as amostras pudessem saturar-se por contrapressão.

A bandeja com água destilada, as pedras porosas, papel filtro e corpos-de-prova foram deixados dentro de uma câmara úmida (para manter umidade) durante o período de 5 dias.

Os corpos-de-prova correspondentes à trajetória de secagem por lixiviado também foram submetidos ao processo de saturação, como na trajetória de secagem à água, diferenciando apenas para o uso de lixiviado proveniente da célula experimental (coletado do dia 17/07/2012) ao invés de água destilada, simulando assim as condições de campo da barreira impermeabilizante de base (Figura 5.9).

Figura 5.9 – Corpos-de-prova submetidos à saturação ao lixiviado da célula experimental



Fonte: Própria autora, 2012.

No entanto, os corpos-de-prova não conseguiram saturar em 5 dias como para a água. Assim, foi adicionada uma lâmina maior do mesmo lixiviado (17/07/2012) e aguardada a saturação por mais 18 dias, totalizando 23 dias. E mesmo após 23 dias totais (até dia 08/08/2012),

os corpos-de-prova ainda não estavam completamente saturados, portanto foi decidido pingar 20 gotas do mesmo lixiviado (do dia 17/07/2012) do lado do corpo-de-prova que se encontravam menos umedecido pelo lixiviado para tentar obter um maior umedecimento e iniciar o ensaio (Figura 5.10).

Figura 5.10 – Umedecimento com lixiviado das superfícies secas dos corpos-de-prova submetidos ao processo de secagem para obtenção das curvas de retenção



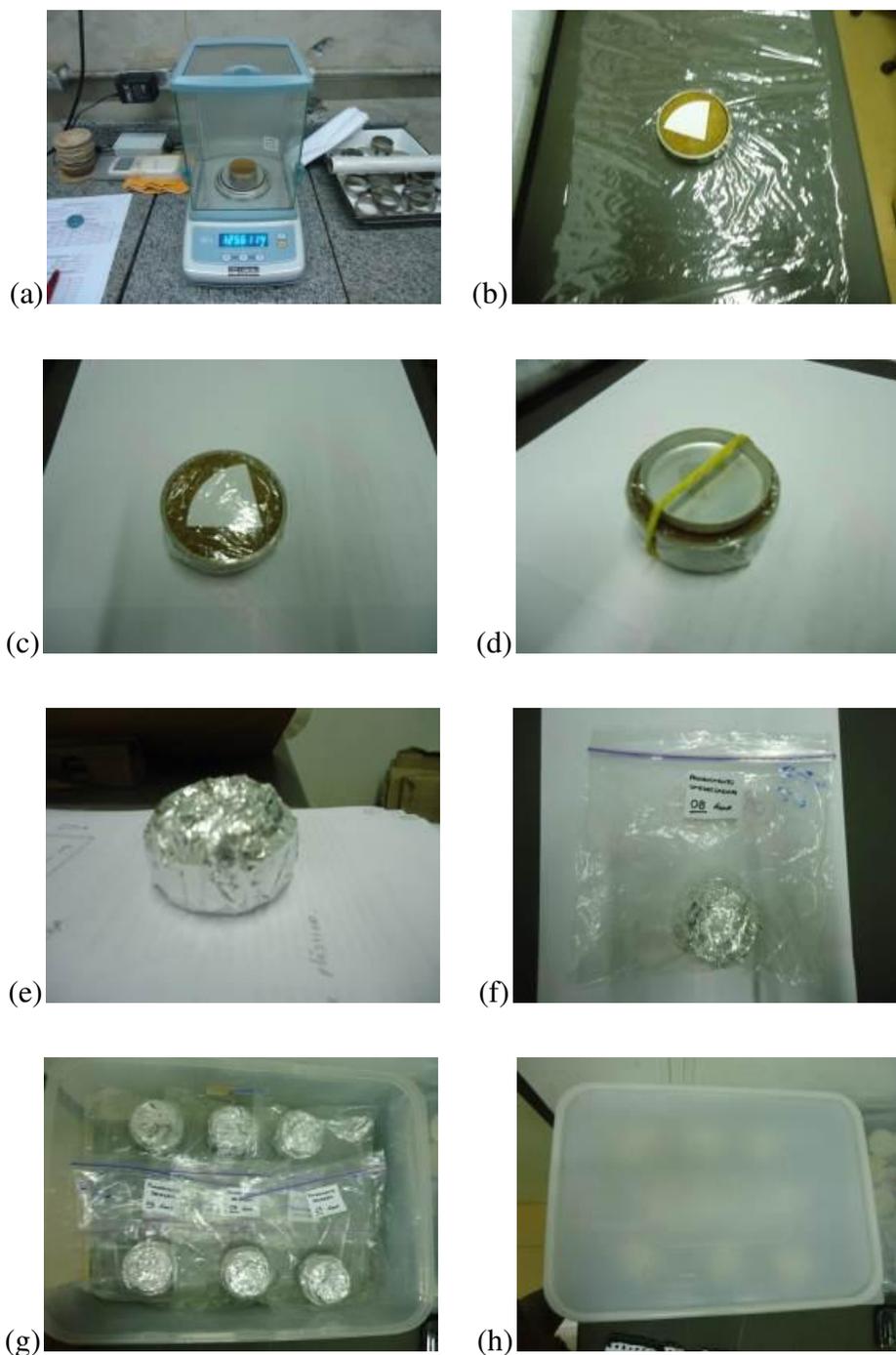
Fonte: Própria autora, 2012.

Para o processo de umedecimento, tanto à água, quanto ao lixiviado, os corpos-de-prova foram secos ao ambiente durante período de 5 dias, a fim de possibilitar o início do ensaio em condições de baixa umidade (cerca de 2%) para os solos.

A literatura propõe, segundo Bonder (2008), que os processos de secagem e umedecimento partam da umidade natural de campo, mas assim como em sua pesquisa, preferiu-se iniciar pelas extremas condições de umidade a fim de observar o fenômeno da *histerese*.

Após saturação e secagem dos corpos-de-prova, o procedimento, de início, consistiu ordenadamente de pesagem do conjunto anel e solo (Figura 5.11 item (a)), locação de $\frac{1}{4}$ (um quarto) de papel filtro Whatmann^o 42 sobre contato direto em um dos lados do corpo-de-prova (Figura 5.11 item (b)), embrulho desse conjunto (anel, solo e papel filtro) em filme plástico PVC transparente (Figura 5.11 item (c)), emprego de uma sobrecarga sobre o lado com o papel filtro (Figura 5.11 Item (d)) e um segundo embrulho com papel alumínio (Figura 5.11 item (e)). Este conjugado foi então inserido dentro de um saco plástico fechado do tipo Ziploc (Figura 5.11 item (f)) e armazenado dentro de uma caixa plástica vedada (Figura 5.11 itens (g) e (h)).

Figura 5.11 – Detalhes do procedimento inicial do ensaio de papel filtro (curva de retenção) à água destilada: (a) Pesagem do conjunto anel e solo; (b) Locação de $\frac{1}{4}$ (um quarto) de papel filtro Whatmann^o 42 sobre contato direto em um dos lados do corpo-de-prova; (c) Embrulho do conjunto anel, solo e papel filtro em filme plástico PVC transparente; (d) Emprego de uma sobrecarga sobre o papel filtro; (e) Embrulho com papel alumínio; (f) Conjunto inserido dentro de um saco plástico fechado do tipo Ziploc; (g) Armazenamento dentro de uma caixa plástica e (h) Caixa plástica vedada



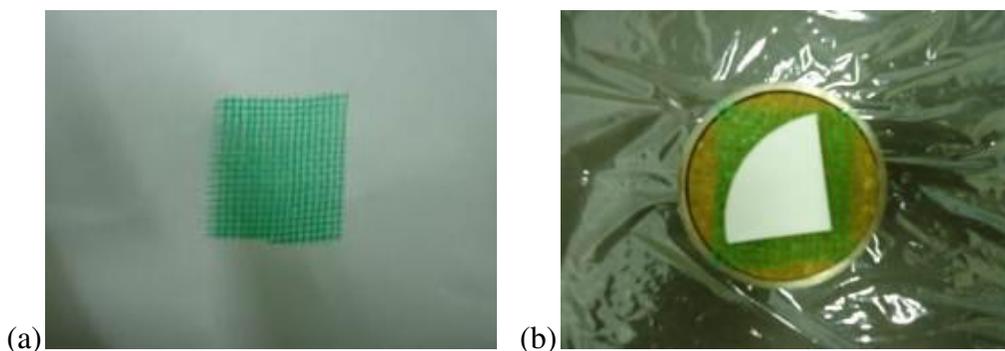
Fonte: Própria autora, 2012.

Como em Bonder (2008), os corpos-de-prova passaram por procedimento de vedação (filme plástico PVC transparente, papel alumínio, saco plástico Ziploc e caixa plástica), realização em sala com temperatura controlada de 20°C e agilidade de manipulação para garantir que a variação de umidade do ar não interferisse no equilíbrio do papel filtro com o solo, evitando o equilíbrio com a umidade relativa do ar.

Já a sobrecarga, realizada por uma tampa de cápsula de alumínio pequena e elástico, foi colocada para garantir o contato total entre o papel filtro e o solo.

Nos ensaios com lixiviado, entre o papel filtro e o solo foi colocada uma pequena porção de tela de material inerte cortada em tamanho suficiente para impedir o contato direto do solo com o lixiviado e papel filtro, a fim de evitar a colmatção dos poros do papel filtro pelos sólidos contidos no lixiviado, prejudicando os resultados do ensaio (Figura 5.12). Essa técnica foi utilizada em Soto (2004) e Lima, Silva e Ramos (2011). Os outros procedimentos de início seguiram os mesmos utilizados para a água destilada (Figura 5.11).

Figura 5.12 – Detalhes do procedimento inicial do ensaio de papel filtro (curva de retenção) ao lixiviado: (a) Tela de material inerte cortada nas dimensões necessárias e (b) Locação de $\frac{1}{4}$ (um quarto) de papel filtro Whatmann^o 42 sobre tela inerte em contato indireto com um dos lados do corpo-de-prova



Fonte: Própria autora, 2012.

Os corpos-de-prova dos ensaios à água e ao lixiviado foram colocados dentro de caixas plásticas distintas para evitar possíveis interferências entre estes.

Após início do ensaio, semanalmente os corpos-de-prova eram retirados da caixa e do saco plástico, desembrulhados do papel alumínio e filme plástico de PVC e a sobrecarga e a tela

inerte (esta foi utilizada somente nas trajetórias com lixiviado) eram retiradas, assim como o $\frac{1}{4}$ do papel filtro. A porção de papel era então transferida para dentro de uma cápsula de alumínio com tampa e pesada em balança com resolução de 0,0001 g (0,1 mg). Antes de colocar o papel filtro na cápsula tampada, estas eram pesadas vazias para obter a tara das mesmas. Segundo Bonder (2008), o fato da cápsula ser maior e mais pesada do que o papel filtro não induz a erros, fornecendo valores iguais aos do papel filtro pesado diretamente (sem a cápsula).

Este procedimento, desde a retirada das camadas de proteções até a colocação do papel filtro na cápsula, foi realizado num tempo em torno de 6 segundos, para evitar que o papel filtro perdesse ou ganhasse água e em todas as fases do ensaio, o manuseio do papel filtro foi feito com uma pinça metálica, para evitar a alteração das características do papel (BONDER, 2008).

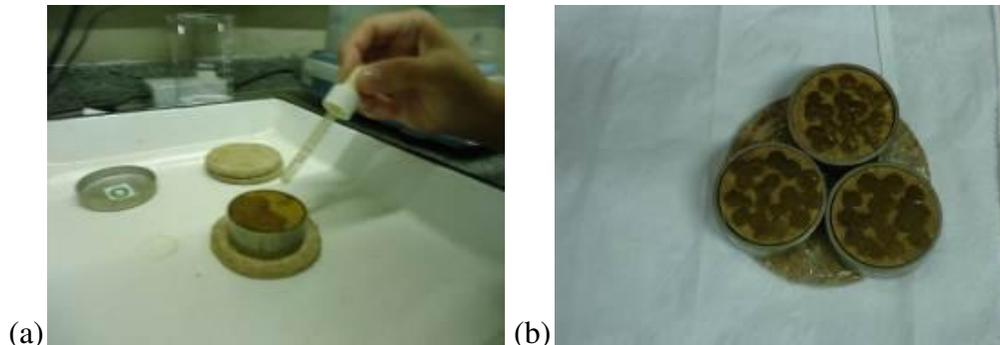
Os corpos-de-prova eram armazenados durante uma semana, pois sete dias correspondem ao período necessário para atingir o tempo de equilíbrio papel filtro e solo, descritos em D5298-03 (ASTM, 2003), Martínez (2003), Marinho (2005) e Silva Júnior, Garcia e Gitirana Júnior (2011) e Gitirana Júnior, Mascarenha e Camapum de Carvalho (2011).

Após pesado o conjunto papel filtro, cápsula e tampa, as cápsulas eram destampadas e inseridas em estufa a 60°C e deixadas durante 1 semana, sendo novamente pesadas. A estufa foi reservada para uso somente destes ensaios, evitando contato com solos e outras substâncias.

Os anéis com solo (corpo-de-prova) também eram pesados semanalmente para obter os valores de umidade gravimétrica (porcentagem de água presente no solo em determinado momento).

Para definir outros valores de teores de umidade de equilíbrio pelo processo de umedecimento da amostra, utilizou-se o procedimento de Bonder (2008) de adicionar uma quantidade de água destilada ou lixiviado sobre a superfície superior do corpo-de-prova, com auxílio de um conta-gotas (Figura 5.13). Ao observar que não havia mais uma lâmina de fluido (água destilada ou lixiviado) sobre ele, o corpo-de-prova era pesado e o processo de início repetido, com a colocação de outro $\frac{1}{4}$ de papel filtro e embrulho do conjunto.

Figura 5.13 – Adição de fluido (água destilada ou lixiviado) no solo: (a) Adição das gotas no corpo-de-prova, com auxílio do conta-gotas e (b) Corpos-de-prova com as gotas adicionadas à superfície



Fonte: Própria autora, 2012.

A cada semana era adicionada uma quantidade de água ou lixiviado equivalente ao aumento de 2% do teor de umidade do corpo-de-prova. As Equações de calibração do conta-gotas utilizadas foram a (5.3) e a (5.4):

$$M_{2\%} = 0,02 \times M_s \quad (5.3)$$

$$n_{gotas} = \frac{M_{2\%}}{M_g} \quad (5.4)$$

em que M_s é a massa do corpo-de-prova seco (g); $M_{2\%}$ é a massa correspondente 2% de umidade do corpo-de-prova (g); n_{gotas} é o número de gotas correspondente ao aumento de 2% de umidade do corpo-de-prova (g); M_g é a massa de uma gota (g).

O lixiviado adicionado era coletado um dia antes na célula experimental, gerado pelo RSU nela depositado, e refrigerado a uma temperatura de 4°C até ser usado no dia seguinte. Esse lixiviado era também caracterizado biológica, física e quimicamente por pesquisadores responsáveis em estudar o lixiviado gerado na célula.

Havia um conta-gotas para uso com água destilada e outro para lixiviado, a fim de evitar contaminações.

Para o processo de secagem também se utilizou do procedimento adotado por Bonder (2008), em que o corpo-de-prova esteve secando de início em um local sob calor do sol (Figura 5.14 item (a)) e a partir de certa umidade, quando não era mais possível perder água por evaporação das amostras ao ar, estas eram levadas a secar em estufa de solos (100°C) por um tempo controlado (Figura 5.14 item (b)). A cada semana, secava-se o corpo-de-prova em um intervalo definido de cerca de 0,5 g. Ao fim do ensaio, chegou-se a um estado em que não era mais possível o solo perder água em estufa, pois já estava completamente seco.

Figura 5.14 – Procedimentos de secagem dos corpos-de-prova: (a) Corpos-de-prova secando sob calor do sol e (b) Corpos-de-prova secando em estufa de solos (100°C)



Fonte: Própria autora, 2012.

Com os dados de ensaio, foram obtidas as curvas de retenção, representadas pela relação entre a umidade e a sucção do solo. Essas curvas foram obtidas através dos cálculos dos teores de umidade de equilíbrio do papel filtro e do solo, no qual, cada umidade gravimétrica corresponde a uma sucção estimada a partir do teor de umidade do papel filtro, utilizando as curvas de calibração para o papel Whatmann^o 42, obtidas por Chandler, Crilly e Montgomery-Smith (1992). Esses valores de sucção e de teor de umidade correspondem a um ponto da curva de retenção de água (BONDER, 2008).

Através desses pontos empíricos obtidos, as curvas de retenção foram ajustadas pelos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980), em Software Excel.

Ressalta-se que, como em Bonder (2008), as curvas de retenção obtidas pelo método do papel filtro, para ambas as trajetórias (umedecimento e secagem), não levaram em consideração as variações volumétricas sofridas pelos corpos-de-prova durante todo o período de ensaio. Logo,

ao contrário da maioria que utiliza dos valores de umidade volumétrica ou grau de saturação para plotar suas curvas de retenção, as curvas neste trabalho são apresentadas em função do teor de umidade gravimétrica. No entanto, qualquer alteração no diâmetro ou altura dos corpos-de-prova foi observada e medida, a fim de avaliar o comportamento do solo através dos estados de contração ou expansão da amostra.

Os ensaios foram realizados para a água destilada e o lixiviado para posteriormente comparar as curvas de retenção obtidas para esses dois fluidos, sendo que as amostras de lixiviado utilizadas nos ensaios ao lixiviado foram caracterizadas por análises físico-químicas realizadas no Laboratório de Saneamento da UNICAMP, de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA e WPCF, 1998), entre elas: potencial hidrogeniônico – pH (método eletrométrico), alcalinidade (método titulométrico), ácidos orgânicos voláteis (método titulométrico), potencial redox (método eletrométrico), condutividade (método eletrométrico), Demanda Química de Oxigênio – DQO (método do refluxo fechado e espectrofotometria), nitrogênio amoniacal (método da destilação e titulometria) de Demanda Biológica de Oxigênio – DBO (método da diluição e incubação).

5.2.6 Porosimetria

Os corpos-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) à água destilada e ao lixiviado e um corpo-de-prova moldado nas mesmas condições, mas que não foi submetido ao ensaio de papel filtro (curva de retenção), foram analisados em ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio com intuito de avaliar os possíveis efeitos dos fluidos (água destilada e lixiviado) na porosidade das amostras.

O método de porosimetria por intrusão de mercúrio permite obter a distribuição de diâmetros de poros da amostra a partir dos dados pressão-volume durante a penetração nos poros do solo pelo mercúrio, visto que o mercúrio é um fluido que não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras do solo a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

As amostras foram submetidas a um recipiente com mercúrio na qual foi aplicado um vácuo, fazendo com que o capilar do solo fosse todo preenchido com mercúrio. Em seguida,

aumentou-se a pressão sobre o mercúrio e este penetrou nos poros da amostra reduzindo seu nível no capilar.

Registrando a redução do nível de mercúrio no capilar, juntamente com o valor de pressão aplicada, foi obtida uma curva de porosimetria com capacidade de descrever qual o volume de poros do solo foi penetrado pelo mercúrio a uma dada pressão. Cada pressão corresponde a um diâmetro de poros preenchido.

O equipamento utilizado foi o porosímetro Micromeritics PoreSizer 9320, o qual possui um range para ensaios de distribuição média de poros de 300 μm até 0.006 μm , utilizando uma pressão de aproximadamente 0.5 psi até 30.000 psi.

5.2.7 Coeficientes de Permeabilidade Não Saturada

A determinação dos coeficientes de permeabilidade não saturada e suas respectivas curvas (coeficiente de permeabilidade não saturada *versus* sucção e coeficiente de permeabilidade não saturada *versus* teor de umidade) foram realizadas para a amostra de solo Mistura, utilizando a rotina RETC (RETention Curve), desenvolvida por van Genuchten, Leij e Yates. (1991). A rotina RETC utiliza de funções analíticas computacionais para estimativa das propriedades hidráulicas do solo. Com os dados de classificação do solo obtido em ensaio de análise granulométrica, sucção e teor de umidade obtidos no ensaio de papel filtro (curva de retenção) e o coeficiente de permeabilidade saturada do solo obtido no ensaio de permeabilidade à carga variável, foi então possível estimar os dados de permeabilidade não saturada.

5.3 Controle de Compactação da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental

Os dados de controle de compactação foram obtidos através dos dados dos ensaios de laboratório de massa específica seca do solo (balança hidrostática), teor de umidade pelo método da estufa, compactação (energia Proctor Normal) e ensaios de campo de massa específica do solo (frasco de areia) e teor de umidade (Speedy Moisture).

Os valores de grau de compactação foram calculados pela Equação (5.5):

$$GC = \frac{\gamma_d \text{ média}}{\gamma_d \text{ máx}} \times 100 \quad (5.5)$$

em que GC é o grau de compactação (%); $\gamma_d \text{ média}$ é a massa específica seca de campo média (g/cm^3); $\gamma_d \text{ máx}$ é a massa específica seca máxima (g/cm^3).

E os desvios de umidade pela Equação (5.6):

$$\Delta w = w_{\text{médio}} - w_{\text{ótimo}} \quad (5.6)$$

em que Δw é o desvio de umidade (%); $w_{\text{médio}}$ é o teor de umidade gravimétrico de campo médio (%); $w_{\text{ótimo}}$ é o teor de umidade gravimétrico ótimo (%).

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Caracterização do Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental

6.1.1 Caracterização Geotécnica

Para a caracterização geotécnica das amostras de solos são apresentados os resultados de ensaios de análise granulométrica, determinação de massa específica dos sólidos, determinação de limites de consistência, compactação Mini-MCV, perda de massa por imersão e cruvas de compactação proctor normal.

6.1.1.1 Análise Granulométrica

Na Figura 6.1 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para as amostras de solo B, I, T e M com e sem o uso de defloculante e na Tabela 6.1 são apresentados os valores das frações granulométricas de cada solo, com e sem o uso de defloculante, a fim de facilitar a análise comparativa.

Figura 6.1 – Curvas granulométricas das amostras dos solos com o uso de defloculante (CD) e sem o uso de defloculante (SD)

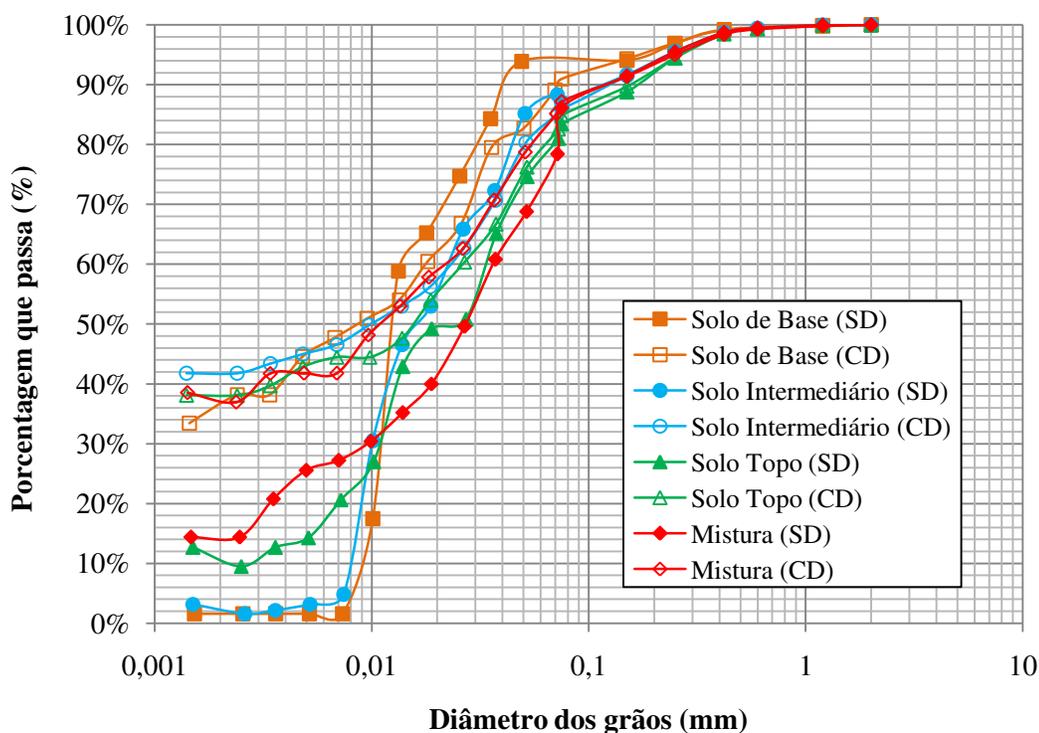


Tabela 6.1 – Valores das frações granulométricas dos solos, com o uso de defloculante (CD) e sem o uso de defloculante (SD)

Fração *	Solo B (%)		Solo I (%)		Solo T (%)		Solo M (%)	
	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD
Fração Argila D < 0,002 mm	1,8	36,8	2,3	42,0	11,8	38,0	14,4	37,7
Fração Silte 0,002 ≤ D < 0,06 mm	92,5	49,0	85,5	40,8	65,5	41,0	59	44,0
Fração Areia 0,06 ≤ D < 2 mm	5,7	14,2	12,2	17,2	22,7	21,0	26,4	18,1
Classificação textural	Silte	Silte argilo-arenoso	Silte arenoso	Argila silto-arenosa	Silte areno-argiloso	Silte argilo-arenoso	Silte areno-argiloso	Silte argilo-arenoso

* Limites definidos pela NBR 7181 (ABNT, 1984). SD – Sem defloculante. CD – Com defloculante.

Todas as amostras de solo ensaiadas apresentaram uma quantidade elevada de frações de finos (argila e silte), proporcionando a um primeiro instante, um bom material para constituir barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários, visto que materiais finos permitem um menor coeficiente de permeabilidade do que materiais arenosos. O solo B foi o que apresentou a maior quantidade de finos, com cerca de 94% para análise sem defloculante (SD) e 86% com defloculante (CD) e o solo M apresentou a menor quantidade, com 73% para análise sem defloculante (SD) e 82% com defloculante (CD) (Tabela 6.1).

A substância defloculante permitiu o aumento da porcentagem da fração argila ($D < 0,002$ mm) em todos os solos, visto que a substância defloculante permite uma maior desagregação das partículas. Segundo Pinto (2006), no ensaio com uso de defloculante, as partículas sedimentaram-se isoladamente, o que foi possível para detectar seus diâmetros equivalentes. Já no ensaio sem defloculante, as partículas que se encontravam agrupadas naturalmente, sedimentaram-se mais rapidamente, indicando diâmetros maiores que são os das agregações e não os das partículas. Segundo o autor, solos que mostram comportamentos diferenciados com e sem o uso de defloculante, são solos que apresentam uma estrutura floculada. Para as amostras B, I, T e M, esse comportamento diferenciado é observado nas curvas de distribuição granulométrica da Figura 6.1.

De mesmo modo, o uso de defloculante consentiu em uma distribuição mais uniforme entre as frações silte e argila (Tabela 6.1).

Logo, as classificações texturais sob ação do defloculante indicam para as amostras, texturas de siltes argilo-arenosos para B, T e M e argila silto-arenosa para I. Já nas curvas granulométricas obtidas sem uso do defloculante, verificam-se texturas de silte para B, silte arenoso para I e siltes areno-argilosos para T e M.

6.1.1.2 Massa Específica dos Sólidos

Os valores de massa específica dos sólidos (γ_s) [g/cm^3] à temperatura de 20 °C das amostras de solos B, I, T e M foram bastante próximas, sendo a maior de 2,693 g/cm^3 para o solo

T e a menor de 2,641 g/cm³ para o solo I. A média é de 2,669 g/cm³, sendo o desvio padrão de 0,02 (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 – Valores de massa específica dos sólidos das amostras de solo B, I, T e M

	Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
$\gamma_s (20) \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,684	2,641	2,693	2,658
Média (g/cm³)			2,669	
Desvio Padrão			0,02	

A massa específica dos grãos dos solos varia pouco de solo para solo e, por si, não permite identificar o solo em questão, mas é necessário para cálculos de outros índices (PINTO, 2006). Segundo o autor, grãos de quartzo (areia) costumam apresentar valores de massa específica dos sólidos de 2,650 g/cm³, como são os casos das amostras de solo estudadas nesse projeto.

6.1.1.3 Limites de Consistência

Os valores obtidos dos Limites de Liquidez (LL), Limites de Plasticidade (LP) e Índices de Plasticidade (IP) para as amostras de solo da jazida e a mistura deles estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Valores dos limites de consistência das amostras de solo B, I, T e M

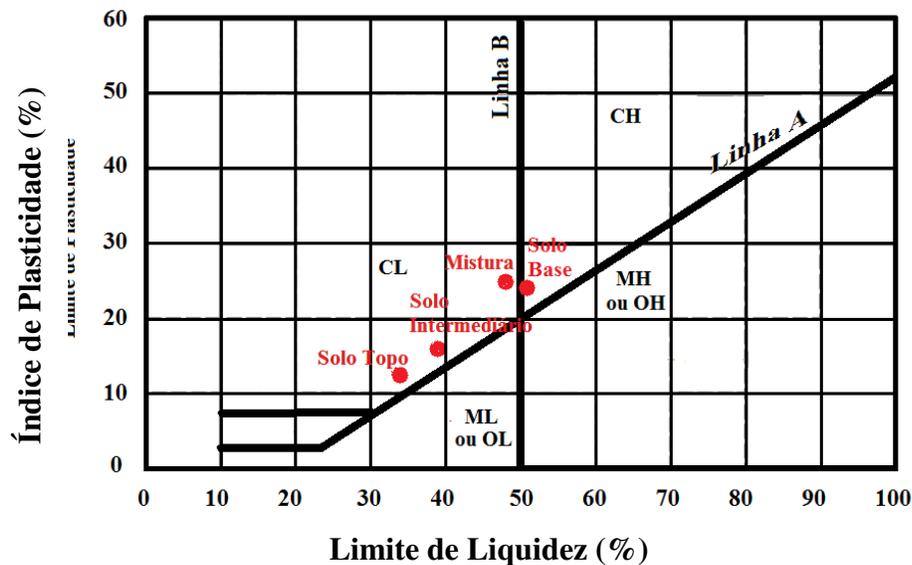
	Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
LL (%)	51	39	34	49
LP (%)	25	23	21	24
IP	26	16	13	25

Com os dados de LL, IP (Tabela 6.3) e da análise granulométrica (Tabela 6.1), obteve-se a classificação das amostras de solo pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) (ASTM, 2011).

Segundo a SUCS, como todas as amostras de solo possuem granulometria fina (50% ou mais de massa de solo que passa pela peneira de nº 200 (0,075 mm)), as suas classificações são obtidas conforme gráfico de Carta de Plasticidade (ASTM, 2011), o qual avalia os valores dos limites de liquidez e índice de plasticidade das amostras estudadas.

Na Figura 6.2, apresentam-se a Carta de Plasticidade da SUCS e o posicionamento de cada amostra de solo analisada conforme valores de LL e IP, classificando-as.

Figura 6.2 – Carta de plasticidade do Sistema Unificado de Classificação dos Solos e a classificação das amostras de solo B, I, T e M



A amostra de solo B é a única que apresentou LL maior que 50%, logo com valor de IP de 26% é classificada pelo sistema como pertencente ao grupo Argila muito plástica ou argila de alta compressibilidade (CH). A amostra de solo I, apresentando LL de 39% e IP de 16%, a amostra T com LL de 34% e IP de 13% e a M com 49% para LL e 25% para IP, classificam-se no SUCS como pertencente ao grupo Argila pouco plástica ou argila de baixa compressibilidade (CL) (Figura 6.2).

Segundo Santos (2006), os grupos CH e CL abrangem argilas inorgânicas com alto e baixo limite de liquidez, respectivamente.

No entanto, quando ocorre de uma posição muito próxima às linhas “A” ou “B” do gráfico da Carta de Plasticidade, como é verificado para a amostra de solo B, é considerado um

caso intermediário e as duas classificações são apresentadas. Assim, a amostra de solo B é classificada como CH ou CL, sendo esta última a mesma classificação das outras amostras analisadas (Figura 6.2).

Logo, com respectivas classificações pelo SUCS como CL e CH, porcentagem de fração de finos maior que 30%, LP próximo a 30% e IP igual ou maior a 15%, as amostras de solo B, I, T e M enquadram-se nos valores sugeridos pela CETESB (1993) como requisitos a proporcionar valores de coeficientes de permeabilidade inferiores 10^{-9} m/s, os quais são exigidos para solos utilizados em barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários.

Em trabalho de Met, Akgün e Türkmenoglu (2005), solos classificados como CH e CL, pelo SUCS, também se mostraram eficientes no uso como barreiras impermeabilizantes compactadas de aterros sanitários.

Visto que o solo T apresenta maior quantidade de fração areia, obtida do ensaio de análise granulométrica com defloculante (Tabela 6.1), este é o solo que também apresenta menor valor de LL e IP (Tabela 6.3), visto que estes resultados se correlacionam.

6.1.1.4 Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão

As Figuras 6.3 a 6.6 apresentam as curvas Mini-MCV *versus* Deformação (A_n) e seus respectivos coeficientes angulares (c') obtidos para as amostras de solo B, I, T e M. Os gráficos de compactação (com curvas de compactação de 4, 6, 8 e 12 golpes) e seus respectivos coeficientes d' , relativos à inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes no ensaio Mini-MCV, estão apresentados nas Figuras 6.7 a 6.10, para as amostras de solos B, I, T e M. E as curvas de Perda de Massa por Imersão (P_i) para as amostras de solo B, I, T e M, estão apresentadas nas Figuras 6.11 a 6.14.

Figura 6.3 – Curva Mini-MCV para amostra de solo Base

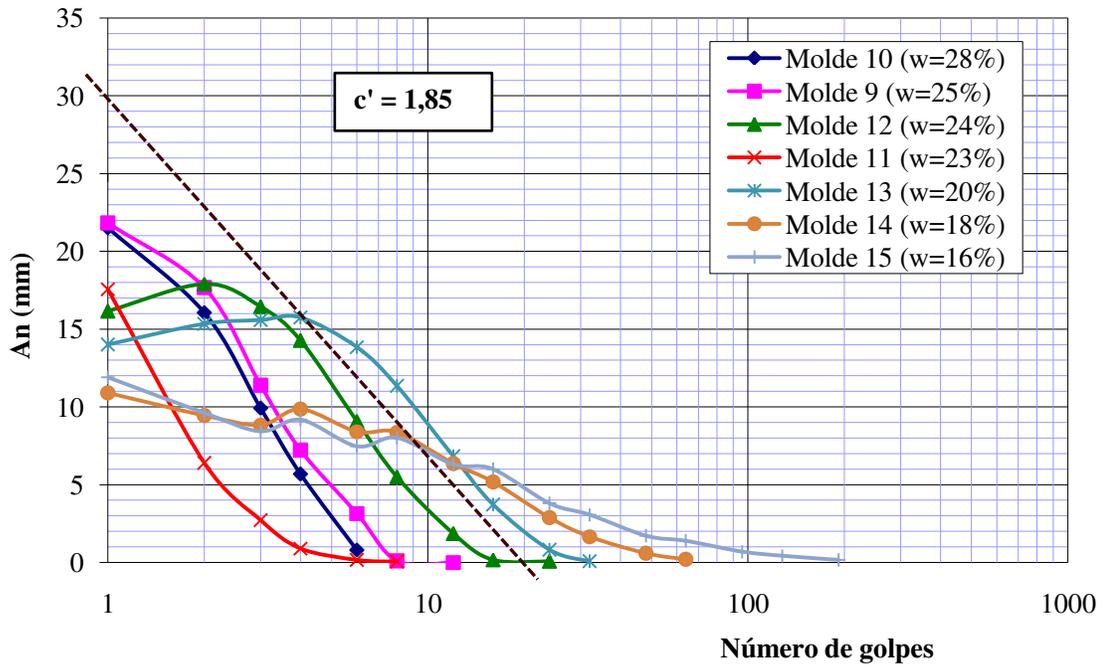


Figura 6.4 – Curva Mini-MCV para amostra de solo Intermediário

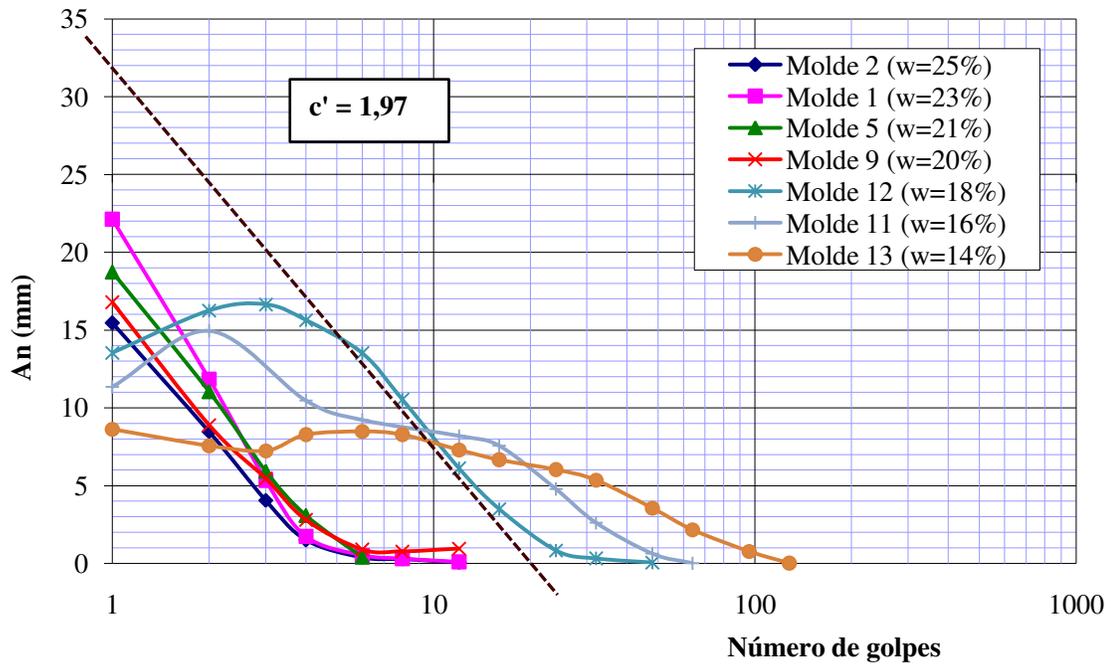


Figura 6.5 – Curva Mini-MCV para amostra de solo Topo

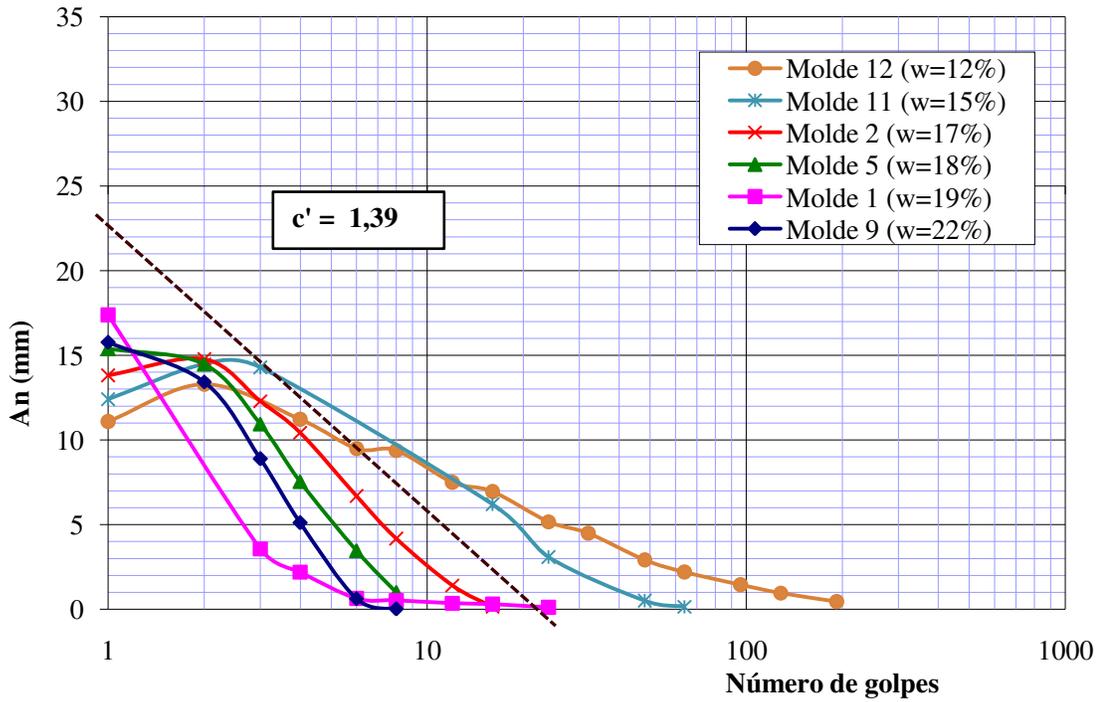


Figura 6.6 – Curva Mini-MCV para amostra de solo Mistura

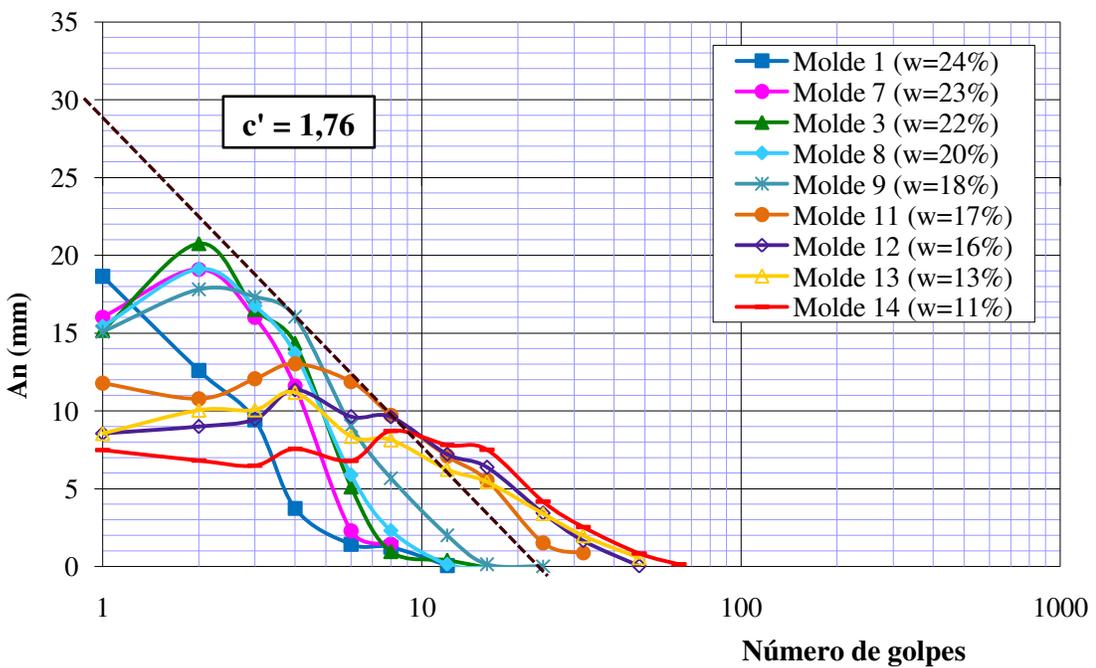


Figura 6.7 – Curva de Compactação para amostra de solo Base

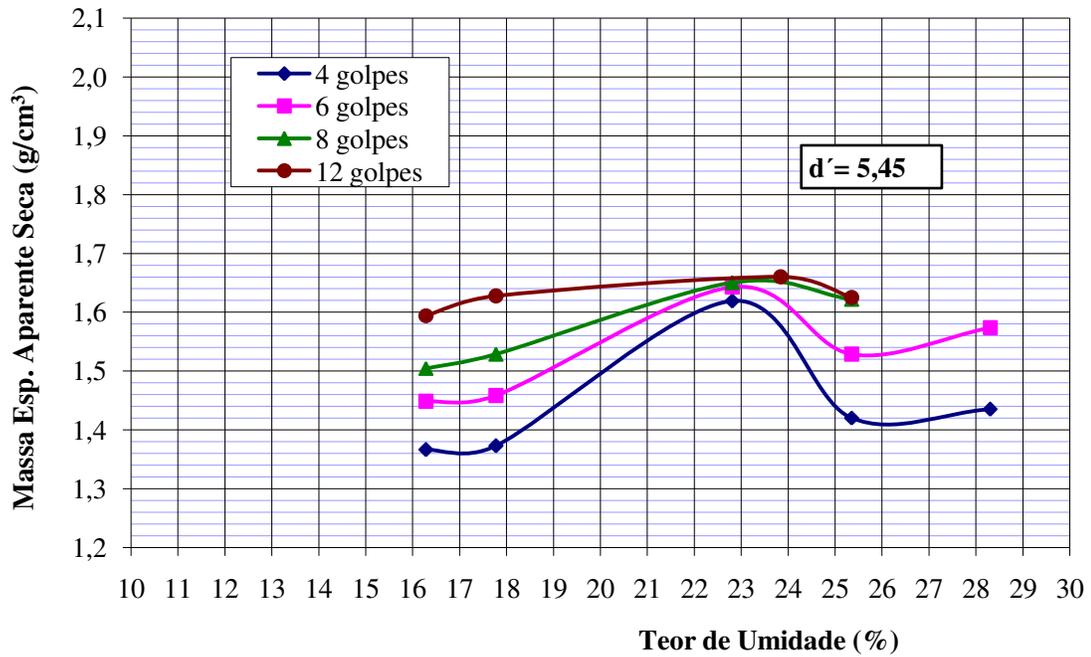


Figura 6.8 – Curva de Compactação para amostra de solo Intermediário

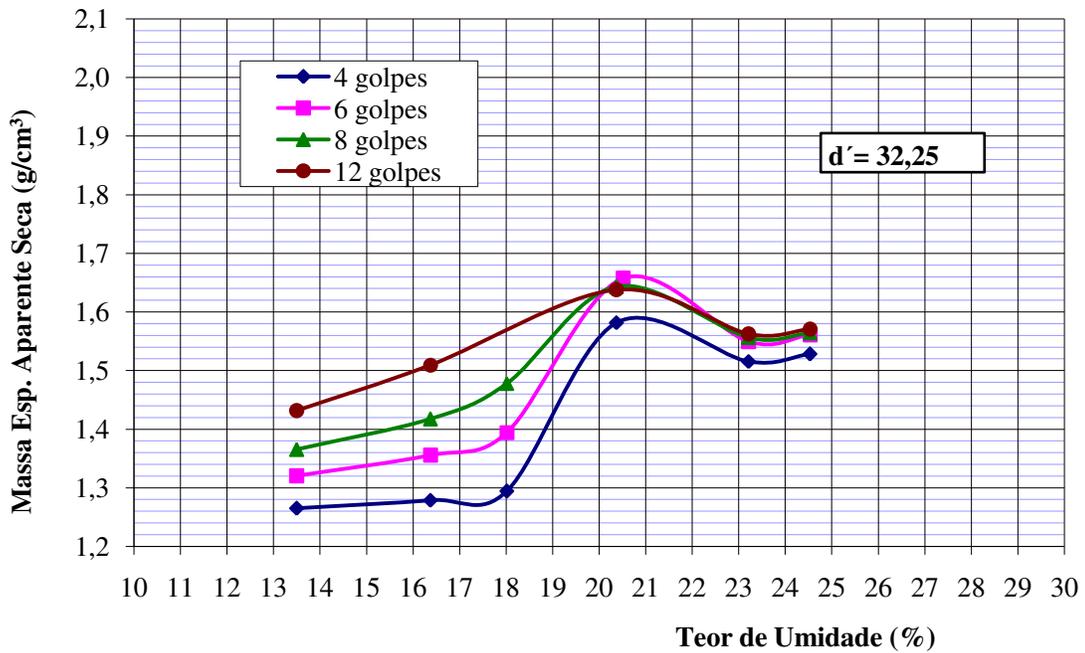


Figura 6.9 – Curva de Compactação para amostra de solo Topo

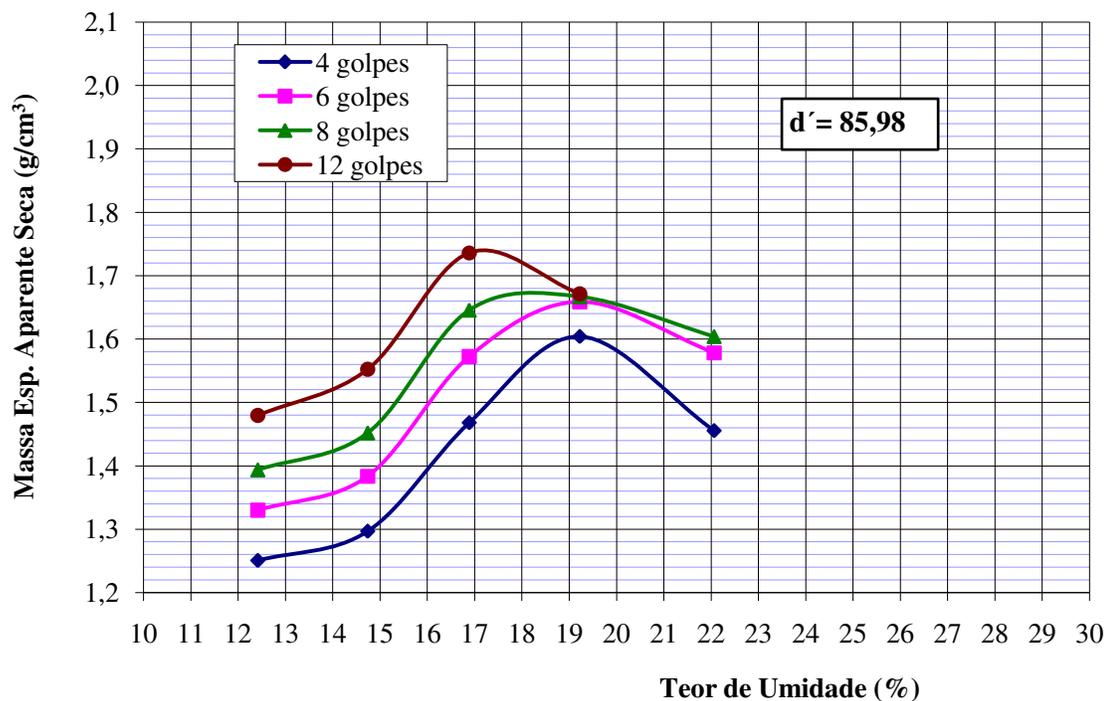


Figura 6.10 – Curva de Compactação para amostra de solo Mistura

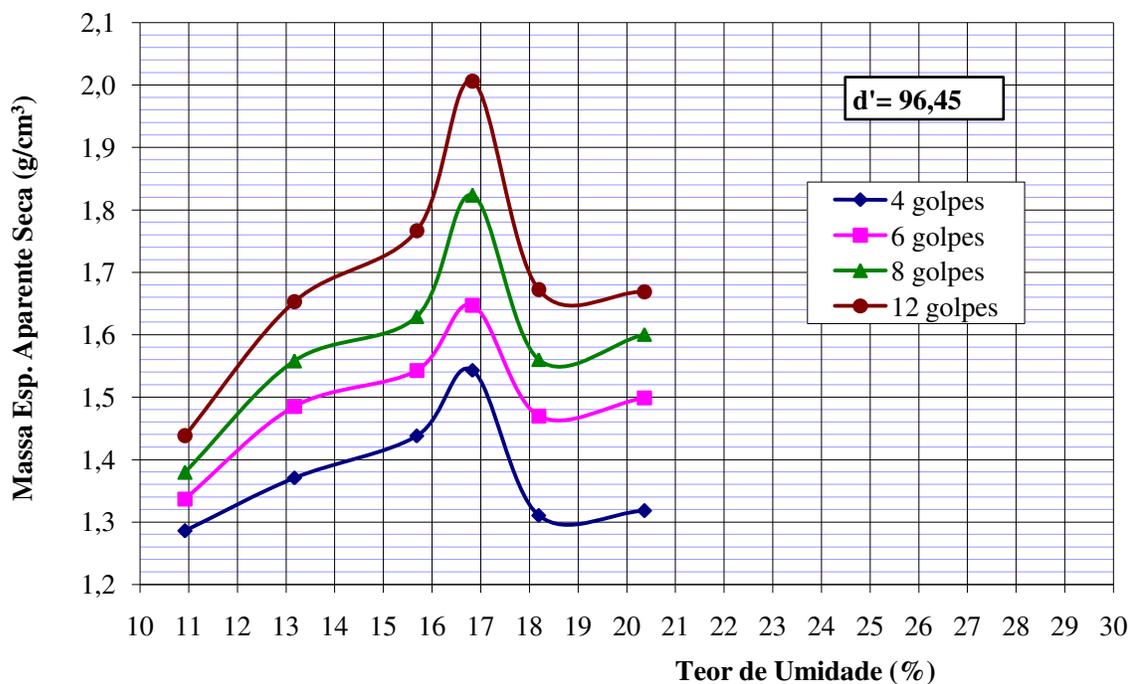


Figura 6.11 – Curva de Perda de Massa por Imersão para amostra de solo Base

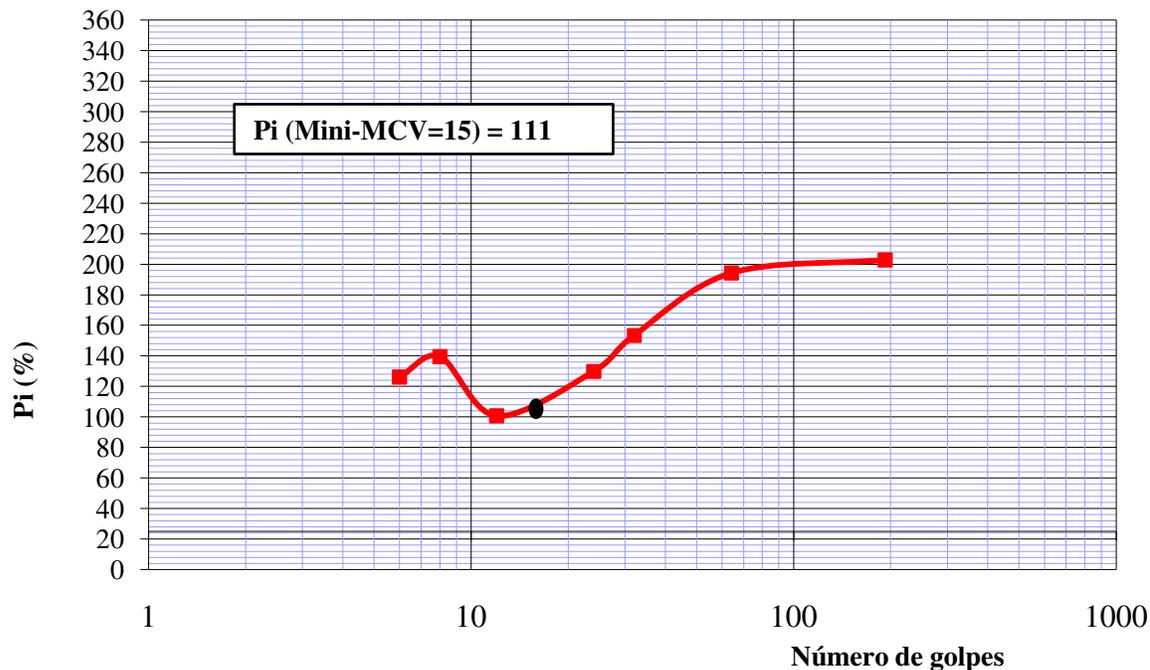


Figura 6.12 – Curva de Perda de Massa por Imersão para amostra de solo Intermediário

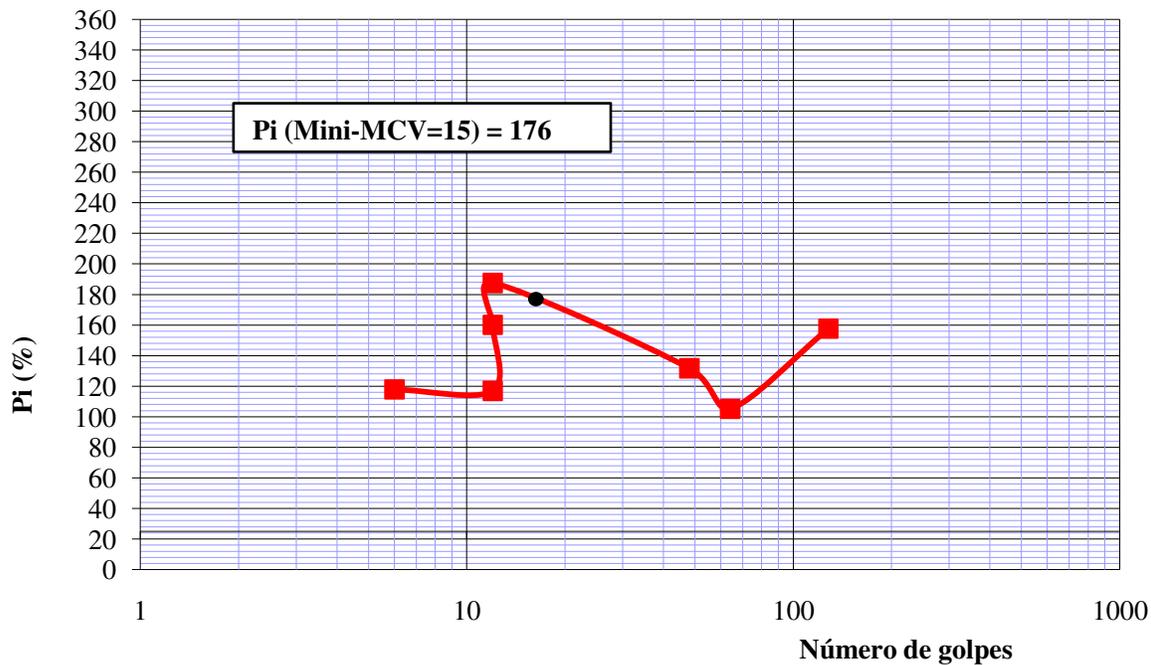


Figura 6.13 – Curva de Perda de Massa por Imersão para amostra de solo Topo

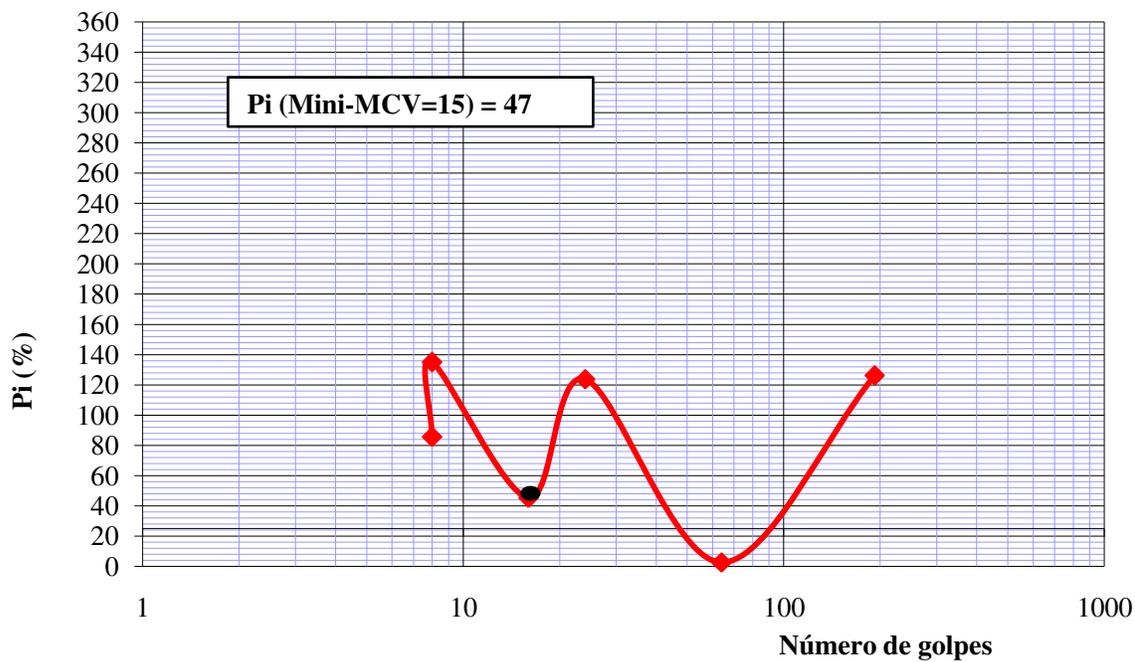
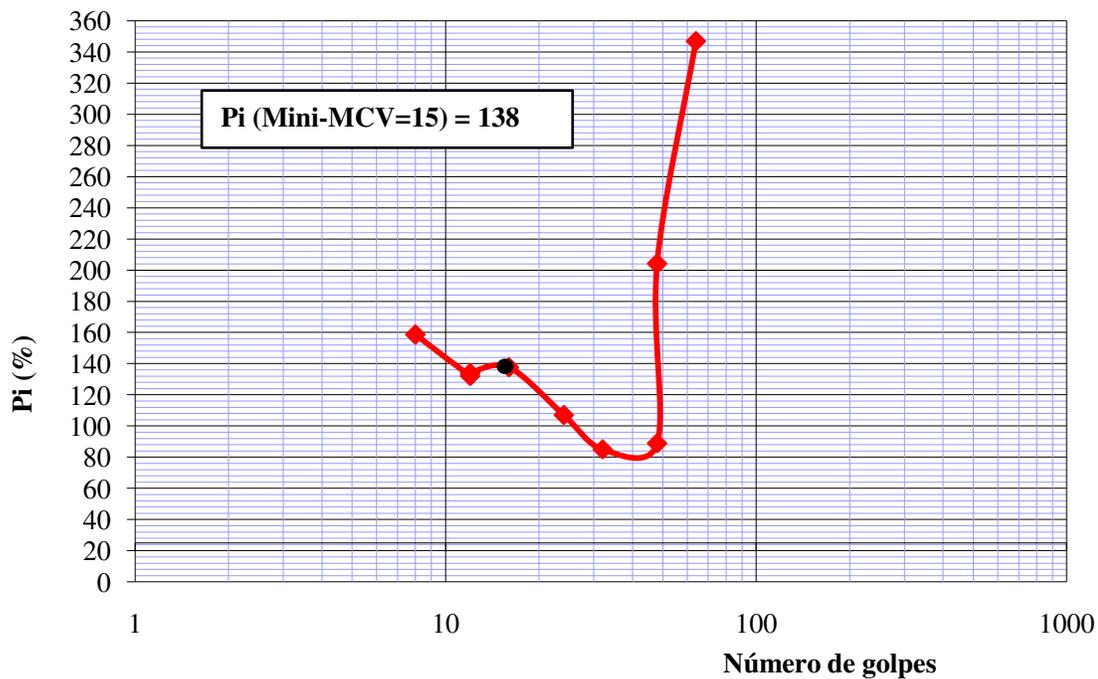


Figura 6.14 – Curva de Perda de Massa por Imersão para amostra de solo Mistura



Para todas as amostras, o coeficiente c' mostrou-se variável para cada curva correspondente a um teor de umidade, indicando característica de solos siltosos e arenosos. Logo, para fins classificatórios, o c' foi obtido da inclinação da reta de Mini-MCV=15 hipotética (interpolação gráfica), traçada paralela às curvas que apresentam Mini-MCV próximos a 15 (Figuras 6.3 a 6.6).

Foi utilizado o Mini-MCV=15 devido às amostras de solo apresentarem elevada massa específica aparente, isto é, a altura final dos corpos-de-prova do ensaio obtido para Mini-MCV foi menor que 48 mm. Devido a esse fato, os valores dos coeficientes de Perda de Massa por Imersão (P_i) foram também obtidos para o ponto de Mini-MCV=15 (Figuras 6.11 a 6.14).

Pelas Figuras 6.3 a 6.6, nota-se que as amostras de solo B, I e M apresentaram coeficientes c' elevados (acima de 1,5) e próximo a 2, expressando a argilosidade dos solos e compreendendo às argilas e solos argilosos. A amostra de solo T, com valor de c' entre 1 e 1,5, compreende a faixa correspondente às areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas e argilas siltosas.

Com relação aos valores de perda de massa por imersão P_i , as amostras de solo B, I e M apresentaram valores nitidamente maiores que a amostras de solo T, logo os solos B, I e M são potenciais de serem classificados como saprolíticos e a amostra de solo T, potencial de ser laterítico, devido aos valores de $d' > 20$ e $P_i < 100$. Solos lateríticos perdem menos massa por imersão, quando comparado aos não lateríticos (Figura 6.7 a 6.14).

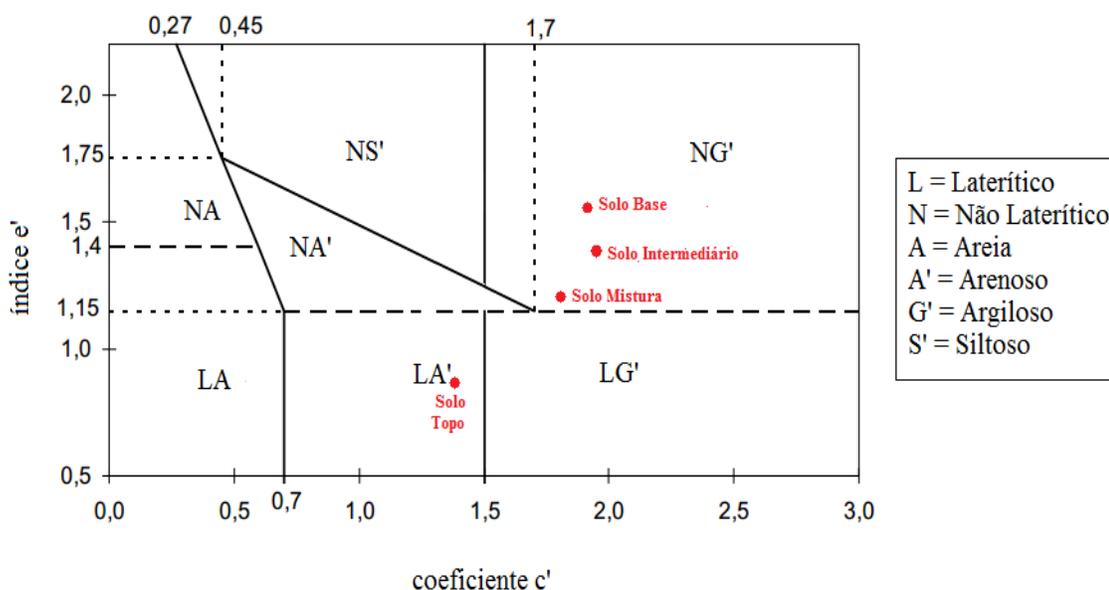
Quando colocados os valores de todos os coeficientes classificatórios e as respectivas classificações MCT para cada amostra de solo, na Tabela 6.4, percebe-se a comprovação das considerações realizadas nos parágrafos acima.

Tabela 6.4 – Resultados obtidos em ensaios de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão e Classificação MCT das amostras estudadas

Parâmetros MCT	Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
c'	1,85	1,97	1,39	1,76
d'	5,45	32,25	85,98	96,45
P_i	111	176	47	138
e'	1,68	1,34	0,89	1,17
Classificação	NG'	NG'	LA'	NG'
MCT	Solo Argiloso Não Laterítico	Solo Argiloso Não Laterítico	Solo Arenoso Laterítico	Solo Argiloso Não Laterítico

Considerando os valores das variáveis c' e e' , as posições das amostras ensaiadas foram ilustradas na Figura 6.15, referente à Carta de Classificação MCT.

Figura 6.15 – Posição das amostras na Carta de Classificação MCT



Pela Tabela 6.4 e a Figura 6.15, são obtidas as classificações de NA' (Solo Argiloso Não Laterítico) para amostras de solos B, I e M e LA' (Solo Arenoso Laterítico) para amostra de solo T. Verifica-se nos valores da Tabela 6.4 que os solos classificados como não lateríticos (NG') obtiveram valores de e' , que caracteriza o caráter laterítico do solo, mais altos, de 1,17 para M,

1,34 para I e 1,68 para B, enquanto que o solo T, classificado como laterítico, apresentou valor igual a 0,89.

O caráter laterítico do solo T pode estar relacionado ao fato de ele ser mais intemperizado que os outros solos, visto que o solo T está localizado no horizonte da jazida que é mais próximo à superfície do terreno, isto é, este é o horizonte que possui contato com o ambiente externo e as intempéries (ar, pluviosidade, entre outros). Segundo Albuquerque et al. (2006), a formação dos solos lateríticos se dá por mecanismos de desagregação e decomposição, provocados pelos intemperismos físicos e químicos, caracterizando o processo de laterização pela intensa migração de partículas sob a ação de infiltrações e evaporação, permanecendo quase que exclusivamente os minerais mais estáveis (quartzo, magnetita e caulinita). Esse processo é muito lento, atuando nas camadas superficiais bem drenadas.

Segundo a classificação MCT, de Cozzolino e Nogami (1993) e Nogami e Villibor (1995), as principais propriedades dos solos pertencentes ao Grupo LA' são: a granulometria típica de areias argilosas constituintes do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente no Brasil por latossolos arenosos e solos podzólicos ou podzolizados arenosos e que, quando devidamente compactados, adquirem baixo coeficiente de permeabilidade (menores que 10^{-8} m/s), baixa à média contração por perda de umidade, razoável coesão e baixa expansão por imersão em água. Em suas condições naturais, são solos que possuem baixa massa específica aparente seca. O Grupo NG' possui solos constituídos, granulometricamente, por argilas, argilas arenosas, argilas siltosas e siltes argilosos, compreendendo sobretudo os saprolíticos argilosos que derivam de rochas sedimentares argilosas (argilitos, siltitos) ou cristalinas. Como propriedades, quando compactados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, apresentam características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas, correspondente de média à elevada expansão e contração. Os valores de coeficiente de permeabilidade são de baixo a médio (entre 10^{-8} e 10^{-5} m/s).

Levando em consideração essas propriedades, principalmente os baixos valores de coeficiente de permeabilidade (k), os solos B, I, T e M apresentam-se como potenciais materiais para compor camada de solo compactado de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários, no entanto solos de comportamento laterítico, como a amostra T, decorrem, segundo

Nogami e Villibor (1995), de constituição mineralógica peculiar de sua fração argila, na qual destacam a presença da caulinita, como o argilomineral predominante, e elevada porcentagem de óxidos e hidróxidos de ferro e hidróxidos de alumínio. Portanto, em virtude dessas características mineralógicas e o coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-8} m/s, os solos lateríticos são maiores potenciais de reter contaminantes do que solos não lateríticos, e sendo assim melhores materiais para constituir camadas de solo compactado. Deste modo, é possível enunciar que a amostra de solo T possui maior potencialidade na função de materiais de camadas compactadas de base, devendo, no entanto, realizar análises mais aprofundadas com relação aos mecanismos de transporte de contaminantes para então admitir cientificamente essa afirmação.

Em estudo da potencialidade do uso de solos compactados em barreiras impermeabilizantes para sistemas de contenção de resíduos, Macambira (2002) relata que a classificação MCT dos solos mostrou correlação com os resultados obtidos em ensaio de permeabilidade realizados pela autora, sendo que os solos classificados como LG' apresentaram os menores coeficientes de permeabilidade, dentre solos analisados e classificados como LG', LA' e NG'. Em seus estudos, foi também obtido que uma das amostras de solo LA' igualmente alcançou baixos valores de coeficiente de permeabilidade.

Em estudo sobre o transporte dos metais cobre e zinco, em seis solos de diferentes classes segundo a classificação MCT (NA', LG', NG', LA', NA e NS') com a finalidade de escolha de solos para a construção de camadas impermeabilizantes de base de aterros sanitários, Gurjão, Souza e Boscov (2008) concluíram que os melhores solos para construção dessas barreiras, visando à contenção dos metais analisados, são respectivamente: LG', NG', LA' para cobre e NG', LA', LG' para zinco.

Ainda, em estudos experimentais de solos da classificação MCT visando aplicação como camada de solo compactada de barreira impermeabilizante de base de aterro sanitário, Gurjão e Pastore (2003) obtiveram como resultado que solos classificados como NG' e LA' apresentam resultados químico, mineralógico, geotécnico e de sorção de cobre e zinco (metais pesados muito presentes no lixiviado de aterro sanitário) muito próximos e sem diferenças significativas. Assim, os solos B, I, T e M, classificados como NG' e LA', podem ser considerados semelhantes.

Logo, pelos resultados dos estudos de Macambira (2002) e Gurjão, Souza e Boscov (2008), acresce a potencialidade dos solos B, I, T e M serem utilizados como camada impermeabilizante de base de aterros sanitários.

Observam-se uma compatibilidade próxima entre as classificações texturais oriundas dos resultados dos ensaios de análise granulométrica (Tabela 6.1) e da Classificação MCT (Tabela 6.4 e Figura 6.15), no entanto a ocorrência de incompatibilidade é comum também e ocorre, segundo Rodrigues e Miguel (2011), devido à Classificação MCT procurar atender ao comportamento do solo e não à sua textura real.

6.1.2 Caracterização Químico-Mineralógica

Na fração sólida mineral das amostras de solo B, I, T e M foram encontrados em sua constituição minerais primários, como o quartzo e minerais secundários, como a caulinita, montmorillonita, entre outros. Os minerais primários apresentam composição pouco alterada em relação à rocha originária, são os remanescentes da rocha-matriz, de composição química original. Os secundários são originários de alterações na estrutura ou fragmentações da rocha matriz do solo, tendo então a composição química distinta da rocha de origem.

Na Tabela 6.5 são enumerados os principais minerais encontrados nas amostras, em ordem de intensidade de maior para menor, sendo o quartzo o predominante para todos os solos analisados.

Tabela 6.5 – Principais minerais constituintes das amostras de solo B, I, T e M

Intensidade	Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
1°	Quartzo	Quartzo	Quartzo	Quartzo
2°	Neotocita	Neotocita	Hallosita	Phlogopite
3°	Baumita	Hematita	Baumita	Gibbsita
4°	Hallosita	Baumita	Neotocita	Baumita
5°	Gibbsita	Muscovita	Illita	Hallosita
6°	Montmorillonita	Goethita	Gibbsita	Illita
7°	Illita	Gibbsita	Hematita	Caulinita
8°	Goethita	Montmorillonita	Esmectita	Neotocita
9°	Hematita	Esmectita	Caulinita	Goethita
10°	Esmectita	Caulinita	-	Esmectita
11°	Caulinita	-	-	-

As porcentagens dos principais compostos químicos presentes nas amostras de solo B, I, T e M, determinadas por ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X, são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Porcentagem dos principais compostos químicos presentes nas amostras de solo T e M

B, I,

Compostos Químicos	Solo B (%)	Solo I (%)	Solo T (%)	Solo M (%)
SiO₂ (óxido de silício)	70,86	70,79	71,46	74,30
Al₂O₃ (óxido de alumínio)	15,79	16,27	15,38	14,00
Fe₂O₃ (óxido de ferro)	4,51	3,79	3,76	4,10
TiO₂ (óxido de titânio)	0,89	0,97	1,05	0,85
K₂O (óxido de potássio)	0,84	0,41	0,35	0,58
MgO (óxido de magnésio)	0,33	0,25	0,23	0,17
Na₂O (óxido de sódio)	0,15	0,16	0,15	0,09
P₂O₅ (óxido de fósforo)	0,07	0,07	0,07	0,07
CaO (óxido de cálcio)	0,04	0,06	0,05	0,03
MnO (óxido de manganês)	0,01	0,01	0,01	0,01

Na constituição química das amostras de solo há a predominância de óxido de silício (SiO₂), compondo 70,86% da amostra de solo B, 70,79% para I, 71,46% para T e 74,30% para M. Essa predominância relaciona-se com o fato do SiO₂ corresponder à formulação química do mineral quartzo, o qual é também o mineral mais predominante na fração mineral das amostras de solo, como observado na Tabela 6.5 (Tabela 6.6).

Logo, aproximadamente 71% do perfil da jazida ao todo, em constituição mineralógica, é constituído por quartzo, isto é, fração areia. Contudo, segundo Lepsch (2002), embora os minerais primários da fração cascalho e areia, como o quartzo, constituam o fundamento mineral do solo e sejam comumente encontrados, estes são quimicamente inertes. Não sendo de muito interesse em relação à importância de atividades de barreiras de bases de aterros sanitários.

Para as frações de finos (silte e argila), porção de maior interesse para este estudo por serem bem ativos quimicamente e portanto potenciais de reter contaminantes contidos no lixiviado, encontrou-se em maior quantidade o óxido de alumínio (Al₂O₃), correspondendo à média de 16% para as amostras de solo. Quando combinado com outros elementos, o Al₂O₃ forma os argilominerais (Tabela 6.6).

Em menores quantidades, há as presenças nos solos dos compostos químicos óxido de ferro (Fe_2O_3), com 4%, o qual é a fórmula química da hematita e confere a coloração vermelha ou amarelada ao solo; o óxido de titânio (TiO_2), um dos responsáveis por conferir ao solo a coloração alaranjada, com cerca de 1%; o óxido de potássio (K_2O) e o óxido de sódio (Na_2O) respondem pela composição do mineral primário feldspato; o óxido de fósforo (P_2O_5) com 0,07% refere-se às reservas de elemento fósforo no solo; óxido de magnésio (MgO), 0,2%, que compõe o mineral periclase e o óxido de cálcio (CaO), 0,05%, que compõe o lime, ambos relacionados às massas calcáreas do solo; o óxido de manganês (MnO) é reconhecido como manganosita, a qual confere coloração marrom ao solo (Tabela 6.6).

Os óxidos de Fe e Al são importantes para a adsorção de elementos no solo, apresentando afinidades distintas quanto à adsorção de metais. No entanto, pelos baixos valores desses óxidos na Tabela 6.6, não pode-se concluir se os solos estudados apresentam ou não potencial para redução de possíveis contaminantes contidos no lixiviado que possam se movimentar entre os poros do solo.

Em resumo, as amostras de solo apresentaram químico-mineralologicamente a conciliação de minerais primários, material ferruginoso, agregados de quartzo e argila, sendo que dentre os grupos principais de argilominerais do solo citados na literatura, os presentes nas amostras B, I, T e M são a caulinita, esmectita e illita.

Quanto a alguns outros minerais presentes, compete à gibbsita ser um hidróxido de alumínio bastante presente nos solos intemperizados. Tratando de óxidos de ferro, a hematita potencializa cor vermelha forte, a goethita atribui cor amarela ou amarelo-laranja (SAMPAIO, 2006).

Segundo Almeida (2009), a presença de argilominerais tende a estimular a diminuição da movimentação de contaminantes do lixiviado pelo solo.

Ressalta-se que esses minerais são potenciais de reter líquidos como o lixiviado gerado de RSU de aterros sanitários, e conseqüentemente reter os contaminantes contidos nesse lixiviado, no entanto para que essa capacidade seja mensurada e comprovada, é necessário a realização de ensaios adicionais, como ensaios de difusão, coluna e adsorção.

6.1.3 Caracterização Físico-Química

Os resultados de pH (potencial hidrogeniônico), saturação em bases (Sb), soma de bases (S) dos solos B, I, T e M são apresentadas na Tabela 6.7. Os valores de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) e as porcentagens de seus referidos complexos adsorventes estão na Tabela 6.8.

Tabela 6.7 – Resultados de pH, saturação em bases (Sb) e soma de bases (S) dos solos B, I, T e M

Parâmetros		Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
pH	à CaCl ₂	3,8	4,0	3,9	3,9
	à H ₂ O	4,3	4,5	4,4	4,4
	à SMP	5,1	5,4	5,3	5,5
Média pH		4,4	4,6	4,5	4,6
Saturação em Bases – Sb (%)		4,97	9,50	6,34	6,13
Soma de Bases – S (cmol _e /dm ³)		0,57	0,84	0,63	0,49

Tabela 6.8 – Valores de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) das amostras de solo B, I, T e M e porcentagens de seus referidos complexos adsorventes

	Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
Matéria Orgânica (%)	1,5	1,5	1,9	1,7
CTC (cmol _e /dm ³)	11,47	8,84	9,93	7,99
H (% da CTC)	80,2	78,1	81,6	71,3
Al (% da CTC)	14,8	12,4	12,1	22,5
Ca (% da CTC)	2,6	5,7	4,0	3,8
Mg (% da CTC)	1,7	3,4	2,0	1,3
K (% da CTC)	0,6	0,5	0,3	1,1

As amostras de solos ensaiadas mostraram-se todas de caráter fortemente ácido e com valores de pH (potencial hidrogeniônico) médios na faixa de 4,4 a 4,6. As amostragens em

solução de cloreto de cálcio (CaCl_2) resultaram nos valores mais baixos e a solução SMP (Shoemaker, Mac lean e Pratt) em valores mais altos para todas amostras de solo (Tabela 6.7).

Os baixos valores de pH são decorrentes, principalmente, aos baixos valores de soma de bases (S), baixa porcentagem em saturação em bases (Sb) (Tabela 6.7) e significativa presença de íons de hidrogênio e alumínio (Tabela 6.8). A precipitação pluviométrica da região onde se localiza a jazida que forneceu os solos também contribui para a lixiviação das bases, resultando em solos com pH mais baixos, o que é típico de solos de clima tropical.

A soma de bases (S) de um solo representa a soma dos teores de cátions trocáveis. Denomina-se saturação em bases (Sb) a soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de CTC (RONQUIM, 2010).

Os valores de CTC (capacidade de troca catiônica) foram médios, na faixa de 7,99 a 11,47 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (Tabela 6.8). Assim como em Chaves et al. (1998), a CTC dessas amostras de solos consiste praticamente do tipo e da qualidade da argila que apresentam, visto que o teor de matéria orgânica é considerado de médio a baixo (faixa de 1,5 – 1,9%), conforme valores classificatórios de Fageria (2004).

Segundo valores classificatórios de Gurjão e Pastore (2003), a CTC dos solos, I, T e M é média, enquanto a CTC do solo B é alta (maior que 11,31 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$). Visto que, segundo os autores, a CTC do solo é a forma usual de se quantificar a quantidade de cátions que um solo pode reter nas suas cargas negativas, associada com a argila e a matéria orgânica, o solo B, neste caso, é um melhor material para compor barreira impermeabilizante de base de aterro sanitário.

Dentre os complexos adsorventes amostrados (Tabela 6.8), todas as amostras de solo possuem em maior quantidade o hidrogênio (H), predominando cerca de 80% das amostras. No entanto, assim como ocorre para a maioria dos parâmetros químicos analisados, não há diferença relevante entre as quantidades nos solos B, I, T e M.

As porcentagens dos complexos adsorventes alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) apresentaram-se em menor quantidade nos solos, com faixas entre 1,21% – 22,5%,

2,6% – 5,7%, 1,3% – 3,4% e 0,3% – 1,1%, respectivamente. As maiores porcentagens de Ca e Mg foram no solo I, enquanto a maior no solo M é encontrada a maior porcentagem de Al e K.

Embora os macronutrientes carbono (C), fósforo (P), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) e a relação cálcio/magnésio (Ca/Mg) sejam mais importantes para estudos agrícolas por serem considerados nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, foram realizados as análises deles neste trabalho devido serem elementos que influenciam também nos valores de CTC, sendo portanto de grande importância, uma vez que indicam a capacidade do solo para adsorver cátions em forma trocável (CHAVES et al., 1998). Os valores dos macronutrientes e relação Ca/Mg dos solos B, I, T e M são apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Valores dos macronutrientes carbono (C), fósforo (P), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) e relação cálcio/magnésio (Ca/Mg) dos solos B, I, T e M

Parâmetro	Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
C (g/dm³)	9,0	9,0	11,0	10,0
P (mg/dm³)	Mehlich	1,0	2,0	2,0
	Resina	2,0	4,0	4,0
Al (cmol_c/dm³)	1,7	1,1	1,2	1,8
Ca (cmol_c/dm³)	0,3	0,5	0,4	0,3
Mg (cmol_c/dm³)	0,2	0,3	0,2	0,1
K (cmol_c/dm³)	0,07	0,04	0,03	0,09
Relação Ca/Mg (cálcio/magnésio)	1,5	1,7	2,0	3,0

Comparando os valores da Tabela 6.9 com faixas de valores padronizadas em Chaves et al. (1998), os valores dos macronutrientes P, K, Ca e Mg encontraram-se baixos nos solos B, I, T e M. Já o teor de C, comparando com valores padronizados em Martins (2005), foi considerado médio, com valores menores (9 g/dm³) para B e I e maiores para T (11 g/dm³) e M (10 g/dm³). O C relaciona-se com o teor de matéria orgânica e deste modo afeta a capacidade de retenção de metais do lixiviado.

O P extraído pelas técnicas de soluções Mehlich e Resina apresentou valores distintos. A extração por solução Mehlich apresentou a metade dos valores comparados à resina, pra todas as amostras de solo (Tabela 6.9).

Quanto à relação Ca/Mg, as amostras de solo apresentaram maiores valores conforme os horizontes mais próximos da superfície (topo da jazida) para os mais distantes, sendo que o solo M mantivesse uma relação maior ainda. Os valores iguais ou superiores a 1,5 para a relação Ca/Mg são os requisitados na agricultura, no entanto Veloso et al. (2001) evidenciaram que a quantidade de cada cátion (Ca^{2+} e Mg^{2+}) é mais importante que suas próprias relações no solo e que ao diminuir o teor de cálcio nos equilíbrios, enquanto aumenta-se o teor de magnésio, é possível obter valores de pH mais elevados e consequentemente, obter uma maior CTC do solo.

Na Figura 6.16, é apresentado o gráfico $\Delta\text{pH} \times \text{pH}_{0,002}$, no qual o $\Delta\text{pH} = 0$ corresponde ao valor de 2,9, definindo este como o PCZ do solo M. E na Tabela 6.10 são apresentados os dados de $\text{pH}_{0,002}$ e $\text{pH}_{00,ti}$ obtidos do ensaio de determinação do ponto de carga zero do solo M.

Figura 6.16 – Dados empíricos do ensaio de determinação do ponto de carga zero do solo M

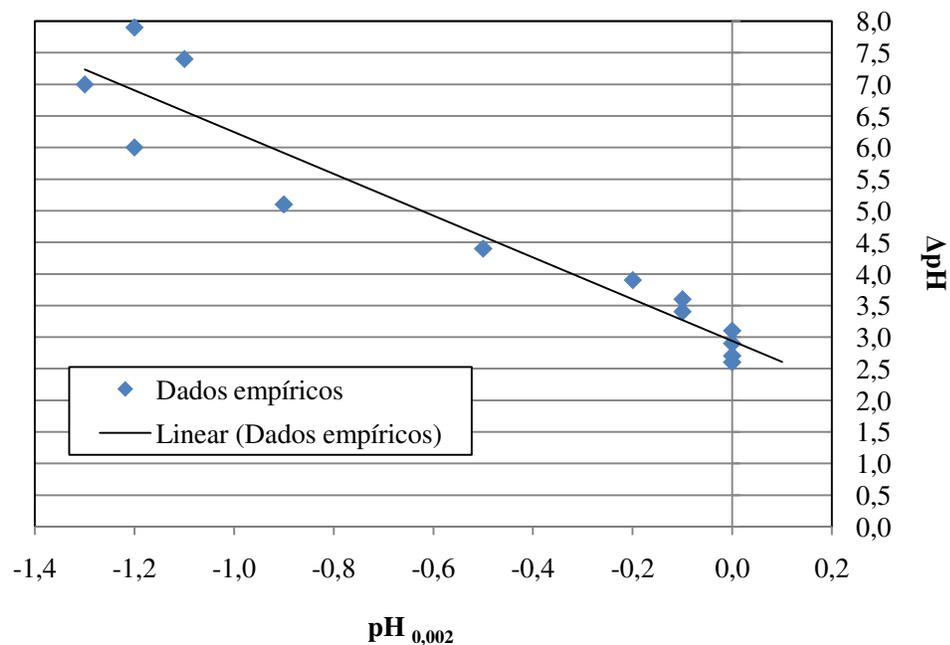


Tabela 6.10 – Dados de $pH_{0,002}$ e $pH_{0,01}$ obtidos do ensaio de determinação do ponto de carga zero do solo M

Recipiente	$pH_{0,002}$	$pH_{0,01}$	ΔpH
1	3,88	3,73	-0,15
2	3,58	3,54	-0,04
3	3,37	3,35	-0,02
4	3,12	3,13	0,01
5	2,91	2,92	0,01
6	2,72	2,73	0,01
7	2,56	2,55	-0,01
8	4,37	3,91	-0,46
9	5,1	4,21	-0,89
10	6,00	4,82	-1,18
11	6,98	5,67	-1,31
12	7,36	6,27	-1,09
13	7,94	6,73	-1,21

Segundo Appel et al. (2003), quando o pH do solo está em um valor acima do seu PCZ, em sua superfície há uma rede de carga negativa, exibindo predominantemente a capacidade de troca catiônica (CTC)). Quando o pH do solo encontra-se abaixo ao valor de seu PCZ, ele irá reter principalmente ânions (eletrostática). Isto é, a adsorção de cátions é favorecida quando o solo está a um $pH > pH_{PCZ}$, enquanto que a adsorção de ânions é favorecida a um $pH < pH_{PCZ}$.

Visto que o pH do solo M é de 3,9 a 5,5 (Tabela 6,7), ele se encontra acima do valor de PCZ obtido, logo o solo M em seu estado natural como está na jazida, exibe a predominância de adsorção de cátions (CTC).

A CTC em camadas de base de aterros sanitários é importante, pois determinam a capacidade do solo em adsorver metais pesados, os quais são contaminantes contidos no lixiviado. Segundo Almeida (2009), a CTC de um solo indica o potencial de redução de perdas de

cátions por lixiviação e a inativação de compostos tóxicos, sendo a CTC um parâmetro importante na retenção dos poluentes orgânicos, contidos no lixiviado de aterros sanitários.

6.2 Controle de Compactação da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental

6.2.1 Teor de Umidade de Compactação das Camadas de Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental

Na Tabela 6.11 são apresentadas as médias e desvios padrões dos valores de teor de umidade (w) [%] dos 12 pontos amostrados (Figura 5.3) de cada camada compactada (1^a, 2^a e 3^a camada) e as médias e desvios padrões das 3 camadas em conjunto que compõem a barreira de solo compactado da barreira impermeabilizante de base da célula experimental. Os valores são referentes aos ensaios de campo (*speedy moisture*) e de laboratório (estufa).

Tabela 6.11 – Médias e desvios padrões dos valores de teor de umidade (w) dos 12 pontos amostrados de cada camada compactada (1^a, 2^a e 3^a camada) e as médias e desvios padrões das 3 camadas que compõem a barreira de solo compactado da barreira impermeabilizante de base da célula experimental

Camada de Solo da Barreira Impermeabilizante da Célula Experimental	w campo (%)		w laboratório (%)	
	[Speedy Moisture]		[Estufa]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1 ^a Camada	15,0	0,00	16,8	1,61
2 ^a Camada	18,0	0,00	17,1	2,35
3 ^a Camada	15,0	0,00	15,3	2,26
Média das 3 Camadas	16,0	1,41	16,4	0,79

Quando comparados os resultados médios das 3 camadas, tem-se que a 2^a camada foi a camada compactada com o maior teor de umidade (18,0% e 17,1%), seguida da 1^a camada, com 15,0% e 16,8% e da 3^a camada com 15,0% e 15,3%.

Para a realização dos ensaios que necessitavam que os corpos-de-prova fossem moldados na mesma umidade que a barreira impermeabilizante de base da célula experimental foi compactada em campo, optou-se pela representação do valor da média das 3 camadas obtidas em laboratório, pelo ensaio da estufa, visto este ensaio possuir uma maior precisão nos resultados do que o ensaio de *speedy moisture*. O valor representativo foi de 16,4%.

Ressalta-se que os valores obtidos em campo, por *speedy moisture*, mesmo que menos precisos, foram importantes para obter a análise rápida do desenvolvimento e eficiência da compactação no momento da concepção da barreira impermeabilizante de base na célula experimental. Os valores de teor de umidade obtidos por *speedy moisture* permitiram a análise momentânea e em campo da compactação da barreira, assim como o ensaio de frasco de areia para determinação dos valores de massa específica seca.

6.2.2 Massa Específica Seca das Camadas de Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental

As médias e desvios padrões de massa específica seca (γ_d) [g/cm^3] dos 12 pontos amostrados (Figura 5.3) de cada camada compactada (1^a, 2^a e 3^a camada) e as médias e desvios padrões das 3 camadas em conjunto que compõem a barreira de solo compactado da barreira impermeabilizante de base da célula experimental estão na Tabela 6.12. Os valores referem aos ensaios realizados em campo (frasco de areia) e laboratório (balança hidrostática).

Tabela 6.12 – Médias e desvios padrões dos valores de massa específica seca (γ_d) dos 12 pontos amostrados de cada camada compactada (1^a, 2^a e 3^a camada) e as médias e desvios padrões das 3 camadas que compõem a barreira de solo compactado da barreira impermeabilizante de base da célula experimental

Camada de Solo da Barreira Impermeabilizante da Célula Experimental	γ_d campo (g/cm ³)		γ_d laboratório (g/cm ³)	
	[Frasco de Areia]		[Balança Hidrostática]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1 ^a Camada	1,640	0,04	1,726	0,04
2 ^a Camada	1,562	0,09	1,685	0,06
3 ^a Camada	1,624	0,12	1,755	0,05
Média das 3 Camadas	1,609	0,05	1,722	0,03

Os valores de massa específica seca do solo obtidos em campo, pelo frasco de areia, em média foram um pouco menores do que os obtidos em balança hidrostática, no entanto essa diferença é admissível pelo fato dos ensaios terem sido realizados em condições e maneiras distintas, sendo um em condições de campo e outro com amostras coletadas e levadas para análise em laboratório.

A 1^a camada foi a que apresentou o maior valor médio de massa específica seca obtida em campo, com 1,640 g/cm³ e a 3^a camada foi a que apresentou o maior valor médio de massa específica seca obtida em laboratório, com 1,755 g/cm³.

Para a realização dos ensaios que necessitavam que os corpos-de-prova fossem moldados com os mesmos valores da barreira impermeabilizante de base da célula experimental, foi realizada uma média dos valores das médias das 3 camadas para o γ_d de campo (1,609 g/cm³) e o γ_d de laboratório (1,722 g/cm³), obtendo um valor representativo de 1,67 g/cm³.

6.2.3 Curvas de Compactação (Energia Proctor Normal)

As amostras de solo B, I, T e M apresentaram diferentes curvas de compactação e valores de massa específica seca máxima e de teor de umidade ótimo, sendo que o solo M apresentou a maior massa específica seca máxima ($1,740 \text{ g/cm}^3$) e menor teor de umidade ótimo (17,6%) (Figura 6.17 e Tabela 6.13).

Figura 6.17 – Curvas de compactação dos solos B, I, T e M, realizadas em energia Proctor Normal

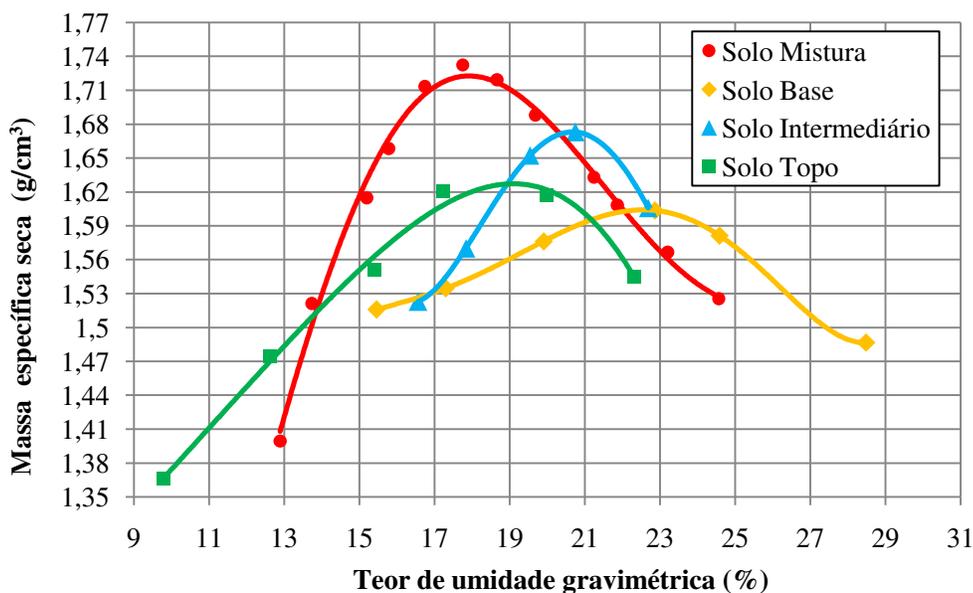


Tabela 6.13 – Valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo obtidos em ensaio de compactação (energia Proctor Normal) para os solos B, I, T e M

	Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
Massa específica seca máxima – $\gamma_{d \text{ máx}}$ (g/cm^3)	1,602	1,680	1,645	1,740
Teor de umidade ótimo – $w_{\text{ótimo}}$ (%)	23,3	20,3	18,5	17,6

Segundo valores típicos de curvas de compactação expostos em Pinto (2006), as amostras de solos B, I, T e M correspondem a solos siltosos, devido aos baixos valores de massa específica seca máxima e valores de umidade ótima entre 10% e 25%.

6.2.4 Valores e Resultados de Compactação das Camadas de Solo da Barreira Impermeabilizante de Base da Célula Experimental

Com a média de valores de massa específica seca (γ_d) de cada uma das camadas compactadas (1^a, 2^a e 3^a camada) (Tabela 6.12) e com os valores de massa específica seca máxima dos solos B, I, T e M obtidas nas curvas de compactação (Tabela 6.13) foram calculados os graus de compactação da barreira impermeabilizante de base da célula experimental.

E com a média de valores de teor de umidade (w) de cada uma das camadas compactadas (1^a, 2^a e 3^a camada) (Tabela 6.11) e os valores teor de umidade ótimo dos solos B, I, T e M obtidos nas curvas de compactação (Tabela 6.13) foram obtidos os desvios de umidade da compactação da barreira impermeabilizante de base da célula experimental.

Os valores dos graus de compactação são apresentados na Tabela 6.14 e dos desvios de umidade na Tabela 6.15.

Tabela 6.14 – Valores de graus de compactação das 1^a, 2^a e 3^a camadas de solo da barreira impermeabilizante de base da célula experimental, utilizando a média de valores de massa específica seca (γ_d) de cada uma das camadas e os valores de massa específica seca máxima dos solos B, I, T e M obtidas nas curvas de compactação

Camada de Solo da Barreira Impermeabilizante da Célula Experimental		Grau de Compactação – GC (%)			
		Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
1 ^a Camada	Balança hidrostática	108	103	105	99
	Frasco de Areia	102	98	100	94
2 ^a Camada	Balança hidrostática	105	100	102	97
	Frasco de Areia	98	93	95	90
3 ^a Camada	Balança hidrostática	110	104	107	101
	Frasco de Areia	101	97	99	93
Média das 3 Camadas		104	99	101	96
Desvio Padrão		4,12	3,72	3,96	3,74

Tabela 6.15 – Valores de desvio de umidade da compactação das 1^a, 2^a e 3^a camadas de solo da barreira impermeabilizante de base da célula experimental, utilizando a média de valores de teor de umidade (w) de cada uma das camadas e os valores de teor de umidade ótimo dos solos B, I, T e M obtidos nas curvas de compactação

Camada de Solo da Barreira Impermeabilizante da Célula Experimental		Desvio de Umidade - Δw (%)			
		Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
1 ^a Camada	Estufa	-6,5	-3,5	-1,7	-0,8
	<i>Speedy Moisture</i>	-8,3	-5,3	-3,5	-2,6
2 ^a Camada	Estufa	-6,2	-3,2	-1,4	-0,5
	<i>Speedy Moisture</i>	-5,3	-2,3	-0,5	0,4
3 ^a Camada	Estufa	-8,0	-5,0	-3,2	-2,3
	<i>Speedy Moisture</i>	-8,3	-5,3	-3,5	-2,6
Média das 3 Camadas		-7,1	-4,3	-2,3	-1,4
Desvio Padrão		1,16	1,18	1,16	1,16

Os cálculos do solo B com as camadas (1^a, 2^a e 3^a) foram os que forneceram maiores graus de compactação e os maiores desvios de umidade. E os cálculos do solo M com as camadas forneceram os menores graus de compactação e menores desvios de umidade (Tabelas 6.14 e 6.15).

Observa-se na Tabela 6.15 que a maioria dos valores de desvio de umidade foram negativos.

Com os valores da Tabela 6.14, obtêm-se uma média total, considerando todas as médias das 3 camadas, de um grau de compactação da barreira impermeabilizante de base do aterro sanitário igual a 100% com desvio padrão de 2,9. Com esse valor de grau de compactação, a barreira atende aos valores sugeridos na literatura, que consistem de grau de compactação de no mínimo 95%.

Considerando as médias das 3 camadas, na Tabela 6.15, a média total do desvio de umidade da barreira impermeabilizante de base do aterro sanitário é igual a -3,8% com desvio padrão de 2,2. Considerando apenas os valores de teor de umidade obtidos pelo ensaio de

laboratório (estufa), obtêm-se uma média total do desvio de umidade de -3,6% com desvio padrão de 2,2.

Diversos autores, como Nobre e Ferreira (2006), recomendam que a umidade do solo durante a compactação seja superior em 1 ou 2% à umidade ótima devido à permeabilidade ser menor nessa condição. No entanto, em campo, na barreira de base da célula experimental, não foi possível controlar o acréscimo ou redução da umidade com rigor.

6.3 Coeficiente de Permeabilidade Saturada

As dimensões e os índices físicos dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios à água destilada e ao lixiviado são apresentados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 – Parâmetros dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios à água destilada e ao lixiviado para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada do solo M compactado nas mesmas condições da barreira impermeabilizante de base da célula experimental

Parâmetros	Corpo-de-prova (água destilada)	Corpo-de-prova (lixiviado)
Altura (cm)	8,9	6,0
Diâmetro (cm)	9,4	9,4
Área (cm ²)	69,4	69,4
Volume (cm ³)	617,33	416,39
Massa (g)	1193	809
Índice de vazios - e	0,59	0,59
Grau de saturação – Sr (%)	70,73	73,49
Massa específica natural – γ (g/cm ³)	1,932	1,943
Massa específica dos sólidos – γ_s (g/cm ³)	2,660	2,660
Massa específica seca – γ_d (g/cm ³)	1,668	1,669

O corpo-de-prova moldado para o ensaio com lixiviado tinha a finalidade de ser menor em altura que o corpo-de-prova do ensaio à água destilada devido ao conhecimento prévio obtido no ensaio de papel filtro (curva de retenção), no qual foi demonstrado que o corpo-de-prova

moldado nas condições de compactação em campo ($\gamma_d = 1,67 \text{ g/cm}^3$ e $w = 16,4\%$) requereria muito tempo para atingir a saturação do solo com lixiviado. Portanto optou-se por essas condições a fim de não atrasar os ensaios, visto que a redução do volume do corpo-de-prova não comprometeria a obtenção de resultado de coeficiente de permeabilidade.

Os resultados obtidos do ensaio para água destilada estão na Tabela 6.17 e para o ensaio ao lixiviado estão na Tabela 6.18. Sendo que na Tabela 6.19 é apresentada a caracterização físico-química do lixiviado utilizado no ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada do solo ao lixiviado, a fim de avaliar as propriedades deste fluido no solo.

Tabela 6.17 – Resultados do ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada à água destilada

Determinação	Tempo	Área Tubo	h_i	h_f	k_T	Temp	C_k	k_{20}
	de Ensaio (s)	de Carga (m^2)	Carga a Inicia l (m)	Carga Final (m)	Coef. de Perm. Saturado (m/s)	Temp . ($^{\circ}\text{C}$)	Correção	Coef. de Perm. Saturada à temperatura 20°C (m/s)
1	9212	$7,14 \times 10^{-5}$	0,770	0,630	$2,00 \times 10^{-8}$	28,8	0,814	$1,62 \times 10^{-8}$
2	10050	$7,14 \times 10^{-5}$	0,770	0,620	$1,98 \times 10^{-8}$	28,8	0,814	$1,61 \times 10^{-8}$
3	838	$7,14 \times 10^{-5}$	0,630	0,620	$1,75 \times 10^{-8}$	29,0	0,811	$1,42 \times 10^{-8}$
4	6525	$7,14 \times 10^{-5}$	0,766	0,668	$1,92 \times 10^{-8}$	27,8	0,832	$1,60 \times 10^{-8}$
5	1428	$7,14 \times 10^{-5}$	0,655	0,647	$7,88 \times 10^{-9}$	28,1	0,826	$6,51 \times 10^{-9}$
6	8386	$7,14 \times 10^{-5}$	0,770	0,650	$1,85 \times 10^{-8}$	28,8	0,814	$1,51 \times 10^{-8}$
7	1614	$7,14 \times 10^{-5}$	0,630	0,609	$1,92 \times 10^{-8}$	28,0	0,828	$1,59 \times 10^{-8}$
8	9097	$7,14 \times 10^{-5}$	0,740	0,615	$1,86 \times 10^{-8}$	28,0	0,828	$1,54 \times 10^{-8}$
9	2878	$7,14 \times 10^{-5}$	0,770	0,720	$8,72 \times 10^{-9}$	28,0	0,828	$7,22 \times 10^{-9}$
10	1703	$7,14 \times 10^{-5}$	0,766	0,740	$1,86 \times 10^{-8}$	27,8	0,832	$1,55 \times 10^{-8}$
MÉDIA								$1,38 \times 10^{-8}$

Tabela 6.18 – Resultados do ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada ao lixiviado

Determinação	Tempo	Área Tubo	h_i	h_f	k_T	Temp	C_k	k_{20}
	de Ensaio (s)	de Carga (m^2)	Carga a Inicia l (m)	Carga Final (m)	Coef. de Perm. Saturado (m/s)	Temp . ($^{\circ}C$)	Correção	Coef. de Perm. Saturada à 20 $^{\circ}C$ (m/s)
1	811	$6,85 \times 10^{-5}$	1,10	1,09	$6,67 \times 10^{-9}$	14	1,17	$7,80 \times 10^{-9}$
2	1012	$6,85 \times 10^{-5}$	1,07	1,05	$1,10 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,29 \times 10^{-8}$
3	1023	$6,85 \times 10^{-5}$	1,05	1,03	$1,11 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,30 \times 10^{-8}$
4	9473	$6,85 \times 10^{-5}$	1,00	0,85	$1,02 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,19 \times 10^{-8}$
5	1603	$6,85 \times 10^{-5}$	1,10	1,07	$1,02 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,20 \times 10^{-8}$
6	2615	$6,85 \times 10^{-5}$	1,10	1,05	$1,05 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,23 \times 10^{-8}$
7	12009	$6,85 \times 10^{-5}$	1,05	0,85	$1,04 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,22 \times 10^{-8}$
8	4648	$6,85 \times 10^{-5}$	1,10	1,01	$1,09 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,27 \times 10^{-8}$
9	14624	$6,85 \times 10^{-5}$	1,10	0,85	$1,04 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,22 \times 10^{-8}$
10	10986	$6,85 \times 10^{-5}$	1,03	0,85	$1,04 \times 10^{-8}$	14	1,17	$1,21 \times 10^{-8}$
MÉDIA							$1,19 \times 10^{-8}$	

O k_t [m/s] refere-se ao valor do coeficiente de permeabilidade saturada na temperatura da água (Temp) [$^{\circ}C$] durante o ensaio. O k_{20} [m/s] refere-se ao valor do coeficiente de permeabilidade saturada em relação à água na temperatura de 20 $^{\circ}C$, obtido pela correção do coeficiente C_k , que é a relação entre a massa específica da água na temperatura de ensaio e a massa específica da água a 20 $^{\circ}C$.

Tabela 6.19 – Caracterização físico-química do lixiviado utilizado no ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade saturada do solo ao lixiviado

Parâmetro	Valor
pH	8,2
Potencial Redox (mV)	-157
Condutividade (mS)	35,1
Alcalinidade Parcial (mg CaCO₃/L)	12.052,8
Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	12.927,6
Ácidos Orgânicos (mg HAc/L)	315
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH₃/L)	2.340,0
DQO (mg O₂/L)	3.175
DBO (mg O₂/L)	230

Para o fator de correção (C_k) do ensaio ao lixiviado foram utilizados os mesmos valores que se têm para a água na NBR 14545 (ABNT, 2000), visto que os valores de massa específica obtidos para o lixiviado utilizado, com auxílio de um equipamento densímetro, mostraram-se muito próximos aos valores da água nas mesmas temperaturas. Ressalta-se que nem todo lixiviado possui os mesmos valores da água, no entanto como este lixiviado utilizado era um lixiviado “novo”, isto é, coletado após cerca de 7 meses de conclusão da célula experimental, ele era um líquido bastante aquoso e pouco concentrado, logo obteve valores de massa específica bastante semelhantes à água (Tabela 6.18).

Foram realizados ensaios com diferentes cargas hidráulicas que variaram de 0,8 a 15 cm para ensaio à água e 1,0 a 25 cm para o ensaio ao lixiviado. Os tempos de ensaio variaram de 838 a 10.050 segundos à água e, 811 a 14624 segundos ao lixiviado. A média dos valores de coeficiente de permeabilidade saturada para a água destilada foi de $1,38 \times 10^{-8}$ m/s, no entanto, obtiveram-se dois valores mínimos relatados em $7,22 \times 10^{-9}$ e $6,51 \times 10^{-9}$ m/s. O maior valor apresentado foi de $1,62 \times 10^{-8}$ m/s (Tabela 6.17).

A média dos valores de coeficiente de permeabilidade saturada para o lixiviado foi um pouco menor que a da água destilada, sendo de $1,19 \times 10^{-8}$ m/s e apresentando como valor mínimo, $7,80 \times 10^{-9}$ m/s e máximo de $1,30 \times 10^{-8}$ m/s. Nota-se que embora o coeficiente de

permeabilidade saturada do ensaio ao lixiviado foi um pouco menor que o da água, no ensaio à água foram obtidos menores valores mínimos, o que mostra que os valores de coeficiente de permeabilidade à água e ao lixiviado foram praticamente os mesmos, sem grandes variações.

Em estudo de Hamada, Calças e Giacheti (2002), sobre escoamento de lixiviado de aterros sanitários em solos compactados, os autores demonstram que o lixiviado tende a escoar mais rapidamente pelo solo do que a água, quando esse solo é compactado com grau de compactação de 85, 90 e 95% em energia Proctor Normal. Ozcoban et al. (2006) relataram que os valores de coeficiente de permeabilidade para uma solo argiloso foram ligeiramente maiores para ensaio com lixiviado ($10,8 \times 10^{-10}$ m/s) do que à água ($9,8 \times 10^{-10}$ m/s), descrevendo que o lixiviado pode ocasionar um acréscimo na permeabilidade, tendo efeito sobre o coeficiente de permeabilidade do solo. Os autores atribuem esse efeito devido ao fato do lixiviado alterar a estrutura do solo ao permeá-lo, isto é, o lixiviado causa um distúrbio na estrutura do solo com potencialidade de aumentar a permeabilidade deste.

No entanto, o tempo demandado para completar a saturação dos corpos-de-prova por contra pressão foram muito diferentes para os dois fluidos, sendo que o corpo-de-prova submetido à saturação por água necessitou de 3 dias para saturar e o corpo-de-prova submetido à saturação pelo lixiviado, mesmo que menor em altura, necessitou de 75 dias para completar a saturação. Isto pode estar relacionado ao fato de que o lixiviado possui compostos sólidos capazes de obstruir os poros do solo, dificultando a passagem do líquido. Assim, até saturar, a permeabilidade do solo pelo lixiviado é bem menor em comparação à da água.

Logo, nas barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários, uma possível contaminação pelo escoamento do lixiviado pelo solo compactado seria mais branda enquanto este solo estivesse em estado não saturado, no qual demoraria mais a permear.

Ressalta-se que estes valores de coeficiente de permeabilidade saturada foram obtidos para o corpo-de-prova compactado abaixo do valor de massa específica seca máxima, logo sob condições menos favoráveis. Em trabalho com amostras de solo proveniente da mesma jazida, Rodrigues e Miguel (2011) utilizam corpos-de-prova compactados com 3% acima do teor de umidade ótimo (obtido em curva de compactação) para realizar a determinação do coeficiente de permeabilidade saturada, isto é, o autor utiliza melhores condições de compactação. Assim,

nestas circunstâncias, o autor obteve valores efetivos de $2,35 \times 10^{-10}$ m/s e $6,56 \times 10^{-10}$ m/s, menores do que os próprios recomendados na literatura técnico-científica para a aplicação em barreiras impermeabilizantes de base (menores do que 10^{-9} m/s).

O valor do teor de umidade em condição de saturação foi obtido ao término do ensaio, utilizando-se das condições de saturação em que os corpos-de-prova apresentavam-se, sendo de 22,3% para corpo-de-prova submetido à água destilada e 21,8% para lixiviado.

6.4 Curvas de Retenção pelo Método do Papel Filtro

As características de moldagem de cada corpo-de-prova utilizado para obtenção das curvas de retenção pelo método do papel filtro, nas trajetórias de secagem e de umedecimento à água destilada e ao lixiviado, são apresentadas nas Tabelas 6.20 e 6.21, e são referentes: à massa de solo, altura e a diâmetro do corpo-de-prova, teor de umidade gravimétrico (w), índice de vazios (e), grau de saturação (Sr), massa específica natural (γ), massa específica dos sólidos (γ_s) e massa específica seca (γ_d).

Tabela 6.20 – Características iniciais dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de papel filtro (curva de retenção do solo à água destilada, por trajetória de secagem e umedecimento)

Características	Trajetória de Secagem			Trajetória de Umedecimento		
	CP 06	CP 07	CP 15	CP 04	CP 08	CP 13
Corpo-de-prova						
Altura (cm)	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Diâmetro (cm)	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Massa de solo (g)	80,21	79,71	78,80	81,47	78,39	80,39
w (%)	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4
e	0,53	0,54	0,56	0,50	0,56	0,52
Sr (%)	82,64	81,16	78,58	86,52	77,44	83,18
γ (g/cm ³)	2,026	2,014	1,991	2,058	1,981	2,031
γ_s (g/cm ³)	2,660	2,660	2,660	2,660	2,660	2,660
γ_d (g/cm ³)	1,741	1,730	1,710	1,768	1,702	1,745

Tabela 6.21 – Características iniciais dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de papel filtro (curva de retenção do solo ao lixiviado, por trajetória de secagem e umedecimento)

Características	Trajetória de Secagem			Trajetória de Umedecimento		
	CP 02	CP 10	CP 18	CP 17	CP 19	CP 25
Corpo-de-prova						
Altura (cm)	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Diâmetro (cm)	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Massa de solo (g)	80,44	80,50	82,33	79,26	80,51	81,41
w (%)	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4
e	0,52	0,52	0,49	0,55	0,52	0,51
Sr (%)	83,35	83,52	89,30	79,88	83,54	86,32
γ (g/cm³)	2,032	2,034	2,080	2,003	2,034	2,057
γ_s (g/cm³)	2,660	2,660	2,660	2,660	2,660	2,660
γ_d (g/cm³)	1,746	1,747	1,787	1,720	1,748	1,767

Todos os corpos-de-prova apresentaram características semelhantes, visto que foram moldados no mesmo dia e sob mesmas condições. Os valores de teor de umidade e massa específica seca dos corpos-de-prova ficaram próximos aos valores da camada de solo compactado na barreira impermeabilizante de base da célula experimental, que era o objetivo. As pequenas diferenças entre os valores dos parâmetros de cada corpo-de-prova podem ser explicadas pelo fato dos processos de adição de quantidade de água para atingir teor de umidade requerido, homogeneização e moldagem das amostras terem sido realizados manualmente (Tabelas 6.20 e 6.21). Nas Tabelas 6.22, 6.23 e 6.24 são apresentadas as caracterizações físico-químicas das amostras de lixiviado utilizadas nos ensaios de papel filtro para determinação das curvas de retenção do solo ao lixiviado, sendo as Tabelas 6.22 e 6.23 referentes à Trajetória de Umedecimento nas primeiras 7 semanas (1 a 7) e nas semanas seguintes (8 a 13), respectivamente, enquanto a Tabela 6.24 é referente ao lixiviado utilizado no ensaio à Trajetória de Secagem. Nas Figuras 6.18 e 6.19 são apresentados os pontos empíricos obtidos pelo método do papel filtro e as curvas de retenção ajustadas pelo modelo de van Genuchten (1980). A Figura 6.18 refere-se ao ensaio com os corpos-de-prova à água destilada e a Figura 6.19 ao lixiviado.

Tabela 6.22 – Caracterização físico-química dos lixiviados utilizados no ensaio de papel filtro para determinação das curvas de retenção do solo ao lixiviado (semanas 1 a 7) – Trajetória de Umedecimento ao Lixiviado

SEMANAS	1	2	3	4	5	6	7
pH	6,4	7,5	8,2	8,4	8,4	8,5	8,6
Potencial Redox (mV)	-189,0	-336,0	-365,7	-479,0	-385,0	-426,0	-353,0
Condutividade (mS)	52,0	53,0	46,4	41,6	40,8	39,2	38,6
Alcalinidade Parcial (mg CaCO₃/L)	1.952	4.880	9.882	14.884	15.677	15.738	14.213
Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	18.300	12.505	16.470	17.578	17.690	16.714	15.982
Ácidos Orgânicos (mg HAc/L)	21.286,7	15.459,6	6.778,5	1.011,0	771,1	771,0	832,0
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH₃/L)	2.476,6	2.954,8	3.057,3	3.108,6	2.723,5	3.044,0	2.716,0
DQO (mg O₂/L)	54.500	46.655	18.861	5.956	5.013	5.162	4.517
DBO (mg O₂/L)	-	28.900	-	-	1.008	-	332

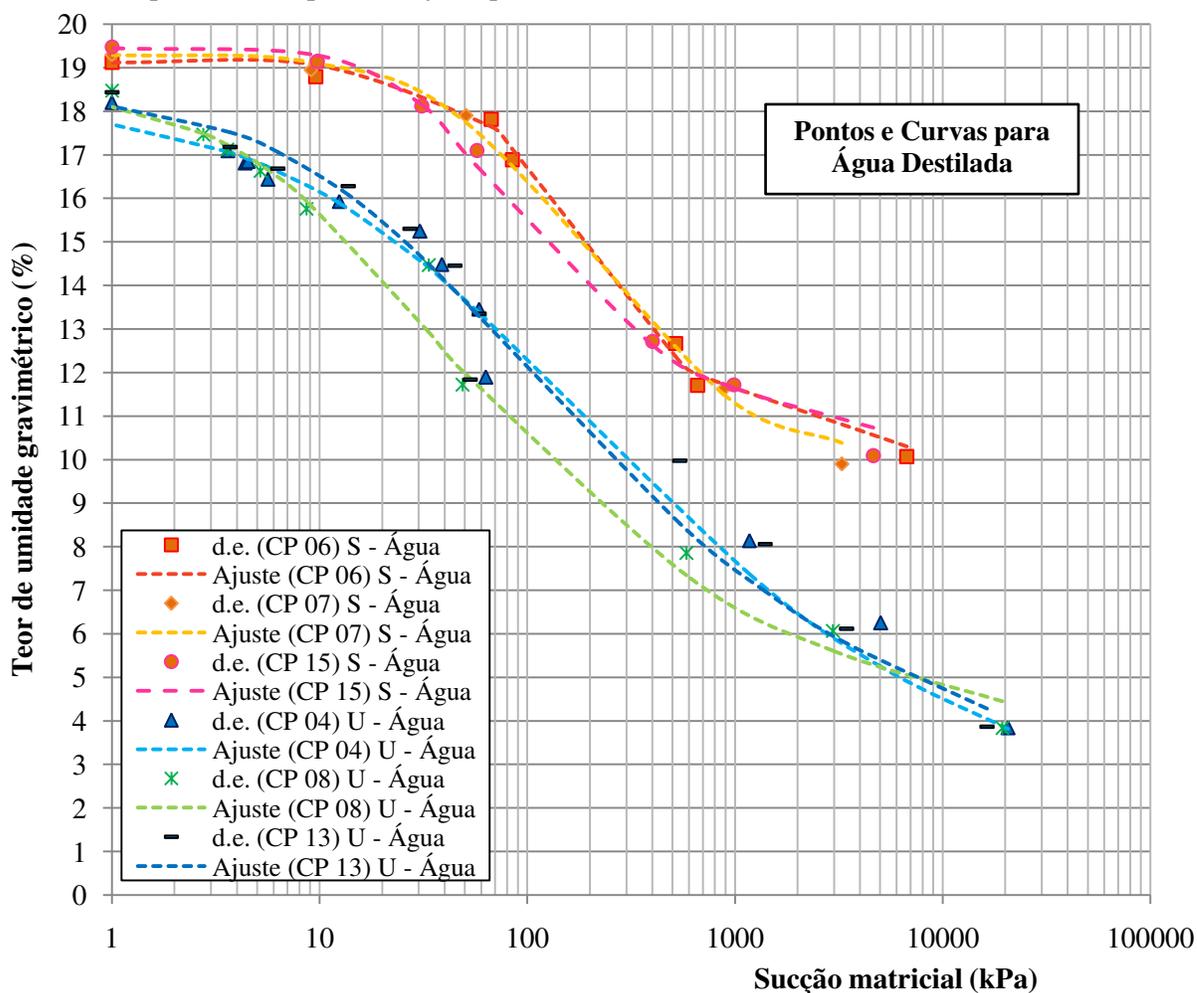
Tabela 6.23 – Caracterização físico-química dos lixiviados utilizados no ensaio de papel filtro para determinação das curvas de retenção do solo ao lixiviado (semanas 8 a 13) – Trajetória de Umedecimento ao Lixiviado

SEMANAS	8	9	10	11	12	13
pH	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,3
Potencial Redox (mV)	-404	-358	-359	-376	-385	-215
Condutividade (mS)	38,6	40,2	35,5	36,1	37,4	32,8
Alcalinidade Parcial (mg CaCO₃/L)	13908	13397	11081	11275	11664	11275
Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	15555,0	14260,0	12441,6	12830,5	13219,2	12830,4
Ácidos Orgânicos (mg HAc/L)	942,0	600,0	857,0	571,2	742,6	1285,0
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH₃/L)	2784,0	2647,0	2736,0	2750,0	2852,4	2920,7
DQO (mg O₂/L)	3818	3756	4222	3787	3787	3725
DBO (mg O₂/L)	-	439	-	432	-	-

Tabela 6.24 – Caracterização físico-química dos lixiviados utilizados no ensaio de papel filtro para determinação das curvas de retenção do solo ao lixiviado – Trajetória de Secagem ao Lixiviado

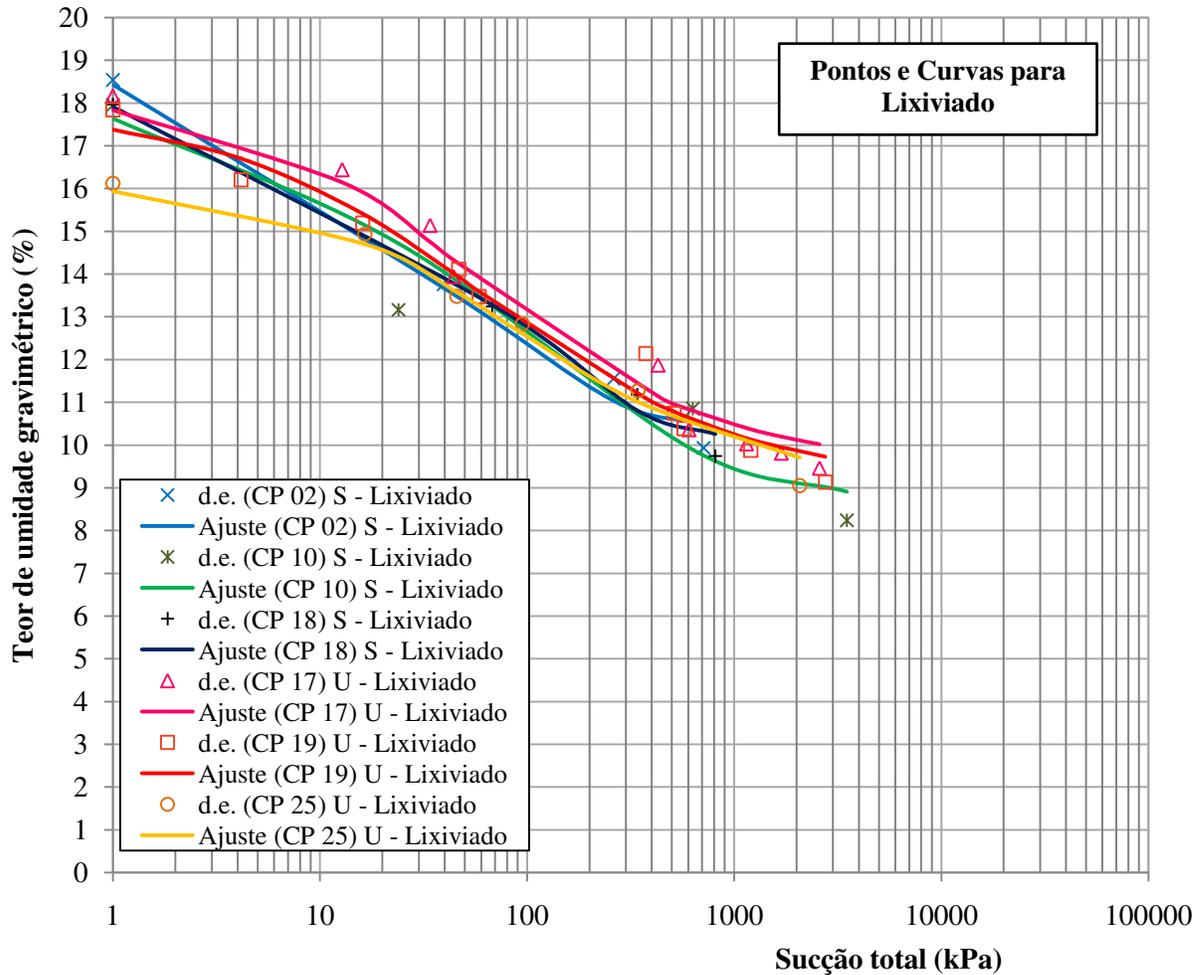
Parâmetro	Valor
pH	5,5
Potencial Redox (mV)	-54,5
Condutividade (mS)	50,4
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	16.531,0
Ácidos Orgânicos (mg HAc/L)	22.650,5
Nitrogênio Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	1.434,7
DQO (mg O ₂ /L)	77.924

Figura 6.18 – Curvas de retenção das trajetórias de secagem e umedecimento à água destilada, plotadas por dados empíricos e ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980)



*d.e.: dados empíricos; Ajuste: van Genuchten; S: trajetória de secagem; U: trajetória de umedecimento.

Figura 6.19 – Curvas de retenção das trajetórias de secagem e umedecimento ao lixiviado, plotadas por dados empíricos e ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980)



*d.e.: dados empíricos; Ajuste: van Genuchten; S: trajetória de secagem; U: trajetória de umedecimento.

Observou-se uma afinidade entre os dados obtidos dos 3 corpos-de-prova de cada trajetória em cada fluido (secagem à água destilada, umedecimento à água destilada, secagem ao lixiviado e umedecimento ao lixiviado), demonstrando confiabilidade ao ensaio (Figuras 6.18 e 6.19). As pequenas diferenças e distanciamento de valores entre as curvas da mesma trajetória para o mesmo fluido podem ser decorrentes das diferenças de valores dos parâmetros das Tabelas 6.20 e 6.21, como maior ou menor índice de vazios, maior ou menor grau de saturação, massa específica seca, entre outros.

Em análise ao procedimento geral do ensaio de papel filtro, as trajetórias de umedecimento garantiram um maior número de dados empíricos a serem apresentados do que as

trajetórias de secagem, no entanto todos os ensaios confirmaram resultados suficientes para realizar a modelagem.

Visto que o papel filtro não fica em contato direto com o solo no ensaio ao lixiviado, os valores de sucção das curvas de retenção da Figura 6.19 referem-se à sucção total, estimados pelos valores de absorção de vapor do fluido (lixiviado) do solo pelo papel filtro, após este vapor ter superado as forças matriciais e osmóticas para sair do solo. Como no ensaio à água destilada ocorreu o contato direto entre o solo e o papel filtro, os valores de sucção da Figura 6.18 referem-se à sucção matricial medida, no qual o papel filtro atua como uma membrana permeável à água e solutos, isto é, a solução intersticial moveu-se através do papel filtro junto com a água absorvida, sendo a transferência de água do solo para o papel realizada por capilaridade (LEE e WRAY, 1995 e MONCADA, 2004).

Segundo Barbour (1998), a faixa entre 0 e 1000 kPa de sucção nas curvas de retenção refere-se à atuação da fase líquida, de energia mecânica e de forças de capilaridade no solos, enquanto a faixa a partir de 1000 kPa compreende a fase de vapor, energia química e forças de adsorção.

Na literatura técnico-científica já vêm sendo discutidas as possíveis diferenças ocasionadas por curvas de retenção que envolve valores de sucção matricial ou sucção total. Ridley (1993) sugeriu que pode haver uma diferença significativa entre a curva de calibração utilizada para medição de valor de sucção total e de sucção matricial, visto que nas medidas de sucção total ocorre a absorção de água pelo papel filtro através da fase de vapor, o que é diferente do processo de absorção pela fase líquida (medidas de sucção matricial). Logo, é existente uma polêmica à utilização de uma única curva de calibração para os métodos sem contato (sucção total) e com contato (sucção matricial) para o ensaio por papel filtro (MONCADA, 2004), no entanto assim como na maioria dos trabalhos, nesta pesquisa foi utilizada uma única equação para medir os dois tipos de sucção. Neste caso, não é descartada a hipótese de diferença nas curvas de retenção das Figuras 6.18 e 6.19 devido ter-se utilizado a mesma calibração tanto para as curvas de retenção à água destilada, quanto ao lixiviado.

O período de tempo exigido para atingir a situação de equilíbrio entre o papel filtro e o solo, o qual varia segundo a determinação dos valores de sucção total ou matricial pode ter

influenciado para a diferenciação das curvas de retenção à água e ao lixiviado, de acordo com Woodburn e Lucas (1995) e Moncada (2004). Segundo Marinho (1994; 1997) e Moncada (2004), o tempo suficiente de equilíbrio para medições de sucção matricial é de 7 dias, já para a medição de sucção total, a duração deste período pode depender do nível de sucção, sendo de mais de 30 dias para sucções de 0 – 100 kPa, 30 dias para faixa de 100 – 250 kPa, 15 dias (250 – 1000 kPa) e 7 dias (1000 – 30000 kPa). Nesta pesquisa, foi utilizado o tempo de equilíbrio igual a 7 dias para todas as medições, sem distinções quanto ao valor de sucção ou fluido utilizado.

Em ensaios de curva de retenção com solos contaminados com licor cáustico, através da trajetória de secagem, Moncada (2004) obteve que os valores de sucção osmótica apresentam um crescimento com a diminuição do teor de umidade, o que pode ser percebido também nas curvas deste trabalho (Figura 6.19) a partir de 100 kPa, quando as curvas de retenção ao lixiviado passam a se localizar acima das curvas de retenção à água na trajetória de umedecimento. É provável que esse aumento seja referente à proporção de aumento na concentração de contaminantes quando há redução do teor de umidade.

Segundo Fredlund (2002), Moncada (2004), Sreedeeep e Singh (2006) e Boszczowski (2008), a quantidade de sais presentes no solo pode influenciar a interpretação da curva de retenção, na qual à medida que o teor de umidade no solo decresce, a concentração de sais aumenta, resultando em um aumento da sucção osmótica. Isto é, o decréscimo de umidade no solo provoca um aumento significativo da sucção osmótica.

Assim, os valores de sucção matricial mostram-se mais influente em relação ao comportamento do solo para elevados teores de umidade, enquanto que a sucção osmótica apresenta-se mais importante em baixos teores de umidade na curva de retenção. Para baixos teores de umidade, os valores de sucção total podem permanecer elevados devido à sucção osmótica presente. Sendo que os valores de sucção osmótica não são constantes para toda a faixa de umidade, tendo seu aumento decorrente devido à alta concentração de solutos em baixos teores de umidade (BOSZCZOWSKI, 2008).

A quantidade de sais presentes em um solo influencia fortemente os valores de sucção total, indicando que a componente de sucção osmótica domina a medida de sucção total (MILLER e NELSON, 2006). Para valores altos de sucção, a sucção matricial e a sucção total

assumem, na maior parte, valores similares em magnitude (FREDLUND et al., 1995), o que explica a tendência das curvas de retenção ao lixiviado se aproximarem das curvas de retenção à água (trajetória de secagem) a partir de 100 kPa de sucção (Figuras 6.18 e 6.19).

Muitos autores afirmam que as mudanças nos parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado (coeficiente de permeabilidade, variação do volume, transporte de contaminantes na zona não saturada, entre outros) estão relacionadas a mudanças no valor de sucção matricial e não em mudanças na sucção total. No entanto, esta afirmação resulta verdadeira apenas para solos naturais, onde o conteúdo de sais da água intersticial quase não apresenta mudanças. No caso de solos contaminados, como nos ensaios de papel filtro ao lixiviado, nos quais existem alterações na composição química quase simultânea com o ingresso do contaminante ao solo, a influência da componente de sucção osmótica na mudança das propriedades do solo saturado ou não saturado ainda precisa ser melhor estudada, a fim de também compreender as variações dos importantes parâmetros de comportamento do solo relativas às mudanças nas sucções osmóticas (MONCADA, 2004).

Analisando valores nas curvas de retenção, no teor de umidade da barreira impermeabilizante em campo (16,4%), o valor da sucção matricial foi, em média, de 100 kPa para a curva de retenção na trajetória de secagem à água e 10 kPa na trajetória de umedecimento à água. Para as curvas de retenção ao lixiviado, em ambas as trajetórias, os valores de sucção total situaram-se entre 6 a 10 kPa. Observa-se que a retenção do lixiviado pelo solo foi menor do que a da água destilada, neste mesmo teor de umidade, logo a presença do lixiviado no solo provoca uma redução da sucção para a umidade de campo, o que conseqüentemente aumenta o coeficiente de permeabilidade da barreira impermeabilizante de base ao lixiviado (Figuras 6.18 e 6.19).

Em Silva, Murrieta e Cardim (2007), a presença do lixiviado no solo também reduziu o valor de sucção matricial, em cerca de 400 kPa, com relação ao teor de umidade natural do solo estudado, no caso de 22%.

Para melhor análise comparativa entre as curvas de retenção à água e ao lixiviado, nas Tabelas 6.25 e 6.26, são expostos os valores de teor de umidade gravimétrica correspondente a seis valores de sucção (10, 50, 100, 300, 500 e 1000 kPa) relativos ao ensaio à água e ao

lixiviado, sendo a Tabela 6.25 referente aos valores dos ensaios com trajetória de secagem e a Tabela 6.26 aos ensaios com trajetória de umedecimento.

Ressalta-se novamente que os valores de sucção nos ensaios à água destilada são valores de sucção matricial, enquanto nos ensaios ao lixiviado, são valores de sucção total, isto é, dada pela soma da sucção matricial com a sucção osmótica.

Tabela 6.25 – Análise comparativa dos dados experimentais – Trajetória Secagem

Sucção (kPa)	ÁGUA DESTILADA			LIXIVIADO			Diferença nas médias de água e lixiviado (%)
	Teor de umidade gravimétrico (%)	Média (%)	Desvio Padrão	Teor de umidade gravimétrico (%)	Média (%)	Desvio Padrão	
10	19,1 (CP06)	19,2	0	15,5 (CP02)	15,6	0,09	3,6 (retém 19% a mais de água)
	19,1 (CP07)			15,7 (CP10)			
	19,3 (CP15)			15,5 (CP18)			
50	17,9 (CP06)	17,6	0,4	13,4 (CP02)	13,6	0,12	4,0 (retém 23% a mais de água)
	17,8 (CP07)			13,7 (CP10)			
	17,0 (CP15)			13,6 (CP18)			
100	16,6 (CP06)	16,2	0,48	12,4 (CP02)	12,6	0,16	3,6 (retém 22% a mais de água)
	16,4 (CP07)			12,6 (CP10)			
	15,5 (CP15)			12,8 (CP18)			
300	13,8 (CP06)	13,6	0,28	10,9 (CP02)	10,9	0	2,7 (retém 20% a mais de água)
	13,8 (CP07)			10,9 (CP10)			
	13,2 (CP15)			10,9 (CP18)			
500	12,5 (CP06)	12,5	0,08	10,6 (CP02)	10,4	0,17	2,1 (retém 17% a mais de água)
	12,6 (CP07)			10,2 (CP10)			
	12,4 (CP15)			10,5 (CP18)			
1000	11,7 (CP06)	11,6	0,14	--- (CP02)	9,5	0	2,1 (retém 18% a mais de água)
	11,4 (CP07)			9,5 (CP10)			
	11,7 (CP15)			--- (CP18)			

Tabela 6.26 – Análise comparativa dos dados experimentais – Trajetória Umedecimento

Sucção (kPa)	ÁGUA DESTILADA			LIXIVIADO			Diferença nas médias de água e lixiviado (%)
	Teor de umidade gravimétrico (%)	Média (%)	Desvio Padrão	Teor de umidade gravimétrico (%)	Média (%)	Desvio Padrão	
10	16,2 (CP04)			16,3 (CP17)			0,4 (retém 2% a mais de água)
	15,6 (CP08)	16,1	0	15,9 (CP19)	15,7	0	
	16,5 (CP13)			15,0 (CP25)			
50	13,7 (CP04)			14,2 (CP17)			-0,7 (retém 5% a mais de lixiviado)
	11,9 (CP08)	13,1	0,83	13,8 (CP19)	13,8	0,29	
	13,6 (CP13)			13,5 (CP25)			
100	12,4 (CP04)			13,2 (CP17)			-1,2 (retém 10% a mais de lixiviado)
	10,6 (CP08)	11,7	0,79	12,9 (CP19)	12,9	0,29	
	12,1 (CP13)			12,5 (CP25)			
300	10,0 (CP04)			11,7 (CP17)			-2,0 (retém 18% a mais de lixiviado)
	8,5 (CP08)	9,4	0,65	11,4 (CP19)	11,4	0,21	
	9,7 (CP13)			11,2 (CP25)			
500	9,0 (CP04)			11,0 (CP17)			-2,4 (retém 23% a mais de lixiviado)
	7,5 (CP08)	8,4	0,65	10,8 (CP19)	10,8	0,12	
	8,7 (CP13)			10,7 (CP25)			
1000	7,6 (CP04)			10,5 (CP17)			-3,2 (retém 31% a mais de lixiviado)
	6,6 (CP08)	7,2	0,45	10,3 (CP19)	10,4	0,09	
	7,5 (CP13)			10,3 (CP25)			

A partir dos dados das Tabelas 6.25 e 6.26, observa-se que para um mesmo valor de sucção, nas trajetórias de secagem, o solo retém maior quantidade de água destilada do que de lixiviado. Já nas trajetórias de umedecimento, ocorre o contrário, relatando maior retenção de lixiviado do que água destilada, pelo solo. Exceto para valores de sucção igual ou menor a 10 kPa.

Levando em consideração os valores obtidos para água destilada, as diferenças nas médias de umidade gravimétrica medidas correspondem a cerca de 20% para as curvas de retenção à

água e ao lixiviado nas trajetórias de secagem e variam de 2% a 31% nas trajetórias de umedecimento. Assim, tem-se que as diferenças entre as curvas de ambos fluidos são significativas, demonstrando que o lixiviado possui efeito distinto à água nas características de retenção do solo.

Nas trajetórias de secagem, maiores valores de sucção demonstram menores diferenças de teor de umidade para curvas de retenção à água e ao lixiviado, tendendo ao equilíbrio em cerca de 10000 kPa. Já nas trajetórias de umedecimento ocorre o contrário, até o valor de 50 kPa, as curvas de retenção à água e ao lixiviado são bastante próximas, uma vez que ultrapassado este valor, ocorre um distanciamento.

Merayyan e Hope (2009) relataram maiores diferenças percentuais de teor umidade nas curvas de retenção à água e ao lixiviado de um solo para maiores valores de sucção matricial, na trajetória de secagem. Neste trabalho, pela Tabela 6.25, observa-se o contrário à Merayyan e Hope (2009) na trajetória de secagem, sendo relatadas menores diferenças percentuais para maiores valores de sucção matricial. Os resultados de Merayyan e Hope (2009) relacionam mais aos resultados obtidos para as trajetórias de umedecimento deste trabalho.

Em estudo de Duarte e Souza (2003), com contaminante hidrocarboneto (gasolina) no solo, os autores observaram que a amostra no estado natural, não contaminada, apresenta menor porosidade em comparação com a amostra após contaminação com gasolina. Segundo os autores, a amostra em estado natural apresenta uma matriz fina que preenche os espaços entre os grãos de quartzo do solo, enquanto que a amostra após contaminação apresenta uma matriz mais concentrada em torno dos grãos de quartzo do solo e, portanto, maior porosidade.

Miguel et al. (2011) estudaram solos com e sem vinhaça (contaminante proveniente da produção de álcool combustível) e também obtiveram que a presença do contaminante vinhaça acarreta aumento na macroporosidade do solo e diminuição da capacidade de retenção.

Os gráficos dos resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio são apresentados nas Figuras 6.20 e 6.21, nas quais há os resultados de total de mercúrio introduzido *versus* diâmetro dos poros e o logaritmo diferencial de volume de mercúrio introduzido nas amostras *versus* diâmetro dos poros, respectivamente.

Figura 6.20 – Distribuição percentual dos poros dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de curva de retenção e um corpo-de-prova controle

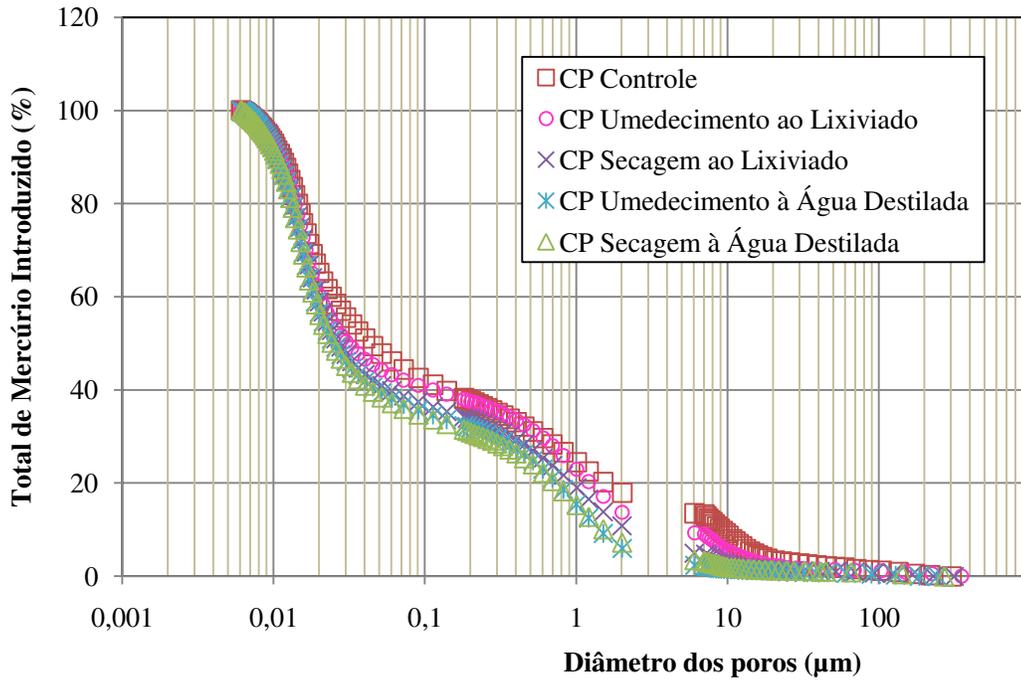
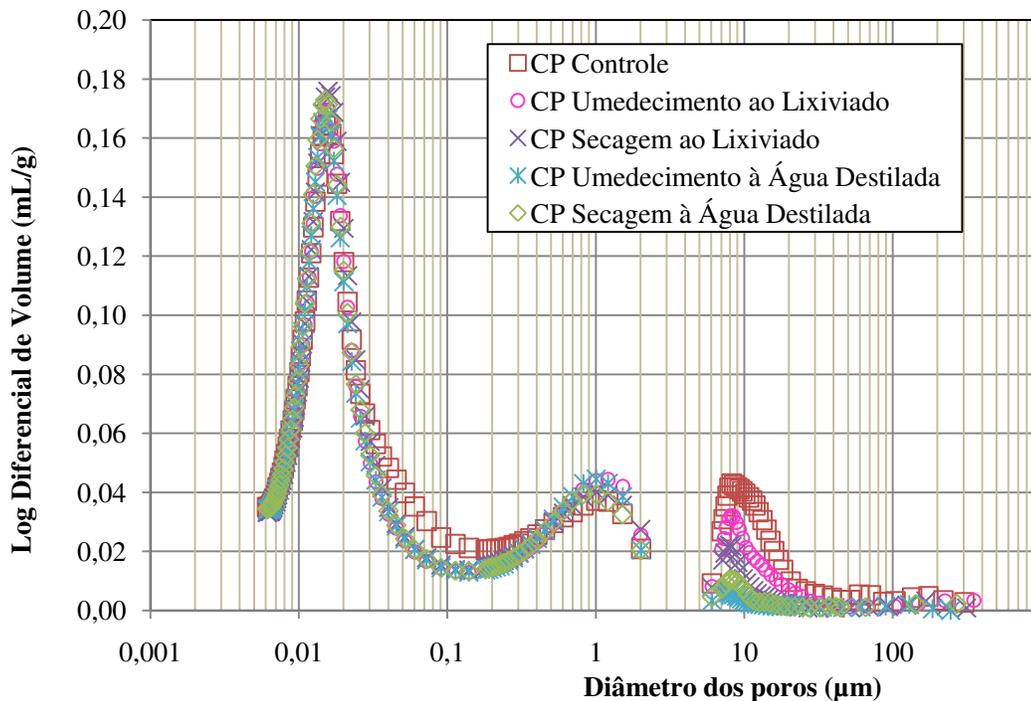


Figura 6.21 – Logaritmo diferencial de volume de mercúrio introduzido nas amostras *versus* diâmetro dos poros dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de curva de retenção e um corpo-de-prova controle



Quando observados os gráficos dos resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, são relatadas apenas diferenças significativas para a macroporosidade entre a estrutura dos poros dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de papel filtro à água destilada (trajetórias de secagem e umedecimento), dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de papel filtro ao lixiviado (trajetórias de secagem e umedecimento) e o corpo-de-prova controle, compactado nas mesmas condições, mas que não foi submetido ao ensaio de papel filtro. Não são relatadas diferenças significativas entre a microporosidade dos corpos-de-prova.

Pelos gráficos das Figuras 6.20 e 6.21, relativos à porosimetria dos solos, observa-se que os corpos-de-prova das trajetórias de secagem e umedecimento à água e ao lixiviado apresentam uma quantidade de poros com diâmetros muito semelhantes, sendo que a amostra de solo controle apresenta maior quantidade de poros com diâmetro maiores nos picos entre os diâmetros 0,03 e 0,3 μm e 7 e 30 μm da Figura 6.21 e observa-se isto também entre 0,03 e 0,02 μm e entre 5 e 30 μm da Figura 6.20.

Esta diferença na macroporosidade entre o corpo-de-prova controle e os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de papel filtro (curva de retenção) pode ser explicada em função das ações da água ou lixiviado na estrutura do solo submetido às trajetórias de umedecimento ou secagem, a qual, segundo Calle (2000) e Bonder e Miguel (2011) provoca a alteração na estrutura do solo devido às ações de contração e expansão relativos às trajetórias de secagem e umedecimento. Além da ação explicada anteriormente sobre amostras após contaminação apresentarem uma matriz mais concentrada em torno dos grãos do solo e, portanto, maior porosidade, devido à ação do contaminante na estrutura do solo.

Como não há diferença significativa entre a microporosidade dos corpos-de-prova, mas há diferença entre as curvas de retenção do solo à água e ao lixiviado (Figuras 6.18 e 6.19), as alterações dos valores de sucção na presença do contaminante lixiviado podem ter ocorrido em decorrência às diferenças de valores das medições relativas às sucções matriciais ou totais (osmótica), como explanada anteriormente, ou podem ter ocorrido devido a alterações relativas ao raio do menisco entre os grãos e/ou atuação das distintas propriedades hidráulicas dos líquidos, como a viscosidade e a velocidade de fluxo, assim como em Silva, Murrieta e Cardim (2007), os quais realizam ensaios com solos lateríticos em estado natural local de Brasília – DF.

Na Figura 6.21, é evidente a predominância de microporos (grande pico entre 0,01 μm e 0,03 μm) para todos os corpos-de-prova, visto que são corpos-de-prova em estado compactado. Os macroporos (poros maiores do que aproximadamente 40 μm) representam os poros responsáveis pela aeração e drenagem do solo, isto é, condução da água durante o processo de infiltração. Enquanto os microporos (poros menores do que aproximadamente 40 μm) representam os poros responsáveis pela retenção da água no solo, sendo denominados também por poros capilares. Nestes poros, a água também se move, no entanto, de uma forma lenta. A proporção de micro e macroporos afeta a capacidade de retenção de água no solo, e quanto mais frequente a microporosidade, maior a retenção de água pelo solo (RICHARDS, 1965; BRADY, 1979; KIEHL, 1979; KLEIN e LIBARDI, 2002; SILVA, 2003; ANTILÉN et al., 2004; LIBARDI, 2005; SILVA, CABEDA e LIMA, 2005; RIBEIRO et al., 2007 e FERREIRA, 2008).

Gerscovich & Sayão (2002) comparam curvas de retenção em estado natural e solos compactados, demonstrando que a compactação gera uma redução no volume dos poros maiores (macroporos) e pouco ou nenhum efeito nos poros menores (microporos).

Do mesmo modo que as curvas de retenção à água e ao lixiviado apresentam valores de sucção distintos para esses dois fluidos, foi também verificada a diferença de que nos ensaios à água destilada ocorre o fenômeno de *histerese* entre as curvas de retenção das trajetórias de secagem e umedecimento, mas não é percebido esse fenômeno entre as curvas de retenção ao lixiviado (Figura 6.18). Isto é, observou-se que nas curvas de retenção à água, as quais na trajetória de secagem permitem uma maior retenção de água do que à trajetória de umedecimento, dado um mesmo valor de sucção. Para ensaios à água, esse fenômeno é esperado pela literatura técnica, sendo que ele pode estar associado às diversas causas, segundo Miguel, Teixeira e Padilha (2006), como: não uniformidade geométrica de cada poro, fenômenos de superfície, efeito do ângulo de contato (maior na trajetória de umedecimento do solo e menor na trajetória de secagem), bolhas de ar capturadas nos vazios do solo durante a trajetória de umedecimento, alterações na estrutura do solo decorrentes da expansão ou contração (associadas às trajetórias de umedecimento ou secagem), diferenças nas formas de absorção ou perda de água pelas trajetórias de secagem e umedecimento, entre outros.

A ausência de distinções acentuadas nas curvas de retenção ao lixiviado para as trajetórias de umedecimento e secagem, isto é, a ausência do fenômeno da *histerese* nas curvas de retenção do solo ao lixiviado, podem ser devido às medições de valores de sucção total nestes ensaios, decorrente da contribuição da sucção matricial e sucção osmótica, a qual depende também das propriedades químicas e de concentração do fluido e não somente da matriz do solo.

O lixiviado de aterros sanitários combina diversos compostos químicos, de propriedades variadas, os quais possuem características singulares sobre os grãos do solo e potencialidade para modificar a composição da água no solo, tornando difícil a previsão do comportamento desses compostos nas barreiras impermeabilizantes de base. Segundo Merayyan e Hope (2009), o lixiviado tem potencialidade para mudar drasticamente a química dos fluidos nos poros do solo.

As diversas interações complexas que ocorrem entre a superfície dos grãos do solo e os constituintes do lixiviado de aterro sanitário dependem das características químicas e físicas de ambas as partes, solo e lixiviado (CALACE et al., 2001).

Assim, o comportamento diferenciado entre a interação do solo com o lixiviado e seus contaminantes ocorre em virtude de que este fluido é constituído por diferentes substâncias, dentre as quais há as pouco e muito solúveis aos líquidos do solo. Devido a isso, é provável que as distinções das curvas de retenção à água destilada e ao lixiviado sejam em decorrência de reações entre os grãos, lixiviado e água, reações dos compostos do lixiviado com a matéria orgânica do solo e a grande influência da componente osmótica da sucção do solo, visto que esta última considera a natureza dos líquidos (SILVA, MURRIETA e CARDIM, 2007). O ensaio à água destilada permite medições de sucções matriciais, enquanto nos ensaios ao lixiviado há também a influência da sucção osmótica, medindo sucções totais do solo, visto as propriedades do fluido em conter compostos químicos (concentração de solutos) distintos, capazes de proporcionar mudança das propriedades do solo saturado e não saturado.

A presença de óleos na superfície dos grãos do solo, por exemplo, não evapora na secagem do corpo-de-prova ao ar e gera um comportamento diferenciado de retenção, visto que as propriedades químicas desses óleos também influenciarão para a maior ou menor retenção, como observado por Wada e Futai (2007).

Outra hipótese entre as distinções das curvas entre água e lixiviado e a não ocorrência de *histerese* nas curvas ao lixiviado pode ser devido às alterações nos corpos-de-prova decorrentes dos compostos presentes no lixiviado, os quais podem ter aderido às superfícies dos corpos-de-prova, modificando a dinâmica de retenção do solo (Figura 6.22).

Sendo assim, para melhor e mais preciso entendimento, faz-se necessário mais estudos através de outros métodos de obtenção de curvas de retenção ao lixiviado de aterros sanitários e análises aprofundadas da interação e comportamento do solo com os compostos do lixiviado.

A *histerese* é menos evidente para as curvas de retenção em termos de sucção total, computando diferenças de significativa magnitude em relação à evidência da *histerese* para curvas de retenção em termos de sucção matricial (BORGES et al, 2011). O fato relatado por Borges et al. (2011) pode ser observado neste trabalho, em que quando analisadas as curvas de retenção referentes a valores de sucção total *versus* teor de umidade (6.19), o fenômeno de *histerese* não é significativo quanto nas curvas de sucção matricial *versus* teor de umidade (6.18).

Os fatos de que nos ensaios ao lixiviado houve maior dificuldade em saturar inicialmente os corpos-de-prova que foram submetidos à trajetória de secagem e maior dificuldade em umedecer os corpos-de-prova da trajetória de umedecimento ao lixiviado podem também contribuir para a menor atuação da *histerese* nas curvas de retenção deste ensaio, visto que, segundo Konyai et al. (2006) este fenômeno depende dos teores de umidade extremos em que se iniciam e finalizam os solos dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio, como sendo de seco para estado saturado na trajetória de umedecimento e de saturado para estado seco na trajetória de secagem. Durante essa passagem de teores de umidade do solo é que surgem as diferentes atuações entre fluido e solo, as quais geram a *histerese*.

Em Cardoso et al. (2011), os autores demonstraram que as curvas de retenção com solos moldados em condições abaixo do teor ótimo apresentaram menores evidência de *histerese* para sucção total do que quando os corpos-de-prova eram moldados acima do teor de umidade ótimo. Ressalta-se que as curvas de retenção da Figuras 6.18 e 6.19 são referentes a corpos-de-prova moldados abaixo do teor de umidade ótimo do solo e que na medição da sucção total (ensaio ao lixiviado) não é possível notar o fenômeno da *histerese* entre as curvas da trajetória de secagem e umedecimento.

Uma hipótese elaborada por Borges et al. (2011), em trabalho no qual não conseguiram medir a *histerese* para alguns solos utilizando de medições de sucção total, é de que o papel filtro pode não ser capaz de medir a *histerese* das curvas de retenção de certos solos em determinadas condições, sendo este fato justificado por vários fatores que ocorrem no ensaio, os quais podem causar diferenças de teor de umidade da base-meio-topo dos corpos-de-prova. Segundo os autores, o próprio fenômeno de *histerese* do solo resulta em umidades que variam ao longo do corpo-de-prova, logo há a necessidade de uma técnica em que se use um processo mais controlado e lento de variação da umidade do solo.

Mesmo que distintas, nota-se pelas Figuras 6.18 e 6.19 que todas as curvas, tanto do ensaio à água, quanto ao lixiviado, possuem um formato unimodal, típico do comportamento de solo compactado, como elucidado em Gerscovich (1994), Gerscovich e Sayão (2002) e Perdomo (2010). Isto é, o comportamento unimodal das curvas adéqua aos solos com poros de distribuição aparentemente unimodais, o que representa um solo com distribuição homogênea ou bem graduada, isto é, solo de estrutura uniforme no tamanho dos poros na faixa de sucção ou umidade analisada (DELGADO et al., 2003 e SOTO, KIANG e VILAR, 2008).

O modelo unimodal é aquele que se caracteriza por prover curvas compostas de um único trecho, no qual a curva inicia em linha parcialmente horizontal, possui um declínio quando o solo deixa o teor de umidade próximo da saturação e tende a tornar-se horizontal novamente quando se aproxima dos valores de teor de umidade residual. Segundo Gerscovich (1994) e Gerscovich e Sayão (2002), quando comparadas as curvas de retenção de solos compactados e curvas de solos não compactados (indeformados), os solos compactados retêm menor quantidade de água e possui um formato de curva com menor inclinação, sendo que em maiores valores de sucção e menor teor de umidade, as curvas de solo compactado tendem a igualar às curvas de solos indeformados.

Essa diferença de formato entre as curvas de solo compactado e não compactado pode ser explicada, segundo Perdomo (2010), devido ao fato que solos com maior quantidade de macroporos demoram mais a estabilizar, visto que a água escoar mais rapidamente entre esses poros, fazendo com que as curvas de retenção sejam menos uniformes ou de maior declividade. Já os solos compactados, com predominância de microporos, apresentam tendências de

comportamentos mais estáveis. A autora relaciona a distribuição entre micro e macro porosidade diretamente com a curva de retenção.

Neste caso, as curvas têm comportamento unimodal devido à predominância de microporos nos solos, visto seu estado compactado. Essa predominância de microporos pode ser observada nas Figuras 6.20 e 6.21.

Os valores dos parâmetros de ajuste das curvas: alfa (α), m, n, teor de umidade gravimétrico em condições saturadas (w_s) e teor de umidade gravimétrico residual (w_r) são apresentados na Tabela 6.27 e 6.28.

Tabela 6.27 – Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) de ajuste das curvas de retenção à água destilada para os corpos-de-prova à trajetória de secagem e umedecimento

Trajetória	Corpo de prova	Parâmetros do modelo				
		A	m	n	w_s (%)	w_r (%)
Secagem	06	0,0099	0,451	1,800	19,12	10,00
	07	0,0100	0,540	1,402	19,30	9,70
	15	0,0291	0,251	2,079	19,45	10,00
Umedecimento	04	0,0200	0,439	0,683	18,20	1,00
	08	0,0950	0,302	1,050	18,47	3,00
	13	0,0402	0,319	0,871	18,43	1,50

Tabela 6.28 – Parâmetros da equação de van Genuchten (1980) de ajuste das curvas de retenção ao lixiviado para os corpos-de-prova à trajetória de secagem e umedecimento

Trajetória	Corpo de prova	Parâmetros do modelo				
		A	m	n	w_s (%)	w_r (%)
Secagem	02	0,0709	0,509	1,379	18,54	9,94
	10	0,0399	0,601	0,898	17,95	8,24
	18	0,0312	0,650	1,311	17,97	9,74
Umedecimento	17	0,0231	0,829	0,799	18,17	9,46
	19	0,0165	0,981	0,699	17,84	9,13
	25	0,0129	0,882	0,799	16,12	9,05

De forma geral, verificou-se um ajuste adequado entre os dados empíricos (obtidos experimentalmente) e o modelo de van Genuchten (1980). Em todos os corpos-de-prova, o parâmetro alfa (α) apresentou valores baixos, como ocorre em Moraes et al. (2012) para solos sob estados de compactação. Os valores dos parâmetros de ajuste alfa (α) e n foram similares aos obtidos por Miller et al. (2000) para obtenção de curvas de retenção utilizando 6 tipos de solos argilosos utilizados como camada de solo compactado de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários (Tabelas 6.27 e 6.28).

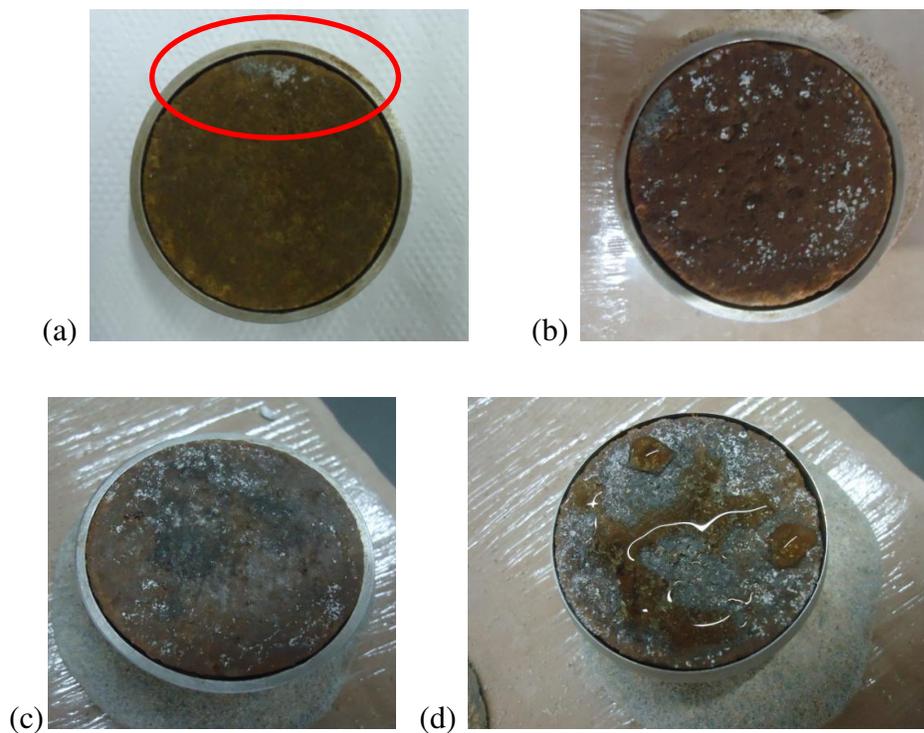
Os efeitos do lixiviado nas características individuais das curvas, tais como valor de teor de umidade gravimétrica em condições saturadas (w_s), teor de umidade gravimétrica residual (w_r), valor de entrada de ar (ψ_a) para a curva pela trajetória de secagem, inclinação (n) e rotação (m) são mais sutis, assim como ocorre em Merayyan e Hope (2009). As curvas ao lixiviado não permanecem horizontais nos pontos de teor de umidade em condições saturadas até o valor de entrada de ar (ψ_a) e então começam a declinar, como é normal de ocorrer nas curvas à água da trajetória de secagem.

A comparação dos resultados dos parâmetros de van Genuchten (1980) para curvas à água e ao lixiviado (Tabelas 6.27 e 6.28) indica que α aumentou quando o solo foi permeado com lixiviado na trajetória de secagem, sugerindo uma redução no valor de entrada de ar. O aumento no parâmetro m para ambas trajetórias ao lixiviado indicam uma maior rotação e menor assimetria das curvas ao lixiviado. O parâmetro n, sendo menor para as curvas ao lixiviado, indica uma menor inclinação e maior igualdade na distribuição do tamanho dos poros.

Os ensaios ao lixiviado garantiram menor número de dados empíricos do que os ensaios à água destilada, podendo ser explicado ao fato da maior dificuldade em saturar os corpos-de-prova da trajetória de secagem e maior dificuldade em umedecer os corpos-de-prova da trajetória de umedecimento ao lixiviado. A dificuldade de saturar pode ser explicada devido à presença de compostos sólidos no lixiviado, possíveis de obstruir os poros do solo. E a dificuldade em umedecer os corpos-de-prova na trajetória de umedecimento ao lixiviado deve-se aos compostos sólidos que obstruíram os poros da superfície do solo, ao surgimento de micro-organismos na superfície das amostras de solo a partir da 6^a semana do ensaio e/ou compostos insolúveis em água presentes no lixiviado e alocados para a superfície do solo. Esses micro-organismos e/ou

compostos insolúveis impediam o contato das gotas de lixiviado com o solo, tal como uma camada de material impermeabilizante. Logo, esses micro-organismos podem ter influenciado a parte referente à sucção matricial das curvas de retenção ao lixiviado, fazendo com que a sucção matricial não fosse considerada nos ensaios com esse fluido contaminante. Assim, como foi considerada apenas a porção da sucção osmótica, na curva de retenção ao lixiviado não houve a observação do fenômeno de *histerese*. O aparecimento dos micro-organismos na superfície do solo dos corpos-de-prova é relatado na Figura 6.22.

Figura 6.22 – Sequência de aparecimento de micro-organismos na superfície dos corpos-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de umedecimento ao lixiviado: (a) aparecimento dos micro-organismos, (b) aumento do micro-organismos, (c) camada de micro-organismos e (d) gotas de lixiviado sobre a camada de micro-organismos, tornando o solo menos permeável



Fonte: Própria autora, 2012.

Na trajetória de secagem ao lixiviado também ocorreu o aparecimento de micro-organismos na superfície da amostra, no entanto com um aspecto visual de tipo diferenciado (mais esbranquiçado) (Figura 6.23).

Figura 6.23 – Micro-organismos na superfície dos corpos-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de secagem ao lixiviado



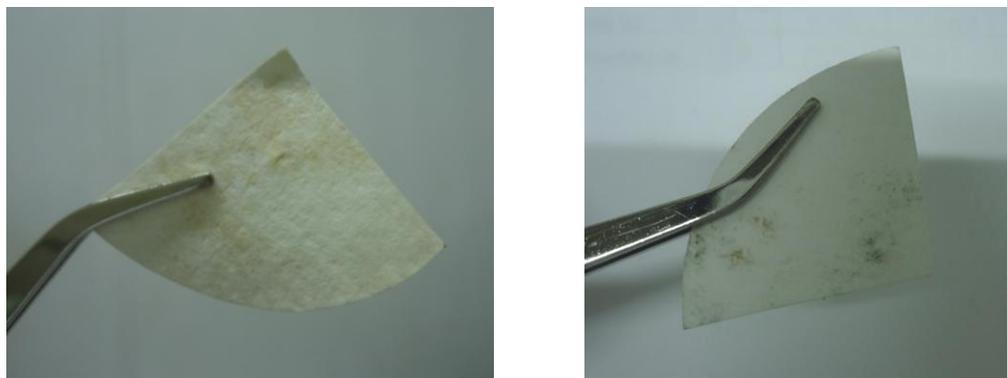
Fonte: Própria autora, 2012.

Segundo Leite (2013), os microrganismos são capazes de crescer e obstruir os poros do solo, tornando-o menos permeável, o que seria interessante para a funcionalidade da barreira impermeabilizante de base de um aterro sanitário. Os micro-organismos são também capazes de se alimentar dos resíduos depositados no aterro, tornando uma forma de tratamento natural. No entanto, os mesmo micro-organismos são potenciais de tornar o lixiviado ainda mais complexo de ser tratado, o que seria ruim.

Ressalta-se também que os micro-organismos que apareceram no solo do ensaio de papel filtro podem ser diferentes dos existentes em campo, visto as condições ambientais distintas, logo para comprovar a eficiência deles como camada natural impermeabilizante são necessários estudos microbiológicos mais aprofundados em campo e em laboratório.

Embora o papel filtro não ficasse em contato direto com o solo, o lixiviado era capaz de aderir ao papel, fazendo com que surgissem micro-organismos no papel também. Sendo este fato observado através da modificação da coloração do papel filtro (Figura 6.24). Esses micro-organismos no papel são potenciais de modificar os dados empíricos do ensaio, visto que estes eram pesados na balança e sua massa contabilizada como teor de umidade do papel. Não foi possível a separação dos micro-organismos do papel para efetuar a pesagem sem eles, no entanto esses micro-organismos apareceram apenas nas duas últimas semanas de ensaio da trajetória de umedecimento ao lixiviado, não prejudicando em muito os resultados obtidos.

Figura 6.24 – Mudança de coloração e micro-organismos na superfície do papel filtro que ficava em contato indireto com o solo no ensaio de papel filtro (curva de retenção) ao lixiviado, na trajetória de umedecimento



Fonte: Própria autora, 2012.

O lixiviado tem um grande impacto sobre as curvas de retenção do solo, sendo que as curvas de retenção ao lixiviado apresentaram menores valores de sucção do que as curvas à água na trajetória de secagem, dado um mesmo teor de umidade. Isto também ocorre em estudo de Merayyan e Hope (2009). Já as curvas ao lixiviado apresentaram valores bastante próximos e acima das curvas de retenção à água na trajetória de umedecimento, logo indica-se que o lixiviado provoca uma diminuição da sucção para dada umidade quando comparado às curvas da trajetória secagem à água, e conseqüentemente, um aumento no coeficiente de permeabilidade através da camada de solo compactado da barreira impermeabilizante de base. No entanto, há a tendência do solo reter mais lixiviado quando está menos úmido, em condição não saturada.

Estes resultados são consistentes com os estudos de Ichola e Gaidi (2006) e Merayyan e Hope (2009) sobre os efeitos da química dos fluidos contidos nos poros do solo, os quais demonstram que as propriedades intrínsecas dos fluidos têm efeitos definidos sobre o coeficiente de permeabilidade do solo. Nesses estudos, os autores concluíram que os lixiviados provocam um aumento no coeficiente de permeabilidade do solo, embora o aumento não seja muito significativo.

Como os solos dos corpos-de-prova foram compactados abaixo do teor de umidade ótimo, tal qual o solo da camada de solo compactado da barreira impermeabilizante da célula experimental, esses solos retêm menor quantidade de água ou lixiviado do que os mesmos

compactados com valores de teor de umidade igual ou maior do que o ótimo, segundo estudo das relações entre o teor de umidade e a sucção para solos argilosos compactados em diferentes teores de umidade inicial e energia de compactação, de Catana, Vanapalli e Carga (2006).

6.4.1 Alterações nos Corpos-de-prova da Trajetória de Umedecimento

Além do aparecimento de micro-organismos na superfície das amostras de solo a partir da 6^a semana do ensaio com lixiviado (Figura 6.22), ao iniciar o ensaio pela trajetória de umedecimento, observou-se que o corpo-de-prova ao secar em temperatura ambiente pelo período de 5 dias, sofreu uma contração de aproximadamente 0,1 cm de diâmetro (Figura 6.25), decorrência que pode relacionar-se ao aparecimento de fissuras na barreira de solo compactado em campo, na célula, caso esta seja exposta ao sol.

Figura 6.25 – Corpo-de-prova inicial do ensaio de papel filtro (curva de retenção), tanto pela água, quanto pelo lixiviado, apresentando contração do solo dentro do anel metálico após 5 dias exposto à secagem em temperatura ambiente (Trajetória de Umedecimento)



Fonte: Própria autora, 2012.

Foram observados indícios de expansão do solo do corpo-de-prova a partir da quinta semana para ensaio à água, na qual os valores de contração decaíram para cerca de 0,09 cm de diâmetro. Esse valor foi abatido semanalmente até que no final do ensaio (19 semanas), o solo preencheu todo o anel metálico confinante em diâmetro e ainda ultrapassou a área do anel em aproximadamente 0,2 cm de altura (Figura 6.26), equivalente a cerca de 15% de expansão do solo total. Para o ensaio ao lixiviado, as ações de contração e expansão do solo no anel foram mais lentas e menores.

Segundo Lepsch (2002) e Sampaio (2006), os argilominerias presentes no solo oferecem propriedades coloidais como afinidade pela água e pelos elementos químicos nela dissolvidos, logo são capazes de reter uma grande quantidade de água ou lixiviado, tornando-se expansivos com a absorção destes ou de outros líquidos. A Tabela 6.5 apresenta os constituintes das amostras de solo B, I, T e M, na qual há argilominerais com potencial de retenção de água (ou outros líquidos orgânicos) e expansibilidade, como a caulinita, montmorillonita, ilita, neotocita e baumita.

Figura 6.26 – Expansão do solo na semana 19^a nos corpos-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de umedecimento à água



Fonte: Própria autora, 2012.

Após a secagem em estufa (100^o), para obtenção do valor de massa seca do solo, os valores de contração finais foram de aproximadamente 0,25 cm, equivalente a cerca de 14% de contração do solo total para o ensaio à água destilada e ao lixiviado (Figura 6.27).

Figura 6.27 – Contração do solo do corpo-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de umedecimento após secagem em estufa para aquisição de massa seca



Fonte: Própria autora, 2012.

Com o decorrer do ensaio, percebeu-se visualmente um escurecimento na coloração superficial do solo (Figura 6.28), contudo este fato não interfere diretamente nas propriedades de retenção do solo, visto que a mudança de cor do solo provavelmente ocorreu devido às reações químicas das moléculas de água com os componentes mineralógicos do solo (hidratação, oxigenação, carbonatação, entre outros). Pesquisadores das Ciências dos Solos, como Persson (2005), mostram estudos da relação da umidade com a coloração da superfície dos solos.

Figura 6.28 – Diferença de coloração inicial e final no corpo-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de umedecimento à água destilada, devido às reações químicas das moléculas de água com os componentes mineralógicos do solo

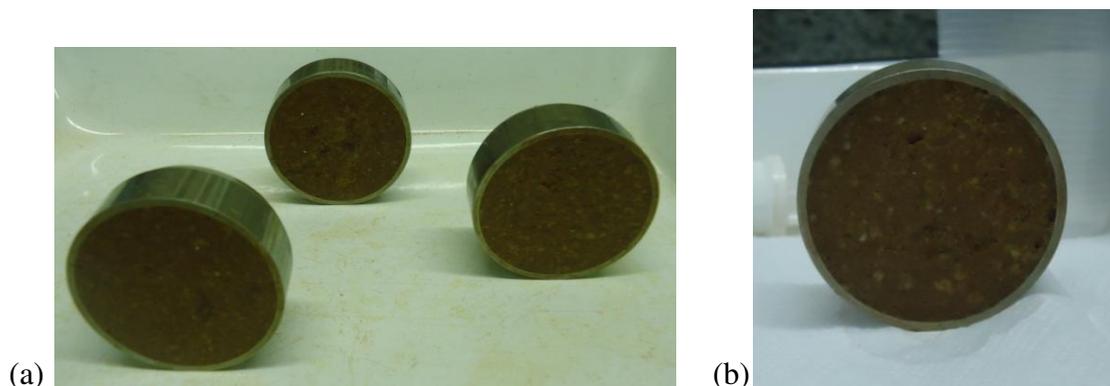


Fonte: Própria autora, 2012.

6.4.2 Alterações nos Corpos-de-prova da Trajetória de Secagem

Além do aparecimento de micro-organismos na superfície das amostras de solo submetidos ao ensaio com lixiviado (Figura 6.23), no início da trajetória de secagem, notou-se a expansão dos corpos-de-prova que estavam sob condições próximas à saturação, no entanto o solo apenas ocupou a área confinada do anel metálico (4,9 cm x 2,0 cm), não ultrapassando os limites deste (Figura 6.29).

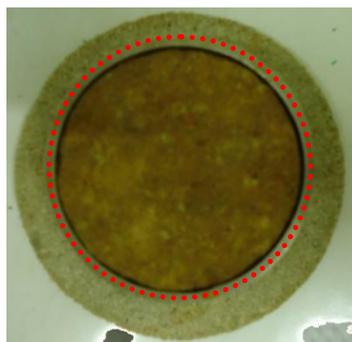
Figura 6.29 – Expansão do solo dentro do anel metálico do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de secagem para início de ensaio: (a) ensaio à água e (b) ensaio ao lixiviado



Fonte: Própria autora, 2012.

Valores de contração de 0,1 cm de diâmetro foram medidas aproximadamente na décima primeira semana dos ensaios (Figura 6.30).

Figura 6.30 – Contração do solo dentro do anel do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de secagem, aproximadamente na 11^a semana dos ensaios



Fonte: Própria autora, 2012.

Após a secagem em estufa (100°C), para aquisição do valor de massa seca do solo, os valores de contração finais foram de aproximadamente 0,15 cm, equivalente a próximos 6% de contração do solo total (Figura 6.31).

Figura 6.31 – Contração do solo do corpo-de-prova do ensaio de papel filtro (curva de retenção) da trajetória de secagem após estufa para aquisição de massa seca



Fonte: Própria autora, 2012.

6.4.3 Coeficientes de Permeabilidade Não Saturada

Nas Figuras 6.32 a 6.33 são expostos os resultados da determinação dos coeficientes de permeabilidade não saturada do solo, sendo que a Figura 6.32 apresenta os resultados dados em coeficiente de permeabilidade não saturada *versus* sucção para ensaio à água destilada e ao lixiviado. Na Figura 6.33 são apresentados os resultados dados em coeficiente de permeabilidade não saturada *versus* teor de umidade gravimétrico para água e lixiviado.

Figura 6.32 – Curvas de coeficiente de permeabilidades não saturada *versus* sucção, à água e ao lixiviado

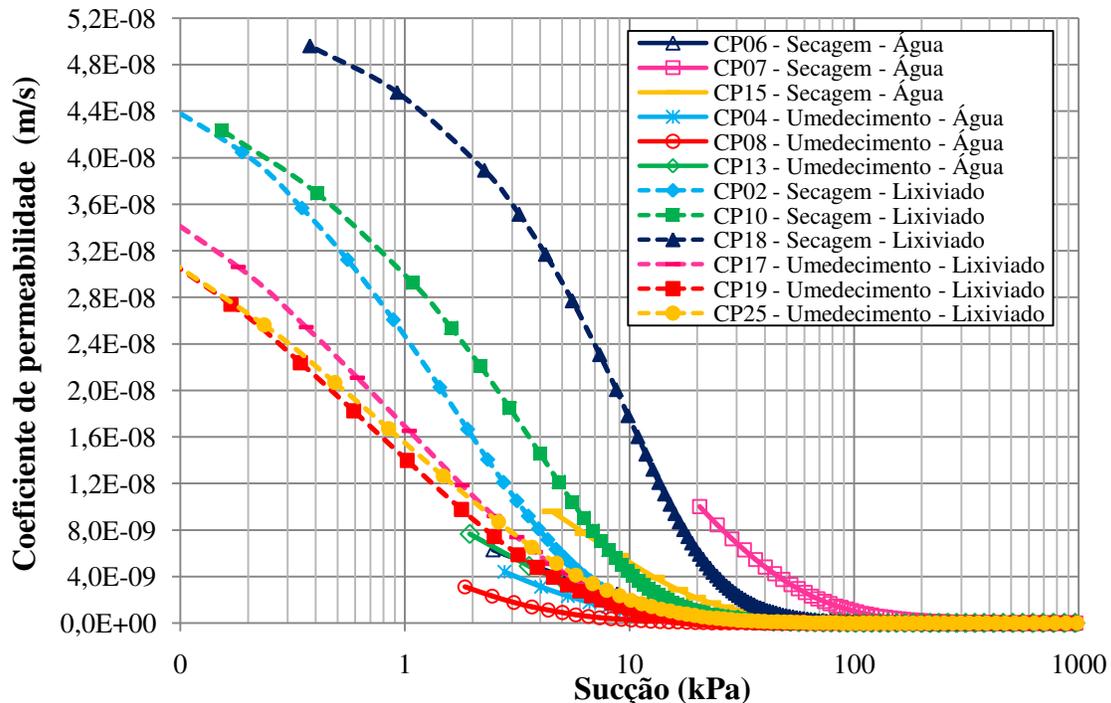
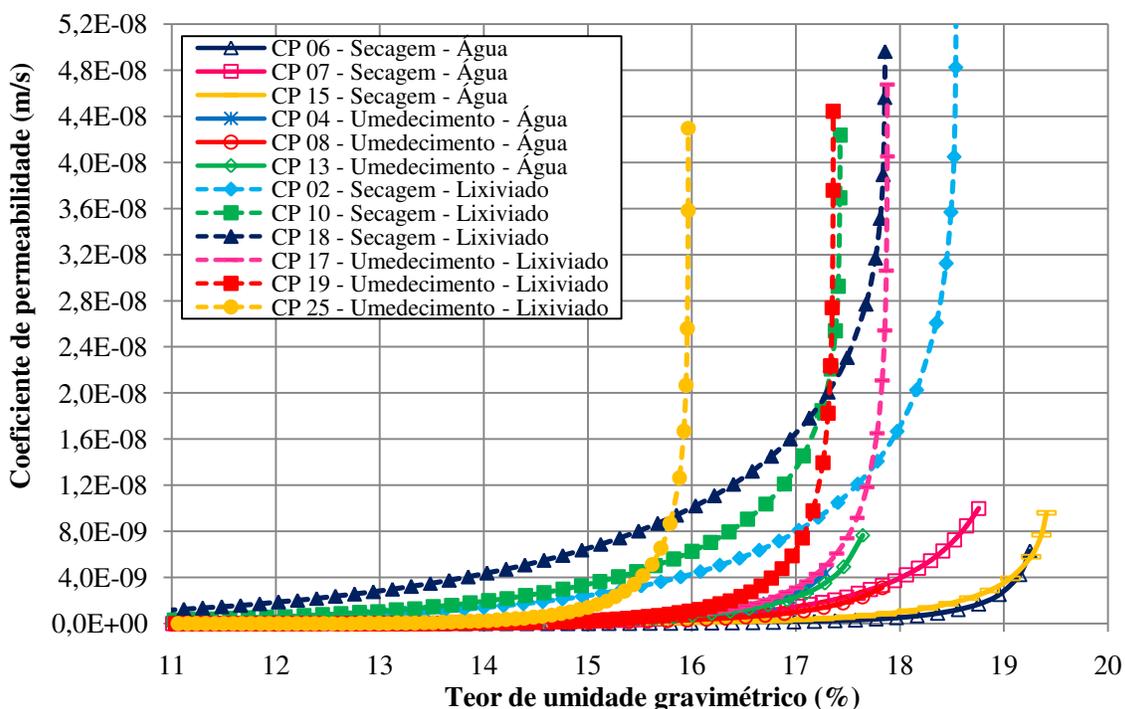


Figura 6.33 – Curvas de coeficiente de permeabilidades não saturada *versus* teor de umidade gravimétrico, à água e ao lixiviado



Assim como nas curvas de retenção do solo, os valores de sucção nos ensaios à água destilada são referentes a valores de sucção matricial e nos ensaios ao lixiviado, a valores de sucção total.

Da análise da Figura 6.32 verifica-se que os coeficientes de permeabilidade não saturada do solo foram inversamente proporcionais aos valores de sucção para água e o lixiviado. Para um mesmo valor de sucção (até cerca de 10 kPa), os valores de coeficiente de permeabilidade não saturada na trajetória de umedecimento são menores que no de secagem. Nota-se que para uma mesma sucção, o solo ensaiado com água destilada apresenta valores de coeficiente de permeabilidade não saturada menores que do ensaio ao lixiviado (Figura 6.32).

As curvas do ensaio ao lixiviado apresentam uma maior inclinação que à água, demonstrando os valores de coeficiente de permeabilidade não saturada do solo ao lixiviado em relação à sucção são mais variáveis, enquanto os valores de coeficiente de permeabilidade não saturada do solo à água em relação à sucção são mais constantes (Figura 6.32).

Na Figura 6.33, analisa-se que os coeficientes de permeabilidade não saturada do solo foram diretamente proporcionais ao teor de umidade gravimétrico para a água e o lixiviado, demonstrando que para um mesmo teor de umidade, o ensaio à água apresenta menores coeficientes de permeabilidade não saturada em relação ao lixiviado.

No ensaio à água, para um mesmo teor de umidade, os corpos-de-prova 06 e 15 da trajetória de secagem apresentam menores valores de coeficiente de permeabilidade não saturada do solo, enquanto os maiores valores são apresentados pelos corpos-de-prova 04 e 13 da trajetória de umedecimento. Já no ensaio ao lixiviado, ocorre o comportamento inverso, sendo que os corpos-de-prova da trajetória de umedecimento apresentam menores valores de coeficiente de permeabilidade não saturada que os do corpo-de-prova da trajetória de secagem (Figura 6.33).

No gráfico da Figura 6.33, observa-se que as curvas de retenção do ensaio ao lixiviado possuem também maior inclinação que as curvas de retenção à água, demonstrando que os valores de coeficiente de permeabilidade não saturada do solo ao lixiviado em relação ao teor de umidade gravimétrico são mais variáveis, enquanto os valores de coeficiente de permeabilidade não saturada do solo à água em relação ao teor de umidade são mais constantes. Na Tabela 6.29 são demonstrados os valores de coeficiente de permeabilidade não saturada e de sucção, de cada corpo-de-prova, correspondentes à umidade de campo, na qual a camada impermeabilizante de base foi compactada. Esses dados foram interpretados a partir das Figuras 6.32 e 6.33.

Tabela 6.29 – Valores de coeficiente de permeabilidade não saturada e sucção, correspondentes ao teor de umidade de campo (16,4%)

Trajectoria/ Fluido	CP	Teor de umidade de campo (barreira impermeabilizante de base) (%)	Coefficiente de permeabilidade (m/s)	Sucção (kPa)
Umedecimento à Água	04	16,4	$1,1 \times 10^{-9}$	9
	08	16,4	$5,3 \times 10^{-10}$	7
	13	16,4	$1,1 \times 10^{-9}$	11
Umedecimento ao Lixiviado	17	16,4	$1,3 \times 10^{-9}$	11
	19	16,4	$2,1 \times 10^{-9}$	7
	25	16,0*	$4,3 \times 10^{-8}$	0
Secagem à Água	06	16,4	$8,9 \times 10^{-11}$	90
	07	16,4	$8,2 \times 10^{-10}$	108
	15	16,4	$1,8 \times 10^{-10}$	75
Secagem ao Lixiviado	02	16,4	$5,5 \times 10^{-9}$	5
	10	16,4	$8,2 \times 10^{-9}$	7
	18	16,4	$1,2 \times 10^{-8}$	13

*O corpo-de-prova 25, submetido à trajetória de umedecimento ao lixiviado nos ensaios de papel filtro (curva de retenção), não atingiu valores de teor de umidade acima de 16%.

Nota-se que o solo da barreira impermeabilizante de base na sua condição de campo, isto é, não saturado, atende aos valores de coeficiente de permeabilidade sugeridos para compor barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários. Os corpos-de-prova 08, 06, 07 e 15, todos submetidos a ensaio à água destilada, apresentaram valores menores a 10^{-9} m/s, enquanto os outros corpos-de-prova (04, 13, 17, 19, 25, 02, 10 e 18 apresentaram valores próximos a 10^{-9} m/s, sendo que o corpo-de-prova 06 obteve o valor mínimo de $8,9 \times 10^{-11}$ e o corpo-de-prova 25 ao valor máximo, de $4,3 \times 10^{-8}$ m/s. Os ensaios à água também apresentaram menores valores de coeficiente de permeabilidade não saturada, quando comparado aos valores do lixiviado, o que relaciona-se com os estudos de Hamada, Calças e Giacheti (2002) e Ozcoban et al. (2006), descritos no Item 6.3 (Coeficiente de Permeabilidade Saturada), no qual os autores demonstraram que o lixiviado tende a escoar mais rapidamente pelo solo do que a água.

Assim, o solo e a água subterrânea, localizados abaixo das barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários estão suscetíveis a sofrerem mais rapidamente uma contaminação, caso esta viesse a ocorrer, devido ao fato do lixiviado possuir maiores valores de coeficiente de permeabilidade no solo do que se este fosse permeado com água. Esta maior agilidade no escoamento do lixiviado deve-se também aos baixos valores de sucções pelos solos para esse fluido, quando comparado aos valores para água.

7 ANÁLISE GERAL

Neste item são relacionados os principais resultados de todos os ensaios realizados para os solos B, I, T e M com a finalidade de apresentar uma discussão integrada sobre a potencialidade de uso desses solos como material para compor camada de solo compactada de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários.

Na Tabela 7.1 são apresentadas as classificações texturais, SUCS e MCT, os valores de massa específica dos sólidos (γ_s) e os valores de massa específica seca máxima ($\gamma_{d \text{ máx}}$) e teor de umidade ótimo ($w_{\text{ótimo}}$), obtidos das curvas de compactação (energia Proctor Normal).

Os principais resultados das caracterizações químico-mineralógica e físico-química para as amostras de solo B, I, T e M e o valor do Ponto de Carga Zero para o solo M estão reunidos na Tabela 7.2.

A Tabela 7.3 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade saturada e os coeficientes de permeabilidade não saturada referente ao teor de umidade de campo (barreira impermeabilizante de base) à água e ao lixiviado, para o solo M.

Tabela 7.1 – Classificações texturais, SUCS e MCT e os valores de massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo (curvas de compactação) das amostras de solo B, I, T e M

Parâmetros	Solo B		Solo I		Solo T		Solo M	
	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD
Classificação textural	Silte	Silte argilo-arenoso	Silte arenoso	Argila silto-arenosa	Silte areno-arenoso	Silte argilo-arenoso	Silte areno-argiloso	Silte argilo-arenoso
SUCS	CH-CL		CH		CH		CH	
MCT	NG'		NG'		LA'		NG'	
Proctor Normal	$\gamma_{d \text{ máx}}$ (g/cm^3)	1,602	1,680		1,645		1,740	
	$w_{\text{ótimo}}$ (%)	23,3	20,3		18,5		17,6	
	γ_s (g/cm^3)	2,684	2,641		2,693		2,658	

* SD – Sem defloculante. CD – Com defloculante.

Tabela 7.2 – Principais resultados das caracterizações químico-mineralógica e físico-química para as amostras de solo B, I, T e M e o valor do Ponto de Carga Zero para o solo M

Parâmetros		Solo B	Solo I	Solo T	Solo M
Principais compostos químicos	SiO ₂ (%)	70,86	70,79	71,46	74,30
	Al ₂ O ₃ (%)	15,79	16,27	15,38	14,00
	Fe ₂ O ₃ (%)	4,51	3,79	3,76	4,10
Minerais presentes e relevantes ao estudo		Quartzo Gibbsita Montmorillonita Caulinita	Quartzo Gibbsita Montmorillonita Caulinita	Quartzo Illita Gibbsita Caulinita	Quartzo Gibbsita Illita Caulinita
	pH	4,4	4,6	4,5	4,6
	Sb (%)	4,97	9,50	6,34	6,13
	S (cmol/dm³)	0,57	0,84	0,63	0,49
Principais parâmetros físico-químicos	Matéria Orgânica (%)	1,5	1,5	1,9	1,7
	CTC (cmol/dm³)	11,47	8,84	9,93	7,99
	C (g/dm³)	9,0	9,0	11,0	10,0
Ponto de Carga Zero		-	-	-	2,9

Tabela 7.3 – Valores dos coeficientes de permeabilidade saturada e dos coeficientes de permeabilidade não saturada referentes ao teor de umidade de campo (w=16,4%) à água e ao lixiviado, para o solo M

Coefficiente de Permeabilidade (k) /Fluido	Trajectoria	Solo M
k saturada - Água Destilada (m/s)	-	1,38 x 10 ⁻⁸
k saturada – Lixiviado (m/s)	-	1,19 x 10 ⁻⁸
k não saturada (w = 16,4%) - Água Destilada (m/s)	Umedecimento	5,3 x 10 ⁻¹⁰ a 1,1 x 10 ⁻⁹
	Secagem	8,9 x 10 ⁻¹¹ a 8,2 x 10 ⁻¹⁰
k não saturada (w = 16,4%) - Lixiviado (m/s)	Umedecimento	4,3 x 10 ⁻⁸ a 2,1 x 10 ⁻⁹
	Secagem	1,2 x 10 ⁻⁸ a 8,2 x 10 ⁻⁹

Segundo Cozzolino e Nogami (1993) e Nogami e Villibor (1995), os solos do Grupo NG' são argilas, argilas arenosas, argilas siltosas e siltes argilosos. Logo, esses solos pela classificação MCT mostram compatibilidade com os resultados das classificações textural para os solos B, I, e M quando na presença de defloculante, as quais apresentam siltes argilosos para B e M, e argila siltosa para I. No entanto, o solo T apresenta-se texturalmente como silte argiloso ou silte arenoso e na classificação MCT é considerado uma areia argilosa, demonstrando incompatibilidade de classificações. Solos do Grupo NG' também correspondem ao grupo CH (argila de alta plasticidade) pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o que também corresponde com o resultado de CH obtido para os solo B (Tabela 7.1).

As incompatibilidades de resultados ocorrem devido às classificações SUCS e texturais serem muitas vezes ineficientes para a previsão de propriedades geotécnicas dos solos tropicais. Enquanto a classificação MCT é capaz de identificar as diferenças entre os diversos tipos de solos tropicais e lhes atribuir suas reais propriedades e comportamento geotécnico (GURJÃO, SOUZA e BOSCOV, 2008). Já as divergências nas classificações texturais com e sem defloculante observados na Tabela 7.1, ocorreram devido à substância defloculante ter ocasionado o aumento da porcentagem da fração argila em todos os solos, visto que a substância defloculante permite uma maior desagregação das partículas.

A um primeiro instante, levando em consideração que os materiais finos permitem ao solo menor coeficiente de permeabilidade do que materiais arenosos, pela classificação MCT pode-se concluir que os solos B, I e M são melhores solos para compor material de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários, visto suas classificações MCT como argilas e siltes, enquanto o solo T é classificado como areia.

Contudo, pelos valores da Tabela 7.2, principais resultados das caracterizações químico-mineralógica e físico-química para as amostras de solo B, I, T e M, observa-se que não há diferenças significativas na composição de compostos químicos, minerais e parâmetros físico-químico do solo T, considerado laterítico, em relação aos solos B, I e M, classificados como não lateríticos. As porcentagens de óxidos de ferro e alumínio são bastante próximas e o mineral caulinita apresenta-se em todos os solos. A gibbsita, que compete ser um hidróxido de alumínio bastante presente nos solos intemperizados, característicos dos solos lateríticos, também está presente em todos os solos e não somente no T.

O caráter laterítico do solo T pode estar relacionado ao fato de ele ser mais intemperizado que os outros solos, visto que o solo T está localizado no horizonte da jazida que é mais próximo à superfície do terreno, isto é, este é o horizonte que possui contato com o ambiente externo e as intempéries.

Pode-se perceber que os valores de matéria orgânica e carbono (C) são um pouco maiores para o solo T, capacitando este solo a uma maior retenção de metais contidos no lixiviado. Segundo Bueno (2012), a matéria orgânica e o carbono são capazes de proporcionarem o aumento da CTC do solo e aumento da capacidade de retenção de água pelo solo devido ao aumento da superfície de contato e presença de micro-agregados provenientes da matéria orgânica. Deste modo, a matéria orgânica e o carbono proporcionam ao solo uma maior potencialidade na função de materiais de camadas compactadas de base, necessitando, no entanto, de análises mais aprofundadas com relação aos mecanismos de transporte de contaminantes para admissão cientificamente essa afirmação (Tabela 7.2).

Os valores da massa específica dos grãos dos solos de 2,641 a 2,693 g/cm³ correspondem à solos compostos por grãos de quartzo (areia), comprovados pela Tabela 7.2, em que mais de 70% da composição química dos solos estudados é formada por SiO₂, correspondente à formulação química do mineral quartzo. A presença de mais de 70% de mineral primário quartzo na fração sólida mineral das amostras de solo B, I, T e M refere-se à composição pouco alterada em relação à rocha originária, sendo os remanescentes da rocha-matriz, de composição química original. Embora os solos apresentem grande quantidade deste mineral primário, este é quimicamente inerte, não sendo interessante para compor barreiras de bases de aterros sanitários, pois não são potenciais para reter contaminantes contidos no lixiviado, como os minerais secundários presentes nas frações de finos (silte e argila).

Solos siltosos, como os elucidados texturalmente pelas amostras B, I, T e M (Tabela 7.1) possuem baixos valores de massa específica seca máxima e valores de umidade ótima entre 10% e 25%, compatível com os valores expostos também na Tabela 7.1, obtidos pelas curvas de compactação (energia proctor normal).

Os valores de coeficiente de permeabilidade saturada e não saturada, contido na Tabela 7.3, mostraram-se médio para permeabilidade saturada à água e ao lixiviado, e baixo para permeabilidade não saturada à água e ao lixiviado, relacionando com as propriedades expostas para solo do grupo NG' da classificação MCT, correspondente ao solo M, o qual apresentou valores de $1,38 \times 10^{-8}$ m/s para ensaio à água destilada e $1,19 \times 10^{-8}$ m/s ao lixiviado da célula experimental.

Foram observados indícios de expansão do solo dos corpos-de-prova do ensaio de papel filtro para a determinação de curvas de retenção à água e ao lixiviado equivalente a cerca de 15% de expansão para ensaio à água, os quais estão ligados aos argilominerálias presentes no solo M, dispostos na Tabela 7.2, como a caulinita e illita. Estes argilominerais oferecem propriedades coloidais como afinidade pela água e pelos elementos químicos nela dissolvidos, logo são capazes de reter uma grande quantidade de água ou lixiviado, tornando-se expansivos com a absorção destes ou de outros líquidos. Valores de contração do solo de aproximadamente 6% também foram observados para os corpos-de-prova do ensaio de papel filtro.

Valores maiores que 3% de expansibilidade e de contração são propriedades de solos do grupo NG' da classificação MCT, correspondente ao solo M (Tabela 7.1).

Visto que o pH do solo M é 4,6 e o valor do PCZ é 2,9 (Tabela 7.2), ele se encontra naturalmente (na jazida) acima do valor de PCZ, exibindo predominância em adsorção de cátions (CTC). No entanto, solos que possuem montmorillonita e illita em sua composição mineralógica, já são solos com propriedades de adsorver cátions a qualquer pH, o que é o caso dos solos B, I, T e M.

A montmorillonita e illita são argilominerálias com camadas 2:1, isto é, sua estrutura consiste em uma folha de gibbsita entre duas folhas de sílica, apresentando distância entre as camadas e uma consequente ausência de ligações fortes. Assim, quando colocados em contato com água, há o aumento da distância entre as camadas, favorecendo a hidratação e adsorção de cátions. A hidratação aumenta a distância entre as camadas e causa expansão do solo, já com a desidratação, a distância diminui, ocasionando a contração do material (PINTO, 2006).

As curvas de retenção, por sua vez, mostraram formatos e valores de parâmetros referentes aos resultados obtidos para curvas de retenção de solos argilosos utilizados como camada de solo compactado de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários, obtidos na literatura técnico-científica. Sendo que o lixiviado apresentou capacidade em modificar as propriedades do solo quando comparado aos resultados obtidos para água destilada, assim como apresentou diferenças nos resultados dos coeficientes de permeabilidade não saturada à água e ao lixiviado.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho teve o objetivo de realizar a caracterização de amostras de solo coletadas de uma jazida que proveu material para a concepção da camada de solo compactada do sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos (RSU), localizada no Aterro Delta A, do município de Campinas/SP. A caracterização foi realizada através de ensaios de caracterização geotécnica do solo, classificações geotécnicas tradicionais, classificação MCT, caracterização físico-química, caracterização químico-mineralógica, determinação de curvas de retenção à água e ao lixiviado e análises de coeficientes de permeabilidade saturada e não saturada do solo à água e ao lixiviado.

As principais conclusões foram que mediante os resultados de classificação geotécnica, as amostras de solo estudadas já se mostram como potenciais para serem utilizadas como camada mineral compactada do sistema de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários de RSU, visto os preceitos das características de materiais sugeridos pela literatura técnico-científica.

A caracterização químico-mineralógica também relatou que o solo possui propriedades significantes a compor material de barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários de RSU, visto seu pH acima do valor de Ponto de Carga Zero (PCZ), o que favorece a predominância de adsorção de cátions (CTC) e a presença de argilominerais em sua fração sólida mineral, os quais são potenciais de reter lixiviado e seus compostos.

A camada de base da célula foi compactada com desvio de umidade de -3,8% e grau de compactação de 100%, o que atende aos valores sugeridos na literatura para grau de compactação de no mínimo 95% para construção de camadas de solo compactado de barreiras impermeabilizante de base de aterros sanitários. Porém não acata com os valores recomendados de que a umidade do solo durante a compactação seja superior em 1, 2 ou 3% à umidade ótima devido à permeabilidade ser menor nessa condição.

Os valores de coeficiente de permeabilidade saturada não atendem ao valor solicitado por organizações nacionais e internacionais, porém esses valores foram obtidos para corpos-de-prova compactados abaixo do teor de umidade ótimo, o que tende a aumentar os valores de coeficientes

de permeabilidade do solo. No entanto, o solo da barreira impermeabilizante de base na sua condição de campo, isto é, não saturado, atende aos valores de coeficiente de permeabilidade estabelecidos pelas normas para compor barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários, sendo que os corpos-de-prova submetidos a ensaio à água destilada apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade não saturado próximos e menores a 10^{-9} m/s, enquanto os corpos-de-prova ao lixiviado apresentaram valores próximos e um pouco maiores que 10^{-9} m/s.

Em ensaio de permeabilidade à carga variável, foi observado que até saturar, a permeabilidade do solo pelo lixiviado é bem menor em comparação à da água, visto a presença de compostos sólidos no lixiviado capazes de obstruir os poros do solo, dificultando a permeabilidade.

Da análise comparativa das curvas de retenção à água destilada e ao lixiviado, conclui-se que o lixiviado tem um grande impacto sobre as curvas de retenção do solo. As curvas de retenção ao lixiviado apresentaram menores valores de sucção que as curvas de retenção à água na trajetória de secagem, dado mesmo teor de umidade. Logo, o lixiviado provoca uma redução do valor da sucção para a umidade de campo, o que conseqüentemente aumenta o coeficiente de permeabilidade da barreira impermeabilizante de base ao lixiviado. Vale a pena ressaltar que, nas curvas de retenção ao lixiviado as sucções foram totais (osmótica e matricial) e nas curvas de retenção à água foram matriciais. Assim, a sucção osmótica foi um dos fatores principais responsável pelas diferenças de comportamento das curvas de retenção ao lixiviado com relação às curvas de retenção à água.

Houve também o aparecimento de micro-organismos na superfície do solo dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de papel filtro ao lixiviado, para as trajetórias de secagem e umedecimento. As curvas de retenção à água destilada apresentaram o fenômeno de *histerese*, porém as curvas de retenção ao lixiviado não apresentaram esse fenômeno.

9 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O lixiviado de aterros sanitários combina diversos compostos químicos, de propriedades variadas, os quais possuem características singulares sobre os grãos do solo e potencialidade para modificar a composição da água no solo, tornando difícil a previsão do comportamento desses compostos nas barreiras impermeabilizantes de base. Sendo assim, para melhor e mais preciso entendimento, faz-se necessário mais estudos através de outros métodos de obtenção de curvas de retenção ao lixiviado de aterros sanitários e análises aprofundadas da interação e comportamento do solo com os compostos do lixiviado.

Ressalta-se que as normas vigentes e práticas de concepção de barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários utilizam de uma abordagem mais experimental, empregando ensaios prontamente executados em laboratório, como determinação de valores de coeficiente de permeabilidade saturada do solo à água. No entanto, muitas delas não representam as verdadeiras condições de campo. Logo, assim como neste estudo, deve-se procurar representar ensaios mais próximos às condições de campo das camadas de solo compactado de barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários, por meio do uso de lixiviado em ensaios de determinação de coeficiente de permeabilidade e obtenção de curvas de retenção do solo, pois o lixiviado e seus compostos contaminantes podem afetar significativamente os efeitos das propriedades dos solos argilosos.

Logo, como sugestões para pesquisas futuras, na continuidade deste trabalho seria interessante a realização de:

- Ensaios de adsorção do tipo *batch test*, com as amostras de solo da camada de solo compactado da barreira impermeabilizante de base e lixiviado gerado da célula experimental, a fim de se obter resultados sobre a eficiência de adsorção/dessorção dos contaminantes presentes no lixiviado pelo solo, avaliando possíveis efeitos da variação da razão solo:lixiviado e da variação do tempo de contato entre o solo e o lixiviado.

- Ensaios para análise dos micro-organismos que se desenvolvem na superfície da camada de solo compactado da barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários, com intuito de estudar e obter resultados se eles são favoráveis à camada de solo compactado da barreira impermeabilizante de base de aterro sanitário, atuando como um filme microbiológico de barreira

impermeabilizante natural ou se eles são prejudiciais, tornando o solo mais permeável ou tornando o lixiviado mais difícil e complexo de se tratar;

- Ensaios para obtenção de curvas de retenção e determinação do coeficiente de permeabilidade ao lixiviado com o solo compactado com valores de teor de umidade acima do ótimo e de massa específica seca máxima, a fim de avaliar a potencialidade e eficiência do solo estudado como camada de solo compactado da barreira impermeabilizante de base de aterros sanitários nas suas condições favoráveis;

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. J. R.; MIGUEL, M. G.; SAUEIA, F. N.; HAJNAL, V. H. J.; CARVALHO, D. Avaliação de um Solo Laterítico Coluvionar de Campinas/SP, por Diferentes Procedimentos de Determinação de Índices Físicos. In: XVIII CONGRESO ARGENTINO DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA, 18., 2006, San Juan. **Anais...** San Juan: CAMSIG, 2006. p. 1-10.

ALMEIDA, T. L. **Implicações ambientais dos processos de atenuação de lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos.** 2009. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4439:** Standard Terminology for Geosynthetics: Textile and leather technology: vocabularies. USA: ASTM, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298:** Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. USA: ASTM, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2487:** Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System): standard. USA: ASTM, 2011.

ANTILÉN, M.; FÖSTER, J. E.; CONFETTO, S. D.; RODIER, E.; FUDYM, O.; VENEZIA, A. M.; DEGANELLO, G.; ESCUDEY, M. Characterization of the porous structure of chilean volcanic soils by nitrogen adsorption and Mercury porosimetry. **J. Chil. Chem. Soc.**, Concepción, v. 49, n. 4, p. 313-318, 2004.

APHA, AWWA, WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 20 ed. Washington, D.C. American Public Health Association, USA, 1998.

APPEL, C.; MAB, L. Q.; RHUE, D.; KENNELLEY, E. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. **Geoderma**, v. 113, p. 77-93, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo: Determinação do limite de liquidez: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7180:** Solo: Determinação do limite de plasticidade: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1984c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo: Análise Granulométrica: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1984d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6457:** Amostras de Solos: Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1986a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo: Ensaio de Compactação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1986b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7185**: Solo: Determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1986c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10157**: 1987: Aterros de resíduos perigosos: Critérios para projeto, construção e operação: procedimento: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10838**: Solo: Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego de balança hidrostática: Método de ensaio: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: procedimento: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos: Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

BARBOUR, S. L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 5, n. 35(5), p. 873-894, 1998.

BENATTI, J. C. B.; LEME, M. A. G.; MIGUEL, M. G. Concepção, projeto e construção de célula experimental de grandes dimensões para estudo de recalques em aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG E V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS – GEOJOVEM, 16., 2012, Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas: ABMS, 2012. p. 1-11.

BONDER, B. H. **Curvas de retenção de água de um solo coluvionar de Campinas obtidas mediante técnicas de laboratório e de campo**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

BONDER, B. H.; MIGUEL, M; G. Hysteresis phenomenon of a tropical soil profile observed by means of soil water characteristic curves obtained in laboratory and field. In: 14TH PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING AND 64TH CANADIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 2011, Toronto, Canada. **Proceedings...** Toronto: Pan-Am CGS, 2011, p. 1-8.

BORGES, C. R.; GITIRANA JUNIOR, F. N.; LAURO VARGAS, C. A.; GUIMARÃES, R. C. Histerese de curvas características solo-água de um perfil de solo tropical de Aparecida de Goiânia – GO. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais...** Goiânia: Kelps, 2011. p. 133-139.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 248 p.

BOSCOV, M. E. G.; OLIVEIRA, E.; GHILARDI, M. P.; SILVA, M. M. Difusão de metais através de uma argila laterítica compactada. In: CONTAMINAÇÃO DE SOLOS E DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS,

2001, Lisboa e Porto. **Anais...** Lisboa e Porto: Sociedade Portuguesa de Geotecnia e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001. p. 195- 208.

BOSZCZOWSKI, R. B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaise de Curitiba, PR.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos.** 5. ed. São Paulo: F. Bastos, 1979. 647 p.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. Fort Collins: Colorado State University. **Hydrological Paper**, v., n. 3. p. 1-27, 1964.

BUENO, P. **Matéria orgânica no solo.** Iporá: Instituto Federal Goiano, 2012.

CALACE, N.; MASSIMIANI, A.; PETRONIO, B. M.; PIETROLETTI, M. Municipal landfill leachate-soil interactions: a kinect approach. **Chemosphere**, v. 44, n. 5, p. 1025-1031, 2001.

CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude de um Solo não saturado.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2000.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas.** Edição revista e atualizada. Campinas: Instituto Agronômico, 2009.

CARDOSO, R.; REIS, A.; MARANHA DAS NEVES, E.; CALDEIRA, L. Hydro-mechanical behavior of a clayey soil compacted on the dry and wet side of optimum. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais...** Goiânia: Kelps, 2011. p. 105-112.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos.** 1999. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1999.

CATANA, C.; VANAPALLI, S. K. CARGA, V. K. The water retention characteristics of compacted clays. **Unsaturated Soils**, v., 189, p. 1348-1359, 2006.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.

CENTER FOR SANITARY ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL SCIENCES/PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION (2003). **Guidelines for the design, construction and operation of manual sanitary landfills. A solution for the final disposal of municipal solid wastes in small communities.** Universidad de Antioquia, Colombia: CEPIS/PAHO, 2003. Disponível em: <<http://whqlibdoc.who.int/paho/2003/a85640.pdf>>. Acesso em: 03 Nov. 2013.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA e FUNDAÇÃO DE ESTUDOS AGRÁRIOS “LUIZ DE QUEIROZ”. **Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil.** Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos do ministério do Meio ambiente – SQA/MMA. Piracicaba: CEPEA e FEALQ, 2005. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/2363344/11/Estudo-de-Caso-Aterro-Delta-A-Campinas-SP>>. Acesso em: 03 Jul. 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos sólidos industriais**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aterro Sanitário – Definições**. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 09 Jan. 2012.

CHALERMYANONT, T.; ARRYKUL, S.; CHAROENTHAISONG, N. Potential use of lateritic and marine clays soils as landfill liners to retain heavy metals. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 117-127, 2009.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proc. of The Institute of Civil Engineering**, v. 92, n.2, p. 82-89, 1992.

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. (1986). The filter paper method of suction measurement. **Geotechnique**, v. 36, n.2, p. 265-268, 1986.

CHAVES, L. H. G.; MENINO, I. B.; ARAÚJO, I. A. de; CHAVES, I. de B. Avaliação da fertilidade dos solos das várzeas do município de Sousa, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p. 262-267, 1998.

COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. da S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um latossolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p 515-523, 2008.

COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. **Solos e Rochas**, v.16, n.2, p.77-91, 1993.

DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal**. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1993. 638 p.

DANIELSON, R.E. & SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A., 2., 1986, Madison. **Proceedings...** Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 443-460.

DELGADO, A. K. C.; CAMAPUM de CARVALHO, J.; CARDOSO, F.B.C.; OLIVEIRA CAMPOS, I. C. Influência da Compactação na forma da Curva Característica. In: I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 2003, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2003. p. 265-275.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 052**: Solos e agregados miúdos: Determinação da umidade pelo método expedito “Speedy”: Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994

DUARTE, K. S.; SOUZA, N. M. Alterações Estruturais em Solos Contaminados por Combustíveis. In: I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 2003, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2003. p. 259-264.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Landfill manuals. Landfill site design**. Ireland: EPA, 2000. Disponível em: <<http://www.epa.ie/downloads/advice/licensee/epa%20landfill%20site%20design.pdf>>. Acesso em: 08 Nov. 2012.

FAGERIA, N. K. **Produção de sementes sadias de feijão comum em várzeas tropicais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa arroz e feijão, 2004. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoVarzeaTropical/solos.htm#mo>> . Acesso em: 01 Jan. 2013.

FERNANDES, M. A.; VILAR, O. M. Medida da condutividade hidráulica em solo não saturado por meio de infiltrômetro de disco. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais...** Goiânia: Kelps, 2011. p. 47-55.

FERREIRA, S. T. **Avaliação da relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado com parâmetros físicos de um latossolo vermelho distrófico submetido a dois diferentes manejos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, RS, 2008.

FERREIRA, A. M.; GERSCOVICH, D. M. S.; SOEIRO, F. J. C. P. Avaliação de equações para interpretação do comportamento de solos residuais não saturados utilizando métodos de otimização. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais...** Goiânia: Kelps, 2011. p. 85-94.

FLEUREAU, J. M.; VERBRUGGE, J. C.; HUERGO, P. J.; CORREIA, A. G.; SAOUD, S. K. Aspects of the behavior of the compacted clayey soils on drying and wetting paths. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 39 n. 6, p. 1341-1357, 2002.

FREDLUND, D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 3, p. 286-321, 2006.

FREDLUND, D. G. Use of soil-water characteristic curves in the implementation of unsaturated soil mechanics. In: 3rd. International Conference on unsaturated Soils, 2002, Recife, vol 3, **Proceedings...** Recife, 2002.

FREDLUND, D. G.; ANGING, X.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 32, p. 440-448, 1995.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 31, n. 3, p. 521-532, 1994.

GERSCOVICH, D. M. S. **Fluxo em meios porosos saturados-não saturados**: modelagem numérica com aplicações ao estudo da estabilidade de encostas na cidade do Rio de Janeiro. 1994. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J. Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS - UNSAT2002, 3., 2002, Recife. **Anais...** Holanda: A.A. Balkema, 2002. p. 295-300.

GITIRANA JÚNIOR, G. F. N.; MASCARENHA, M. M. A.; CAMAPUM de CARVALHO, J. Introdução. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais...** Goiânia: Kelps, 2011. p. 9.

GURJÃO, C. M. C.; PASTORE, E. L. Estudos laboratoriais de solos da classificação MCT visando aplicações em liners - primeira etapa: sorção. In: I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E

PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 2003, Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2003. p. 251-258.

GURJÃO, C. M. C.; SOUZA, N. M.; BOSCOV, M. E. G. Estimativa de propriedades geoambientais de camadas impermeabilizantes de solos tropicais. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14., 2008, Búzios. **Anais...** Búzios: COBRAMSEG, 2008. p. 1161-1168.

GUYONNET, D.; TOUZE-FOLTZ, N.; NOROTTE, V.; POTHIER, C.; DIDIER, G.; GAILHANOU, H.; BLANC, P.; WARMONT, F. Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 5, p. 321-331, 2009.

HAMADA, J.; CALÇAS, D. A. N. Q. P.; GIACHETI, H. L. Escoamento de chorume de aterros sanitários em solos arenosos compactados. In: XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2002, Cancún. **Proceedings...** Cancún: AIDIS/FEMISCA, 2002. p. 1-7.

HAN, Y-S.; LEE, J-Y.; MILLER, C. J. FRANKLIN, L. Characterization of humic substances in landfill leachate and impact on the hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. **Waste Management & Research**, v. 27, n. 3, p. 233-241, 2009.

HILLEL, D. **Soil and water: Physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1971.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413 p.

ICHOLA A.; GAIDI, L. Hydraulic Conductivity and Pollutant Dispersion Coefficient Assessment during Leachate Flow in Unsaturated Clay. **Unsaturated Soils**, v. 2 n. 147 p. 1547-1558, 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS/COMPROMISSO EMPRESARIAL COM A RECICLAGEM. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

IWAI, C. K. **Tratamento de chorume através de percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros para resíduos sólidos urbanos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, SP, 2005.

KHATTAB, S. A. A.; AL-TAIE, L. K. I. Soil-water characteristic curves (SWCC) for lime treated expansive soil from Mosul city. **Geotechnical special publication**, v. 2, n. 147, p. 1671-1682, 2006.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262 p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferente sistemas de uso e manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26 n. 4, p. 857-867, 2002.

KONYAI, S.; SRIBOONLUE, V.; TRELO-GES, V.; MUANGSON, N. Hysteresis of Water Retention Curve of Saline Soil. **Unsaturated Soils**, v., 189, p. 1394-1404, 2006.

KORF, E. P.; FIORESE, G.; THOMÉ, A.; FONINI, A.; HEINECK, K.; CONSOLI, N. C. Capacidade de atenuação do solo de fundo da lagoa de estabilização de lixiviado do aterro sanitário do município de Carazinho/RS. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL E V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 6., 2007, Recife. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2007. p. 1-7.

LANGE, L. C.; SIMÕES, G. F.; FERREIRA, C. F. A.; COELHO, H. M. G. Estudo da transporte de contaminantes em meios porosos aplicado a aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. In: ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PEQUENAS COMUNIDADES, 2002, Florianópolis. **Trabalho Técnico...** Florianópolis: PROSAB, 2002. p. 85-92.

LEE, H. C.; WRAY, W. K. Techniques to evaluate soil suction – a vital unsaturated soil variable. In: 1st International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 95), 1995, Paris, **Proceedings...** Balkema, Rotterdam, 1995, p. 615-622.

LEITE, D. S. **Conversa Pessoal...** Professor Doutor do Departamento de Genética Evolução e Bioagentes Instituto de Biologia. Universidade Estadual de Campinas. 2013.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178 p.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo.** São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LIMA, I. S. ; SILVA, H. F.; RAMOS, V.C.L. Investigando o Comportamento de um Solo Não Saturado da Formação Barreiras Contaminado com Óleo Diesel. In: 13º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 2011, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CBGE, 2011.

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; CÁSSARO, F. A. M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 1957-1973, 2011.

MACAMBIRA, I. Q. **Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos para uso como barreira impermeável.** 2002. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, SP, 2002.

MALAYA, C.; SREEDEEP, S. Evaluation of SWCC Model and Estimation Procedure for Soil and Fly Ash. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, 2010, Providence, Rhode Island. **Proceedings...** Rhode Island: ASCE, 2010. p. 614-622.

MALAYA, C.; SREEDEEP, S. Critical review on the parameters influencing soil-water characteristic curve. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 138, n. 1, pp. 55-62, 2012.

MARINHO, F.A.M. Medição de sucção com o método do papel filtro. IN: X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10., 1994, Foz do Iguaçu. **Anais...**, São Paulo: ABMS, 1994. p. 515-522.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage Behavior of Some Plastic Clays.** 1994. PhD thesis – University of London, UK, 1994.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. In: 3º. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1997, p. 373-397.

MARINHO, F. A. M. **Os solos não saturados:** aspectos teóricos, experimentais e aplicados. 2005. Texto para Concurso (Livre-Docência na especialidade Geomecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

MARQUES, A. C. R. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. 2001. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2001.

MARTÍNEZ, G. S.e S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da Formação Barreiras**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2003.

MARTINS, S. C. **Adsorção e dessorção de cobre em solos sob aplicação de lodo de esgoto e calda bordalesa**. 2005. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2005.

MERAYYAN, S.; HOPE, A. The Affect of Municipal Landfill Leachate on the Characterization of Fluid Flow Through Clay. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, 2009, Great Rivers, **Proceedings...** Great Rivers: ASCE, 2009. p. 2505-2519.

MET, İ.; AKGÜN, H.; TÜRKMEÑOĞLU, A. G. Environmental geological and geotechnical investigations related to the potential use of Ankara clay as a compacted landfill liner material, Turkey. **Environmental Geology**, v. 47, n. 2, p. 225-236, 2005.

MIGUEL, M. G.; AGUIAR, D. P. de O.; LOPEZ, B. C.; ARCARO, N. P.; PEREIRA, S. Y. Características de retenção de água de um perfil de solo contaminado por vinhaça. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais...** Goiânia: Kelps, 2011. p. 261-268.

MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A C. C. Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 12, n. 24, p. 63-74, 2006.

MILLER, C.; MERAYYAN, S.; YESILLER, N. Unsaturated Per-formance Comparison of Compacted Clay Landfill Liners. **Advances in Unsaturated Geotechnics**, p. 555-568, 2000.

MILLER, D. J.; NELSON, J. D. Osmotic suction in unsaturated soil mechanics. In: 4th. International Conference on Unsaturated Soils, 2006, Carefree, **Proceedings...** Arizona: ASCE, 2006, p. 1383-1393.

MONCADA, M. P. H. **Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associados à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; CARLESSO, R.; LUZ, F. B. Curva de retenção de água de um Latossolo sob estados de compactação. IN: XIX REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 19., 2012, Lages. **Anais...** Lages: SBCS, 2012. p. 1-4.

NEEDHAM, A. D.; SMITH, J. W. N.; GALLAGHER, E. M. G. The service life of polyethylene geomembrane barriers. In: 4th BGA Geoenvironmental Engineering Conference, 4., 2006, **Proceedings...** Engineering Geology , 2006. p. 82-90.

NOBRE, E. M. G.; FERREIRA, S. R. de M. Condutividade hidráulica de solo compactado: contaminação por gasolina. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2006. p. 1503-1508.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 240 p.

OBLADEN, N. L., OBLADEN, N. T. R., e BARROS, K. R. **Guia para elaboração de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos – Volume II**. Paraná: CREA-PR, 2009. Disponível em: <http://www.crea-pr.org.br/crea3/html3_site/doc/manuais/aterros_volumeII.pdf>. Acesso em: 05 Set. 2011.

OFFICINE MACCAFERRI. **Bentonite geocomposites**. Itália: Maccaferri italian web site, 2013. 1 fotografia. Disponível em: <<http://www.officinemaccaferri.com/products/geosynthetics/bentonite-geocomposites/13293-2.html>>. Acesso em: 03 Jul. 2013.

OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2004.

OLIVEIRA, J. C.; PRIM, E. C. C.; JUNIOR, A. B. C. Estudo da retenção de poluentes veiculados por lixiviados de aterros sanitários em solos argilosos. In: ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PEQUENAS COMUNIDADES, 2002, Florianópolis. **Trabalho Técnico...** Florianópolis: PROSAB, 2002. p. 77-84.

OZCOBAN, M. S.; TUFEKCI, N.; TUTUS, S.; SAHIN, U.; CELIK, S. O. Leachate removal rate and the effect of leachate on the hydraulic conductivity of natural (undisturbed) clay. **Journal of Scientific & Industrial Research**. v. 65, p. 264-269, 2006.

PERDOMO, C. V. **Influência das propriedades físico-mecânicas e hídricas do solo na susceptibilidade a escorregamentos em vertente declivosa na Serra do Mar em Ubatuba, São Paulo**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.

PERSSON, M. Estimating Surface Soil Moisture from Soil Color Using Image Analysis. **Vadose Zone Journal**, v. 4, n. 4, p. 1119-1122, 2005.

PESSIN, N.; SILVA, A. R.; CONTO, S. M. de; PANAROTTO, C. T.; BEAL, L. L. Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos sólidos. In: ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PEQUENAS COMUNIDADES, 2002, Florianópolis. **Trabalho Técnico...** Florianópolis: PROSAB, 2002. p. 13-17.

PIEIDADE JÚNIOR, C. R. C. **Análise da potencialidade de alguns solos não lateríticos para utilização em barreiras impermeáveis**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciênc. agrotec.**, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.

RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A., 1965, Madison. **Methods of soil analysis...** Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.128-152.

RIDLEY, A. M. **The measurement of soil moisture suction**. 1993. PhD thesis – University of London, UK, 1993.

RITTER, E.; LEITE, A. E. de B.; MACHADO, V. de F. Avaliação da capacidade de mitigação da argila orgânica presente na fundação e nas valas de contenção lateral para o chorume gerado no Aterro Metropolitano de Gramacho - Rio de Janeiro. In: 21 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2001. p. 1-10.

RODRIGUES, D. F.; MIGUEL, M. G. Caracterização Geotécnica de Solos Tropicais Visando a Utilização como Barreiras Impermeabilizantes de Aterros Sanitários. IN: V SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 5., 2011, Brasília. **Anais...** Brasília, 2011. p. 99-110.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p. Disponível em: <http://www.cnpm.embrapa.br/publica/download/bpd_8.pdf>. Acesso em: 2 Jan. 2013.

ROWE, R. K. **Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000. 1088 p.

SAMPAIO, E. P. M. **Mineralogia do solo**. Portugal: Departamento de Geociências da Universidade de Évora, 2006. 21 p. Disponível em: <<http://home.dgeo.uevora.pt/~ems/files/Anexo%20B-03.pdf>>. Acesso em: 25 Jan. 2013.

SANTOS, E. F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

SANTOS, L. M. D. G. **Caracterização de dimensão e composição geoquímica de pluma de contaminação no Aterro Sanitário Municipal Delta A em Campinas (SP)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2011.

SCOTT, D. H. **Soil physics: agricultural and environmental applications**. Ames: Iowa State University Press, 2000. 421 p.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO. **Resíduos sólidos: Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários – guia do profissional em treinamento: nível 2**. Belo Horizonte: ReCESA, 2008. 112 p. Disponível em: <http://www.nurene.com.br/residuos_solidos/projeto_operacao_e_monitoramento_de_aterros_sanitarios.pdf>. Acesso em: 10 Set. 2012.

SHARIATMADARI, N.; MANSOURI, A.; ZARRABI, M; KARIMPOURFARD, M. Effect of waste compaction in landfill settlement - a case study in Iran. In: TWELFTH INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM S. MARGHERITA DI PULA, 2009, Cagliari, Italy. **Proceedings...** Cagliari, 2009.

SILVA, A. J. N. **Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. 2003. (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2003.

- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; LIMA, J. F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um argissolo amarelo de tabuleiro costeiro. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 29, n. 6, 2005.
- SILVA, A. M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005.
- SILVA, F. C. da **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.
- SILVA, J. da S.; MURRIETA, P.; CARDIM, R. D. Influência do fluxo de contaminantes na sucção matricial de um solo laterítico. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., 2007, Recife. **Anais...** Recife: REGEO, 2001. p. 1-5.
- SILVA JÚNIOR, A. C.; GARCIA, D. L. R.; GITIRANA JÚNIOR, G. F. N. Avaliação da medição de sucção em campo de um solo tropical pelo método do papel filtro. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais...** Goiânia: Kelps, 2011. p. 15-19.
- SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. 2004. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.
- SOTO, M. A. A.; KIANG, C. H.; VILAR, O. M. Avaliação do escalonamento fractal de alguns solos brasileiros. **Ver. Brás. Geociênc.**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 253-262, 2008.
- SOUSA, R. P.; OLIVEIRA, I. B.; MACHADO, S. L.; SALES, E. A. Canal de fluxo instrumentalizado: fluxo bidimensional da água em areia não saturada para teste do aparato. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis. **Anais...** Goiânia: Kelps, 2011. p. 95-104.
- SOUZA, R. F. C. **Migração de poluentes inorgânicos em liners compostos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, SP, 2009.
- SREEDEEP, S.; SINGH, D. N. Methodology for determination of osmotic suction of soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 24, p. 1469-1479, 2006.
- TINJUM, J.; BENSON, C.; BLOTZ, L. Soil-water characteristic curves for compacted clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 11, p. 1060-1069, 1997.
- UBALDO, M. O.; BORMA, L. S.; BARBOSA, M. C. **Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas**. Série Gestão e planejamento Ambiental, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. 51 p.
- UEHARA, G; GILLMAN, G.P. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays**. Boulder: Westview Press, 1981. 169 p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1988). **Guide to Technical Resources for the Design of Land Disposal Facilities**. Ohio: USEPA, 1988. Disponível em: < <http://nepis.epa.gov>>. Acesso em: 04 Ago. 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Seminar Publication - Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure**. Ohio: USEPA, 1989. Disponível em: < <http://nepis.epa.gov>>. Acesso em: 04 Ago. 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Criteria for municipal solid waste landfills (MSWLF Criteria)**: Design criteria. Chapter 4. Subpart D. Ohio: USEPA, 1993. Disponível em: <<http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/landfill/techman/subpartd.pdf>>. Acesso em: 04 Nov. 2012.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. **Géotechnique** **49**, n. 2, p. 143-159, 1999.

van GENUCHTEN, M.T. A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Proc. Sci. Soc. Am.** v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

van GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Washington: EPA, 1991, 93 p.

VELOSO, C. A. C.; SOUZA, F. R. S. de; PEREIRA, W. L. M.; TENÓRIO, A. R. de M. Relações cálcio, magnésio e potássio sobre a produção de matéria seca de milho. **ACTA AMAZONICA**, v. 31, n. 2, p. 193-204, 2001.

WADA, L. M.; FUTAI, M. M. Influência de óleo na curva de retenção em um solo tropical. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL E V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 6., 2007, Recife. **Anais...** Recife: ABMS, 2007. 1-6.

WOODBURN, J. A.; LUCAS, B. New approaches to the laboratory and field measurement of soil suction. In: First International Conference on Unsaturated Soils, v. 2, 1995, Paris. **Proceedings...** France: Balkema, 1995, p. 667-671.

YANG, Y. Y.; ZHANG, Q. X.; WANG, G. H. Study on the Test of Soil Water Characteristic Curve. **Advanced Materials Research**, v. 261-263, n., p. 1094-1098, 2011.

ZHOU, J.; YU, J. Influences affecting the soil-water characteristic curve. **Journal of Zhejiang University SCIENCE.**, v. 6A, n. 8, p. 797-804, 2005.